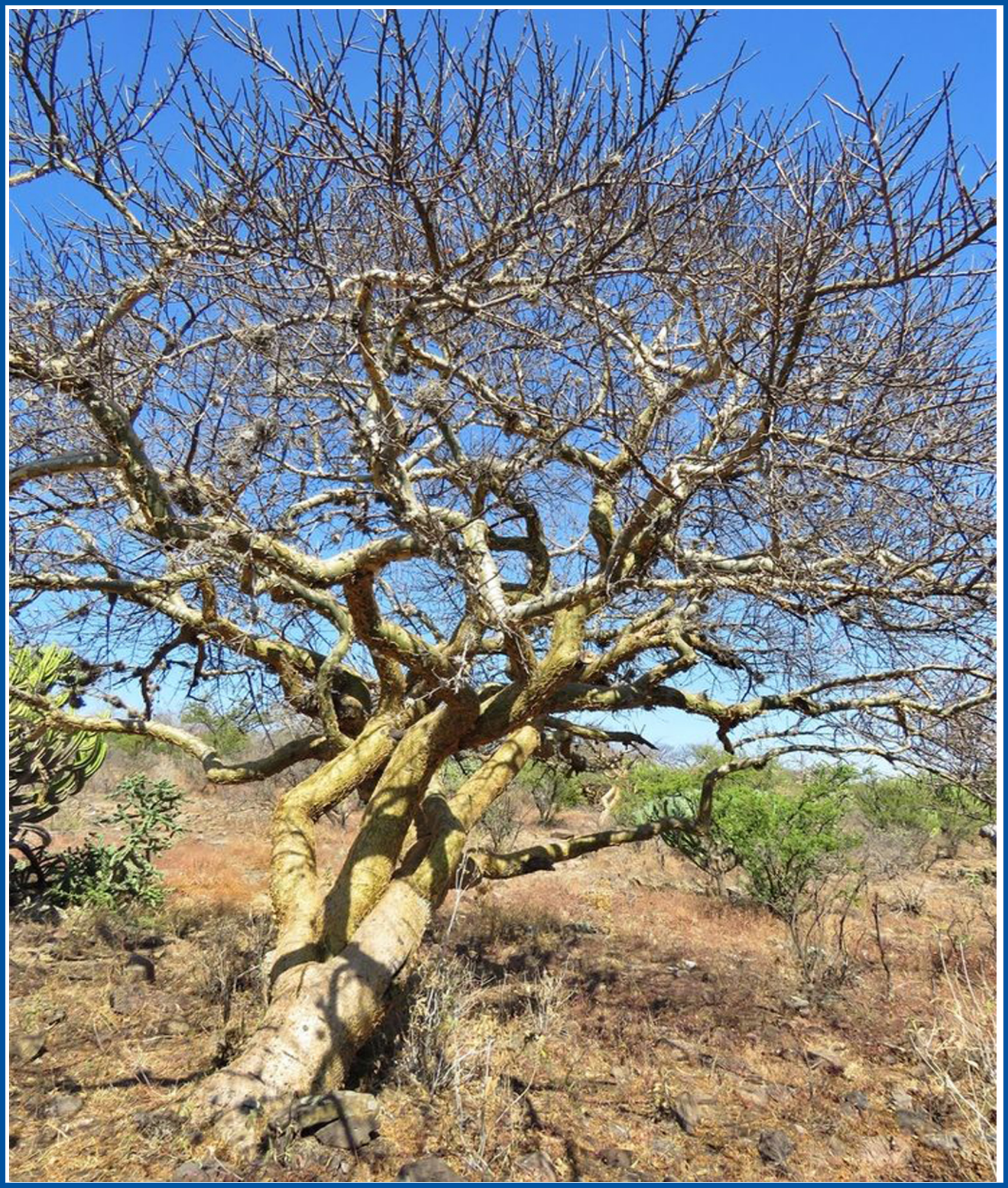
POLIBOTÁNICA

ISSN 1405-2768 ISSN 2395-9525



Núm. 60 Julio 2025

CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"
DIRECCIÓN DE PUBLICACIONES

PÁG. CONTENIDO

1 *Mammillaria scoria* (cactaceae) una nueva especie de Querétaro, Mexico
Mammillaria scoria (Cactaceae) a new species from Querétaro, México
Pedro González-Zamora | David Aquino | Daniel Sánchez

15 Revisión del género *Karwinskia* (Rhamnaceae) en México
Review of the *Karwinskia* genus (Rhamnaceae) in mexico
Rafael Fernández Nava | Maria de la Luz Arreguín Sánchez

39 Diversidad florística de las áreas verdes urbanas de Miahuatlán, una ciudad pequeña de Oaxaca, México
Floristic diversity of the urban green areas of Miahuatlán, a small city from Oaxaca, Mexico
Víctor Gutiérrez Pacheco | Deisy Coromoto Rebolledo López

61 Caracterización morfológica de especies del género *Hylocereus* (Cactaceae) en una unidad de cultivo localizada en Molcaxac, Puebla, México
Morphological characterization of species of the genus *Hylocereus* (Cactaceae) in a cultivation unit located in Molcaxac, Puebla, Mexico
Vianey del Rocio Torres Pelayo

79 Estandarización del proceso de diafanización vegetal en las especies: *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) y una Spermatophyta *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder Rosaceae
Standardization of the plant diaphanization process; of *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) and one Spermatophyta *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)
Ruth Concepción Márquez Juárez | Arantxa Chowell-López | Diego Martínez Mata | Gabriela Sánchez Fabila Sánchez Fabila | Roberto Moreno Colín | Pilar Amellali Badillo-Suárez | Irma Estrella Beatriz Manuell Cacheux | Rogelio Monterrubio Valdivia

91 Análisis de la estructura de un bosque en una región del suroeste del estado de Durango
Analysis of the structure of a forest in a southwestern region of the state of Durango
Manuel Antonio Díaz-Vásquez | Pedro Antonio Domínguez-Calleros | Norberto Domínguez-Amaya | Héctor Manuel Loera-Gallegos | Jesús Alejandro Soto-Cervantes

107 Estructura y diversidad arbórea de una selva mediana perennifolia en el complejo ecoturístico Agua Selva, Tabasco, México
Tree structure and diversity of a medium evergreen forest in the Agua Selva ecotourism complex, Tabasco, Mexico
Manuel Pérez de la Cruz | Josué García León | José del Carmén Gerónimo Torres | Facundo Sánchez Gutiérrez | Miguel Alberto Magaña Alejandro | Aracely de la Cruz Pérez

123 Diversidad del sotobosque; un atributo de evaluación en reforestaciones utilizadas como estrategias de restauración forestal
Understory diversity; an evaluation attribute in reforestations used as a forest restoration strategy
Isidoro Herrera Ávila | Francisca Ofelia Plascencia Escalante | Marlín Pérez Suárez | Patricia Hernández De La Rosa | Gregorio Ángeles Pérez

141 Estructura y diversidad arbórea bajo dos esquemas de manejo forestal e influencia de la orientación geográfica en un bosque de Durango, México
Tree structure and diversity under two forest management schemes and the influence of geographic orientation in a forest in Durango, Mexico
José de Jesús Graciano Luna | Eduardo Alanís Rodríguez | Oscar Aguirre Calderón | César Martín Cantú Ayala | José Yerena Yamallel | Cristian Martínez Adriano | José Luján Soto

163 Reserva de carbono orgánico y nitrógeno en Luvisol bajo diferentes usos de suelo en Oaxaca, México
Organic carbon and nitrogen reserve in Luvisol under different land uses in Oaxaca, México
Celestino Sandoval García | Israel Cantú Silva

177 Estimación de carbono a nivel árbol individual en bosque natural mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT)
Carbon estimation at individual tree level in natural forest using unmanned aerial vehicles (UAV)
Susana Isabel Hinojosa-Espinoza |Jaime Briseño Reyes | José Javier Corral-Rivas | Jesús Aguirre-Gutiérrez | Daniel José Vega-Nieva | Héctor Manuel De los Santos Posadas

199 Variación morfométrica y espacial urbana de tres especies arbóreas en función del ancho de camellón en calles de la ciudad de San Luis Potosí, México
Morphometric and urban spatial variation of three tree species in relation to street median width in the city of San Luis Potosi México
Andrea Candia Lomelí | Carlos Renato Ramos Palacios | Jonathan Hammurabi González Lugo | Fredy Alexander Alvarado Roberto

229 Descripción inicial de la fenología de *Quercus durifolia* Seemen ex Loes. árbol endémico de la Sierra Madre Occidental
Initial description of the phenology of *Quercus durifolia* Seemen ex Loes. endemic tree of the Sierra Madre Occidental
Rosa Elvira Madrid Aispuro | José Ángel Prieto Ruíz | Arnulfo Aldrete | Silvia Salcido Ruiz | Eduardo Daniel Vivar Vivar | Laura Elena Martínez Nevárez

245 Registro polínico en miel de *Apis mellifera* L. de dos localidades de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, México
Pollen record on honeybee honey of *Apis mellifera* L. of Sierra of Manantlan Biosphere Reserve, Jalisco, México
Xochilt Morales Najarro | Iris Grisel Galván Escobedo | Monserrat Vázquez Sánchez | Montserrath Medina Acosta

SEP
Julio 2025
Núm. 60
POLIBOTÁNICA
CONAHCYT

SEP
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"
DIRECCIÓN DE PUBLICACIONES

PÁG. CONTENIDO

263 Efecto de complejos orgánicos en la micropropagación de *Phalaenopsis* var. Dudu
Effect of organic complexes on micropropagation of *Phalaenopsis* var. Dudu
Amaury Arzate Fernández | Sandra Martínez Martínez | Tomás Norman Mondragón | María Mariezcurrena Berazain | Arely Piña Sampedreño

273 Evaluación de las respuestas de tres variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) inoculadas con bacterias cuando se cultivan en condiciones de estrés por aguas residuales y sulfato de cobre.
Evaluation of the responses of three tomato varieties (Solanum lycopersicum L.) inoculated with bacteria when grown under stress conditions due to wastewater and copper sulfate
Abdul Khalil Gardezi | Leticia Manuela Inzunza Medina | Guillermo Carrillo Castañeda | Hector Manuel Ortega Escobar | oscar raul mancilla villa | Juan Enrique Rubiños Panta | Jorge flores Velazquez | Mora Meraz Maldonado | Sergio Roberto Marquez Berber | Hector Flores Magdaleno | Gabriel Haro Aguilar

291 Especies de *Meloidogyne* asociadas a cultivos hortícolas en el Valle de Tepeaca, Puebla, México
Perineal patterns and isozyme phenotypes for the identification of root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) in vegetables from the Tepeaca Valley, Puebla, Mexico
Maria Gabriela Medina Canales | Ana Karen Alquicira Jimenez | Norma García Aguilar | Ilia Mariana Escobar Ávila | Alejandro Tovar Soto

307 Efecto de las propiedades fisicas y químicas del suelo en el estado nutrimental del nopal-verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill variedad Milpa Alta
Effect of soil physical and chemical properties on the nutritional status of nopal-vegetable (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill variety Milpa Alta
Bertha Patricia Zamora Morales | Aurelio Báez Pérez | Leticia Bonilla-Valencia | Jorge Artemio Zegbe Domínguez | Marisela Cristina Zamora Martínez | Abel Quevedo-Nolasco

325 Evaluación fitoquímica de extractos de la resina de *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.
Phytochemical evaluation of resin extracts of *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.
Luis Antonio Flores-Hernández | Fanny Imelda Pastenes-Felizola | Fanny Imelda Pastenes-Felizola | jose Luis Díaz-Nuñez | Pablo Noé Núñez-Aragón

337 Callogénesis y análisis fitoquímico de *Euphorbia* nutans Lag.
Calllogenesis and phytochemical analysis of *Euphorbia* nutans Lag.
Daniel Aguilar Jiménez | Benito Reyes Trejo | José Luis Rodríguez De la O | Juan Martínez Solís

355 Evaluación de dos métodos de desinfección de sustratos para la producción de *Pleurotus ostreatus*
Evaluation of two substrate disinfection methods for the production of *Pleurotus ostreatus*
Rosa Elena Hernández Hernández | Veronica Rosales Martinez | Carolina Flota Bañuelos | Mónica Leticia Osnaya González | Porfirio Morales Almora

367 Conservación genómica de dos especies del orden Asparagales con cariotipo bimodal, empleando hibridación genómica *in situ* (GISH)
Genomic conservation of two species of the order Asparagales with bimodal karyotype, using genomic *in situ* hybridization (GISH)
María José García Castillo | Luis Carlos Rodríguez Zapata | Lorenzo Felipe Sanchez Teyer

381 Prácticas de manejo para la producción de (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) en productores del Municipio de Pungarabato, Guerrero, México
Management practices for the production of (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) in producers of the Municipality of Pungarabato, Guerrero, Mexico
Jaime Olivares | Santos Rodríguez Mejía | Saúl Rojas Hernández | Teolincacihualt Romero Rosales | Miguel Ángel Damian Valdéz | Vania Jiménez Lobato | Lucero Sarabia Salgado

395 Manejo del ramón *Brosimum alicastrum* Sw. en huertos familiares de Tzucacab, Yucatán, México
Ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.) management in home gardens of Tzucacab, Yucatán, México
Rosalba Esther Mex Mex | Juan José Jiménez Osornio | Patricia Irene Montañez-Escalante | Héctor Estrada Medina | Guadalupe del Carmen Reyes Solis

411 Rescate y conservación del conocimiento tradicional sobre plantas medicinales en la sierra de Taxco, Guerrero, México: El caso del Toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)
Rescue and conservation of traditional knowledge on medicinal plants in the Sierra de Taxco, Guerrero, Mexico: The case of Toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)
Judith Morales Barrera | Blas Cruz-Lagunas | Miguel Angel Gruintal-Santos | Mirna Vázquez-Villamar | Teolincacihuatl Romero-Rosales | Saúl Rojas-Hernández | Tania de Jesús Adame Zambrano

441 Etnobotánica de los chiles silvestres en dos comunidades ch'oles de Tacotalpa, Tabasco, México
Ethnobotany of wild chili peppers in two ch'ol communities of Tacotalpa, Tabasco, Mexico
Guadalupe Morales Valenzuela | María Isabel Villegas Ramírez

459 Caracterización sensorial para la diferenciación de mezcal ancestral de dos zonas productoras de Oaxaca, México
Sensory characterization for the differentiation of ancestral mezcal from two producing areas of Oaxaca, Mexico
Susana Yareth López García | Anastacio Espejel García | Arturo Hernández Montes | Landy Hernández Rodríguez | Ariadna Isabel Barrera Rodríguez

SEP
IPN
Julio 2025
Núm. 60
POLIBOTÁNICA
CONAHCYT

REVISTA BOTÁNICA INTERNACIONAL DEL **I**NSTITUTO **P**OLITÉCNICO **N**ACIONAL

EDITOR EN JEFE
Rafael Fernández Nava

EDITORA ASOCIADA
María de la Luz Arreguín Sánchez

COMITÉ EDITORIAL INTERNACIONAL

Christiane Anderson
University of Michigan
Ann Arbor. Michigan, US

Delia Fernández González
Universidad de León
León, España

Heike Vibrans
Colegio de Postgraduados
Estado de México, México

José Angel Villarreal Quintanilla
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
Saltillo, Coahuila, México

Hugo Cota Sánchez
University of Saskatchewan
Saskatoon, Saskatchewan, Canada

Luis Gerardo Zepeda Vallejo
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México

Fernando Chiang Cabrera
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

Claude Sastre
Muséum National d´Histoire Naturelle
París, Francia

Thomas F. Daniel
California Academy of Sciences
San Francisco, California, US

Mauricio Velayos Rodríguez
Real Jardín Botánico
Madrid, España

Francisco de Asis Dos Santos
Universidad Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana, Brasil

Noemí Waksman de Torres
Universidad Autónoma de Nuevo León
Monterrey, NL, México

Carlos Fabián Vargas Mendoza
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México

Julieta Carranza Velázquez
Universidad de Costa Rica
San Pedro, Costa Rica

José Luis Godínez Ortega
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

Tom Wendt
University of Texas
Austin, Texas, US

José Manuel Rico Ordaz
Universidad de Oviedo
Oviedo, España

Edith V. Gómez Sosa
Instituto de Botánica Darwinion
Buenos Aires, Argentina

Edith V. Gómez Sosa
Instituto de Botánica Darwinion
Buenos Aires, Argentina

Dr. Juan Ramón Zapata Morales
Universidad de Guanajuato
Guanajuato. México

Jorge Llorente Bousquets
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

DISEÑO Y FORMACIÓN ELECTRÓNICA
Luz Elena Tejeda Hernández

OPEN JOURNAL SYSTEM Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
Pedro Aráoz Palomino

Toda correspondencia relacionada con la revista deberá ser dirigida a:

Dr. Rafael Fernández Nava
Editor en Jefe de

POLIBOTÁNICA

Departamento de Botánica
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional
Apdo. Postal 17-564, CP 11410, Ciudad de México

Correo electrónico:
polibotanica@gmail.com
rfernan@ipn.mx

Dirección Web
http://www.polibotanica.mx

POLIBOTÁNICA es una revista indexada en:

CONAHCYT, índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología.

SciELO - Scientific Electronic Library Online.

Google Académico - Google Scholar.

DOAJ, Directorio de Revistas de Acceso Público.

Dialnet portal de difusión de la producción científica hispana.

REDIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico.

LATINDEX, Sistema regional de información en línea para revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

PERIODICA, Indice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.

CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

Mammillaria scoria (Cactaceae) UNA NUEVA ESPECIE DE QUERÉTARO, MÉXICO

Mammillaria scoria (Cactaceae) A NEW SPECIES FROM QUERÉTARO, MEXICO

González-Zamora, P., D. Aquino, D. Sánchez

Mammillaria scoria (Cactaceae) UNA NUEVA ESPECIE DE QUERÉTARO, MÉXICO
Mammillaria scoria (Cactaceae) A NEW SPECIES FROM QUERÉTARO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 1-13 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.1

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Núm. 60: 1-13 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Mammillaria scoria (Cactaceae) una nueva especie de Querétaro, México

Mammillaria scoria (Cactaceae) a new species from Querétaro, Mexico

Pedro González-Zamora https://orcid.org/0000-0002-2702-5828
Grupo de Estudio de Cactáceas y Vida Silvestre del Occidente, A. C.
C.P. 28454, Comala, Colima, México.

David Aquino https://orcid.org/0000-0003-0797-6754
Jardín Botánico, Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México
Cto. Zona Deportiva s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 04510
Coyoacán, Ciudad de México, México

Daniel Sánchez / dsanchez@ib.unam.mx
https://orcid.org/0000-0002-8621-0222
Estación de Biología Chamela, Instituto de Biología
Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 21
San Patricio-Melaque, Jalisco 48980, México

ABSTRACT: *Mammillaria* ser. *Stylothelae* is a well-recognized group in southern Chihuahuan Desert. Some members of this series have been regarded as highly polymorphic species. Recent analyses showed that some populations of those species complex can be accepted as independent species. In this study, we measured, statistically analyzed and compared quantitative and qualitative characters in plants during field work and plants in cultivation to identify a new species of de *M.* ser. *Stylothelae* from central Querétaro, Mexico. We compared it with close geographical and morphological species of the series as *M. crinita*, *M. duwei*, *M. nana*, *M. painteri*, and *M. tezontle*. The new taxon is distinguished by the globose growth form up to 24 mm tall, with 1–2 (mean=1.7) central spines and 17–21 (mean=18.86) radial spines, presence of fibrous roots, naked axils, and non-arillate seeds. The new species inhabits the xerophytic scrub and grows on basic extrusive igneous rock.
Key words: Cacteae, Linear Discriminant Analysis, *Mammillaria* ser. *Stylothelae*, morphometrics, taxonomy.

RESUMEN: *Mammillaria* ser. *Stylothelae* es un grupo bien reconocido en el sur del Desierto Chihuahuense. Algunos miembros de esta serie has sido considerados como especies altamente polimórficas. Análisis recientes mostraron que algunas poblaciones de estos complejos de especies pueden ser aceptadas como especies independientes. En este estudio medimos, analizamos estadísticamente y comparamos caracteres cuantitativos y cualitativos en plantas en el campo y en cultivo, para identificar a una nueva especie de *M.* ser. *Stylothelae* del centro de Querétaro, México. Comparamos el nuevo taxón con especies geográfica y morfológicamente cercanas de la serie como *M. crinita*, *M. duwei*, *M. nana*, *M. painteri* y *M. tezontle*. El nuevo taxón se distingue por su forma de crecimiento globosa de hasta 24 mm de alto, con 1 a 2 (media=1.7) espinas centrales y 17–21 (media=18.86) espinas radiales, presencia de raíces fibrosas, axilas desnudas y semillas sin arilo. La nueva especie habita el matorral xerófilo creciendo en afloramientos de escoria volcánica.
Palabras clave: Cacteae, Análisis Discriminante Lineal, *Mammillaria* ser. *Stylothelae*, taxonomy.

González-Zamora, P., D. Aquino, D. Sánchez

Mammillaria scoria (Cactaceae) UNA NUEVA ESPECIE QUE CRECE SOBRE ROCAS ÍGNEAS EXTRUSIVAS EN QUERÉTARO, MÉXICO

Mammillaria scoria (Cactaceae) A NEW SPECIES GROWING ON EXTRUSIVE IGNEOUS ROCK FROM QUERÉTARO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 1-13. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.1

Núm. 60: 1-13 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

INTRODUCTION

Mammillaria Haw. is the most diverse genus in Cactaceae. Recently, the taxonomic limits of the genus have been discussed in two phylogenomic analyses (Breslin *et al.*, 2021; Chincoya *et al.*, 2023). Both studies recovered a clade, named *Mammillaria* S.Str. that grouped most of the members of the genus. This lineage inhabits different ecosystems of North America, Central America and Antilles, and is diverse in the desertic and semidesertic regions of central and northern Mexico (Pilbeam, 1999). Korotkova *et al.* (2021) recognized ca. 143 species in *Mammillaria* s.str. Some infrageneric groups, traditionally recognized in *Mammillaria*, have been corroborated as monophyletic assemblages. Examples included *M.* ser. *Polyedrae* K. Schum. (Aquino-García, 2014), *M.* ser. *Supertextae* D. R. Hunt (Cervantes *et al.*, 2021), *M.* ser. *Polyacanthae* K. Schum. (Cervantes *et al.*, 2021), and *M.* ser. *Stylothelae* (Pfeiff.) K. Schum. (Chincoya *et al.*, 2023).

Mammillaria ser. *Stylothelae* comprises plants with globose to short cylindrical stems, solitary or branched, thin and conic tubercules, axiles with or without bristles, acicular central and radial spines with at least one uncinate central spine, and the presence of alkaloids in flowers and fruits (Hunt, D. R., Taylor, N. P., & Charles, G, 2006; Lüthy, 1995).The series includes 20–25 spp., which are distributed in the southern region of the Chihuahuan Desert, Sierra Madre Oriental, and foothills of the Mexican Transvolcanic Belt with an affinity of igneous soils (Hernández, H. M., & Gómez-Hinostrosa, C., 2015; Pilbeam, 1999).

Recent publications have increased the number of species in *M.* ser. *Stylothelae*. Morphometrics studies and botanical exploration have recognized three new species in the series, *M. morentiniana* Gonz.-Zam., D.Aquino, J.Mohl & Dan.Sánchez (González-Zamora *et al.*, 2022), *M. arreolae* P.Carrillo & Ortiz-Brunel (Ortiz-Brunel *et al.*, 2023), and *M. monochrysacantha* Gonz.-Zam., D.Aquino & Dan.Sánchez (González-Zamora, P., Aquino, D., Rodríguez, A., Sánchez, D., 2023). Morphometric (González-Zamora *et al.*, 2022) and phylogenetic (Ortiz-Brunel, 2025) analyses suggest that different lineages have been erroneously grouped under *Mammillaria crinita* DC. This polymorphic taxon has a wide geographic distribution (Hunt, Taylor, N. P., & Charles, G, 2006; Pilbeam, 1999).

During fieldwork at the municipality of Colón, Querétaro, we observed plants similar to *Mammillaria duwei* Rogoz. & P. J. Braun and *Mammillaria nana* Backeb. ex Mottram. Those specimens show 0–3 reddish central spines but do not present thickened roots, unlike *M. duwei* and *M. nana* (Arias & Aquino, 2019). Besides, we noted that individuals grow on slight slope of outcrops of volcanic scoria, a substrate shared with *Mammillaria tezontle* W. A. Fitz Maur. & B. Fitz Maur. (Fitz & Fitz-Maurice, 1995). Therefore, the present work has allowed to characterize a new species within *M*. ser *Stylothelae*.

MATERIAL AND METHODS

Taxon sampling: We examined specimens from the herbaria DES, MEXU, and QMEX (Thiers, 2024+) to identify localities and plan fieldwork in the Mexican states of Guanajuato, Querétaro and San Luis Potosí. We conducted fieldwork in Querétaro at Colón municipality during November 2021 and June 2022. We also documented the morphological variation of five morphological and geographical close species *M. duwei*, *M. nana,* and *M. tezontle*, as well as *M. crinita* and *M. painteri* Rose. Specimens were preserved and deposited in IBUG and MEXU (Thiers, 2024+). The six sampled sites and specimen vouchers are detailed in Table 1.

Character sampling and statistical analyses: At each site, we photographed ten plants using a millimeter ruler in different view planes. Table 2 lists the quantitative characters documented in the specimens. We used the image analyzer ImageJ (Schneider *et al.*, 2012) to count and measure the variation of characters in each individual.

Table 1. Localities and vouchers included in the morphological analysis.
Tabla 1. Localidades y especímenes de respaldo incluidos en el análisis morfológico.

Taxon	Locality	Collector/Herbarium
Mammillaria crinita	Tolimán, Querétaro	P. González-Zamora 22 / IBUG
M. crinita	Zimapán, Hidalgo	P. González-Zamora 25 / IBUG
M. duwei	Victoria, Guanajuato	P. González-Zamora 29 / IBUG
M. nana	Lourdes, SLP	P. González-Zamora 10 / IBUG
M. painteri	Amealco, Querétaro	P. González-Zamora 111 / IBUG
M. scoria	Colón, Querétaro	P. González-Zamora 83 / IBUG
M. tezontle	Villa Hidalgo, SLP	P. González-Zamora 115 / IBUG

We calculated measures of central tendency and standard deviation for the quantitative characters (Table 3). We calculated the Pearson correlation coefficient between characters (CCP). Non-correlated characters were retained for subsequent analyses (Table 2). These variables were transformed using natural logarithm to ensure a normal distribution and homogeneity of variance. We performed a Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) and post hoc tests to confirm significant differences between species (Tabachnick & Fidell, 2012). Finally, a Linear Discriminant Analysis (LDA) was performed using species as group variable. All statistical analyses were conducted using PAST 4.10 (Hammer *et al.*, 2001).

Morphological characterization: We built a comparative table that included the most discriminant quantitative characters from LDA and useful qualitative characters to delimit species in *M*. ser. *Stylothelae* (Table 2). Both vegetative and reproductive morphological characters were meticulously documented during fieldwork and further verified in cultivated plants, ensuring a comprehensive and precise description of the new taxon.

Evaluation of the Conservation Status: We estimated the Area of Occupancy (AOO) and Extent of Occurrence (EOO) using the GeoCAT tool (Bachman *et al.*, 2011) and based on the IUCN Red List Categories and Criteria (IUCN, 2024).

Table 2. List of quantitative characters used in the statistical analyses. Asterisk denotes correlated characters.
Tabla 2. Lista de los caracteres cuantitativos usados en los análisis estadísticos. El asterisco señala a los caracteres correlacionados.

Character	Acronym	Character	Acronym
Stem height	STLE	Length of radial spines	LRSP
Stem diameter	STWI	Areole length	AREL*
Number of central spines	NCSP	Areole width	AREW*
Length of central spines	LCSP	Areole length/width ratio	ARER
Number of radial spines	NRSP		

RESULTS

Table 3 compares the central tendency values of the analyzed species. MANOVA revealed significant differences ($P<0.01$), and post hoc tests confirmed significance between each pair of species ($P<0.01$). LDA explained 86.91% of the total variation across two axes, 64.6% for axis 1 and 22.31% for axis 2. The loadings matrix (WcovC) identified NCSP and LCSP as the characters with the highest discriminant power on axis 1, while LRSP showed the strongest loading on axis 2. As illustrated in Figure 1, the new species forms a well-delimited group, clustering around central values on axis 1 and negative values on axis 2. The jackknifed confusion matrix from the LDA correctly assigned 98% of observations to their respective groups, with an overall accuracy of

95.71% for *a priori* assignments (Table 4). Finally, Table 5 and Figure 2 highlight a unique combination of morphological characters that distinguish *Mammillaria* sp. nov. from other taxa.

Table 3. Central tendency measures for *Mammillaria scoria* and close species included in the analysis. M=mean, SD=standard deviation, Min=minimum, Max=maximum.
Tabla 3. Medidas de tendencia central en *Mammillaria scoria*. y especies cercanas incluidas en el análisis. M=media, SD=desviación estándar, Min=mínimo, Max=máximo.

Species	N		STLE	STWI	NCSP	LCSP	NRSP	LRSP	ARER
M. crinita	20	M	25.75	30.62	3.65	5.45	20.11	4.84	0.90
		SD	5.12	5.18	0.61	1.08	2.144	0.83	0.06
		Min	13.2	20.2	2	3.01	16	2.7	0.73
		Max	33.6	39.1	4	7.8	25	6.9	0.99
M. duwei	10	M	19.9	30.8	1.09	7.16	27.06	3.88	0.83
		SD	6.31	6.15	0.32	1.08	2.806	0.6	0.08
		Min	10	23	0	4.5	22	3	0.64
		Max	34	46	2	10	34	5	0.98
M. nana	10	M	20.2	32.2	1.09	6.88	28.18	5.62	0.74
		SD	5.16	6.32	0.28	1.41	1.84	1.23	0.07
		Min	14	21	1	3	23	3	0.62
		Max	34	44	2	9	32	8	0.88
M. painteri	10	M	24.94	24.81	3.57	3.04	19.74	2.65	0.91
		SD	3.59	4.77	0.71	0.45	2.35	0.4	0.03
		Min	19.73	18.2	2	2.1	15	1.6	0.82
		Max	31.9	36.1	5	3.9	25	3.4	1
M. scoria	10	M	18.2	19.50	1.7	4.25	18.86	2.68	0.61
		SD	3.98	2.85	0.78	1.1	2.05	0.46	0.07
		Min	13	12.9	0	1.98	13	1.47	0.5
		Max	24.2	22.2	3	7	24	3.8	0.78
M. tezontle	10	M	16.23	25.87	2.52	2.12	17.36	2.54	0.95
		SD	3.22	3.22	0.68	0.39	1.59	0.56	0.02
		Min	13.05	19.44	1	1.1	14	1.5	0.90
		Max	24.16	32.08	4	3.1	20	3.89	1

Table 4. Jackknifed confusion matrix from the Lineal Discriminant Analysis.
Tabla 4. Matríz de confusión con remuestreo de Jackknife del Análisis Discriminante Lineal.

Specie	*M. scoria*	*M. crinita*	*M. nana*	*M. duwei*	*M. tezontle*	*M. painteri*	Total
M. crinita	0	196	0	0	2	2	200
M. nana	0	1	87	12	0	0	100
M. duwei	0	0	4	96	0	0	100
M. painteri	0	0	0	0	7	93	100
M. scoria	98	0	0	1	0	1	100
M. tezontle	0	0	0	0	100	0	100

Table 5. Comparative of the morphology of *Mammillaria scoria* and close species included in the analyses.
Tabla 5. Comparativa de la morfología de *Mammillaria scoria* y especies cercanas incluidas en los análisis.

Characters	***M. crinita***	***M. duwei***	***M. nana***	***M. painteri***	***M. scoria***	***M. tezontle***
Type of root	fibrous	thickened	thickened	fibrous	fibrous	fibrous
Axile bristles	present	present	present	absent	absent	absent
Number of central spines	3.65 ± 0.61	1.09 ± 0.32	1.09 ± 0.28	3.57 ± 0.71	1.7 ± 0.78	2.52 ± 0.68
Length of central spines	5.45 ± 0.108	7.16 ± 1.08	6.88 ± 1.41	3.04 ± 0.45	4.25 ± 1.1	2.12 ± 0.39
Number of radial spines	20.11 ± 2.14	27.06 ± 2.80	28.18 ± 1.84	19.74 ± 2.38	18.86 ± 2.05	17.36 ± 1.59
Length of radial spines	4.84 ± 0.83	3.88 ± 0.6	5.62 ± 1.23	2.64 ± 0.4	2.68 ± 0.46	2.54 ± 0.56
Type of seed	arillate	non-arillated	non-arillated	non-arillated	non-arillated	arillate

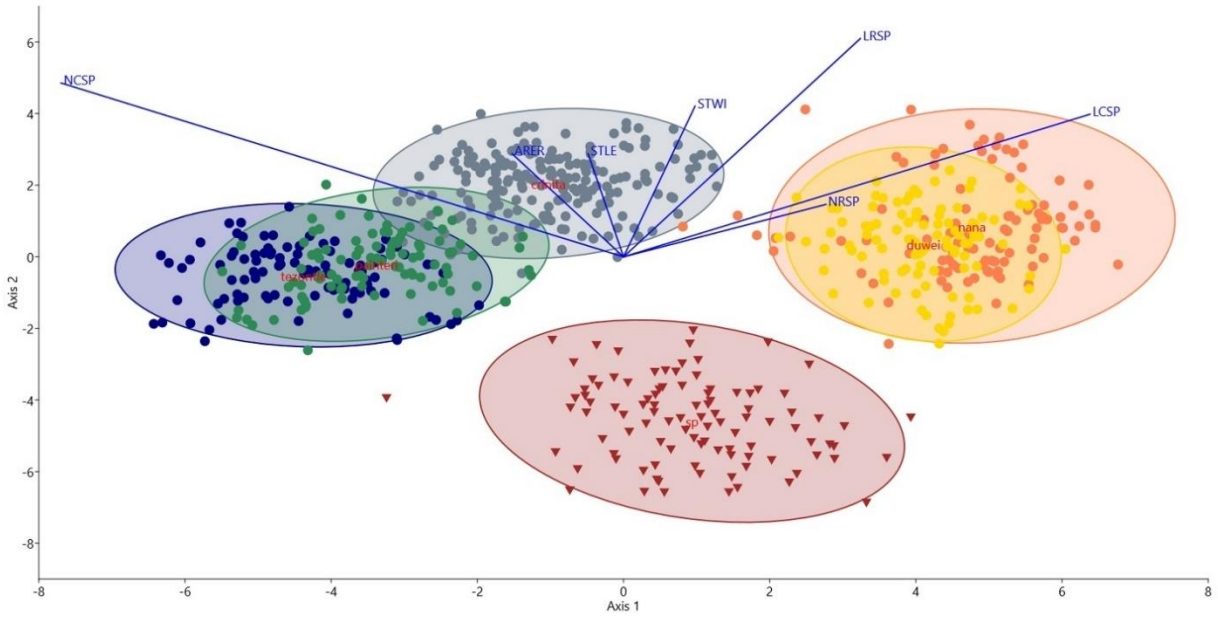


Figure 1. Scatter plot of the two first axis of the Linear Discriminant Analysis of seven quantitative characters and six species of *Mammillaria* ser. *Stylothelae*. Blue circles: *M. tezontle*; green circles: *M. painteri*; gray circles: *M. crinita*; yellow circles: *M. duwei*, orange circles: *M. nana*; and red triangles: *M. scoria*.
Figura 1. Gráfico de dispersión de los dos primeros ejes del Análisis Discriminante Lineal de siete caracteres cuantitativos y seis especies de *Mammillaria* ser. *Stylothelae*. Círculos azules: *M. tezontle*; círculos verdes: *M. painteri*; círculos grises: *M. crinita*; círculos anaranjados: *M. duwei*, círculos amarillos: *M. nana*; y triángulos rojos: *M. scoria*.

Núm. 60: 1-13 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figure 2. Comparison of the morphology of *Mammillaria scoria* and close species included in the analyses. Rows represent species: *M. crinita* (A–D); *M. duwei* (E–H); *M. nana* (I–L); *M. painteri* (M–P). *M. scoria*. (Q-T). *M. tezontle* (U–X). Columns represent characters: Stem and root morphology (col. 1); areole and spines morphology (col. 2); plants in habitat (col. 3); SEM pictures of seeds (col. 4).

Figura 2. Comparativa de la morfología de *Mammillaria scoria* y especies cercanas incluidas en el análisis. Las filas representan especies: *M. crinita* (A–D); *M. duwei* (E–H); *M. nana* (I–L); *M. painteri* (M–P). *M. scoria*. (Q-T). *M. tezontle* (U–X). Las columnas representan caracteres: Morfología del tallo y raíz (col. 1); morfología de la areola y espinas (col. 2); plantas en hábitat (col. 3); imágenes de MEB de las semillas (col. 4).

Núm. 60: 1-13 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Taxonomic treatment

Mammillaria scoria Gonz.-Zam., D.Aquino & Dan.Sánchez sp. nov. (Fig. 3). Type: Mexico. Querétaro: Mpio. Colón, 1974 m.s.n.m, 22 November 2021, P. González-Zamora 56 (holotype MEXU, isotype IBUG).

Paratype: Mexico. Querétaro: Mpio. Colón, 1950 m.s.n.m., 30 June 2022, *D. Aquino et al. 527* (MEXU).

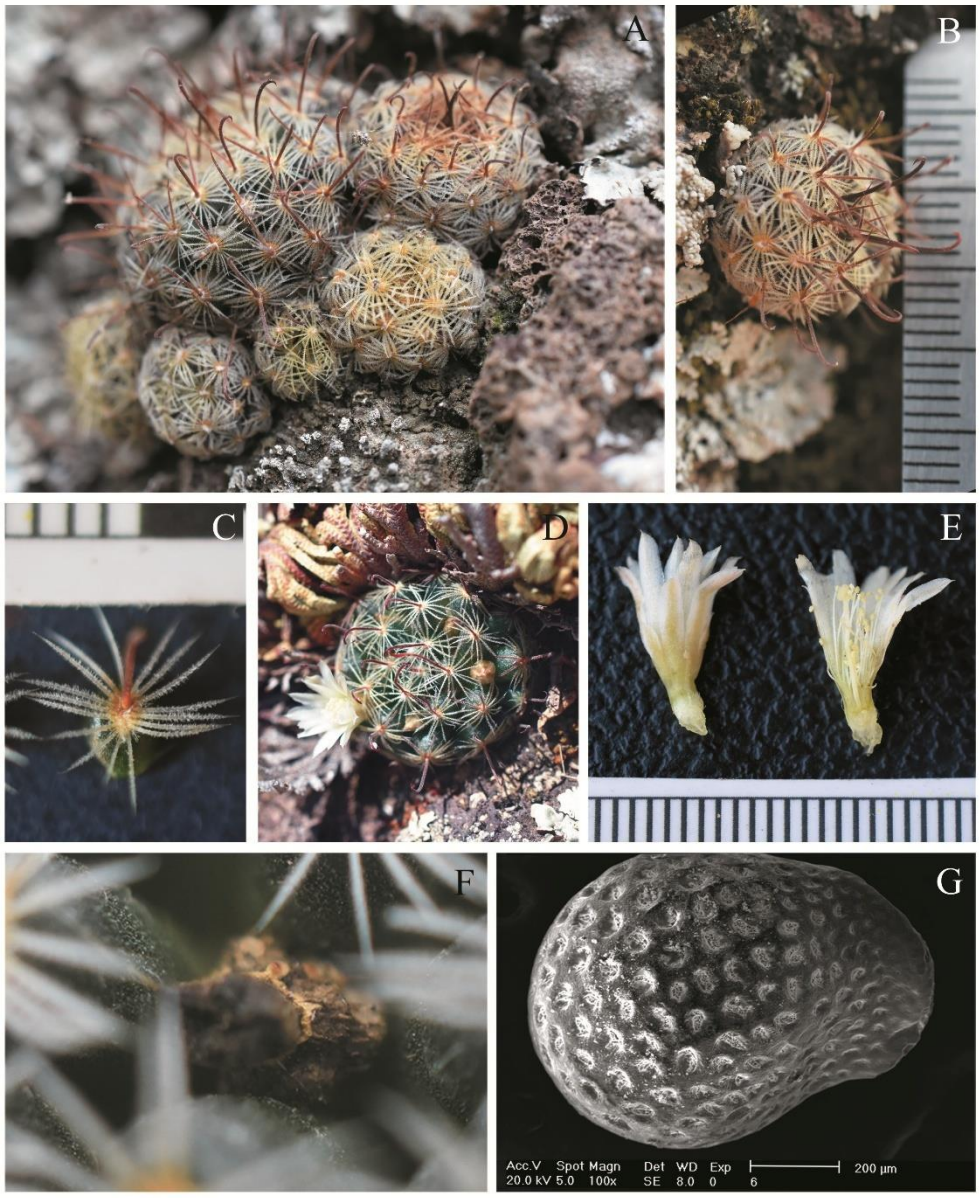


Figure 3. *Mammillaria scoria*. A: adult plant and aggregated juvenile plants; B: detailed size and growth form and size; C: areole shape and spine morphology; D: plant bearing flowers; E: close-up of flower morphology; F: dried fruit inserted between tubercles; G: Seed micromorphology.

Figura 3. *Mammillaria scoria*. A: planta adulta y plantas juveniles agregadas; C: detalle del tamaño y forma de crecimiento; C: morfología de la areola y las espinas; D: planta con flores; E: acercamiento a la morfología de la flor, F: fruto seco inserto entre los tubérculos, G: micromorfología de la semilla.

Diagnosis: *Mammillaria scoria* is distinguished by having, on average, 1.7 [(0)1–2(3)] central spines and 18.86 [(13)17–21(24)] radial spines (Table 3; Figs. 2–3). It possesses fibrous roots, lacks axile bristles, and produces non-arillate seeds (Figs. 2–3). The new taxon differs from *M. duwei* (Figs. 2E–2H) and *M. nana* (2I–2L), which have thickened roots and bristles in the axile. On average, *M. scoria* has fewer central spines (1.7) compared to *M. crinita* (3.65) and *M. painteri* (3.57) (Fig. 2; Table 3). In contrast, *Mammillaria tezontle* is characterized by its circular areoles (Fig. 2V) and arillate seeds (Fig. 2X), features absent in *M. scoria* (Figs. 2R, 2T).

Description: Stem solitary, sometimes aggregate, dark green, globose, 13–24.2 mm length, 12.9–22.2 mm width, latex watery, roots fibrous, tubercles 7–9 mm length, 4–5 mm width at the base, axiles bristle–less, areoles (0.6)0.8–0.96(1.15) mm length, (0.3)0.5–0.6(1.1) mm width, oval, central spines (0)1–2(3), at least 1 uncinate, (2)4–6(7) mm length, reddish or yellow, pubescents; radial spines (13)17–21(24), (2)2.3–3(3.5) mm length, white to yellowish, acicular, pubescents. Flowers infundibuliform, 12–15 mm length, external tepals ca. 8 mm length, yellow with a darker middle stripe, lanceolate; internal tepals ca. 10 mm length, yellow, lanceolate; filaments yellow to greenish, anthers yellow, style pale yellow, stigma yellow, 3-lobed. Fruit 5–10 mm length, globose to short claviform, red color when fresh, rapidly dry, marron, often inserted in the tubercles. Seeds black, non-arillated, testa pitted 0.9–1 mm diameter.

Phenology: *Mammillaria scoria* blooms from June to July, followed by the development of globose fruits from August to September. We observed that plants in the field form globose fruits, which dehydrate and remain inserted between tubercules during the dry season (Fig. 3F). In cultivation, fruits can turn to short claviform and slightly emerge from tubercules.

Etymology: The specific epithet refers to the substrate where the new taxon grows. In geology, scoria is a general term for pyroclasts with predominantly spherical, closed vesicles (Mangan & Cashman, 1996).

Distribution and habitat: *Mammillaria scoria* is endemic to central Querétaro, Mexico. This species inhabits xerophytic scrub (Rzedowski, 1978), and grows on basic extrusive igneous rock at the northern slope face (Fig. 3A, 3B). Common elements in vegetation are *Bursera fagaroides* (Kunt) Engl., *Schinus molle* L., *Cissus verticillata* (L.) Nicolson & C. E. Jarvis, *Myrtillocactus geometrizans* (Mart. ex Pfeiff.) Console, and *Opuntia streptacantha* Lem.

Conservation status: *Mammillaria scoria* is only known from the type locality. The population, consisting of 120 adult and 200 juvenile plants, highlights the limited distribution and vulnerability of the species. It occupy an area of ca 0.20 km^2. EOO resulted in 0.29 km^2 and AOO de 0.087 km^2. Following the criteria and categories of the IUCN Red List, we propose *Mammillaria scoria* as Critically Endangered (IUCN, 2024). (Fitz-Maurice, W.A. & Fitz-Maurice, B., 1997) suggest that there exists a continuous reduction of individuals of *M. tezontle* due to competition and superficiality of the substrate. Also, the change in land use for extracting build material has reduced the number of individuals to less than 10 adult plants of *M. tezontle* (pers. obs.). The same factors could occur in the location of *M. scoria*, hence we call to regional authorities to promote the conservation of this species.

Taxonomic notes: *Mammillaria scoria* can be accepted as an independent taxon by a unique combination of characters. The number and length of spines, as well as the absence of thickened root, axile bristles, and arillate seed are constant characters along the development in both habitat and cultivation plants (Figs. 2–3). We suggest the inclusion of *M. scoria* in *M.* ser. *Stylothelae*, based on the morphological evidence presented in this work. A phylogenetic analysis could confirm its inclusion in the series, but also, the close relationship with *M. nana* or *M. tezontle*. However, we proposed that the globose "dwarf" growth form shared with *M. tezontle* is resulted of parallelism, due to adaptation to scoria rocks (Figs. 2S, 2W). Interestingly, (Pilbeam, 1999) reported the presence of *M. nana* in El Marqués, Querétaro. Likely, this record was confused with

the new species, since they shared the oblong areoles and the color and indument of central and radial spines.
Finally, we present an identification key for *Mammillaria scoria* and close species of *Mammillaria* ser. *Stylothelae* with yellow stamens and pubescent spines.

1. Central spines >5 ……. Other species in the series (see González-Zamora *et al.* 2022)
1. Central spines <5 …… 2
2. Axiles bearing bristles ……..…...…… 3
3. Radial spines (16)18–23(25), central spines (2)3–4 ……. *M. crinita*
3. Radial spines (22)25–30(34), central spines 0–1(2) 4
4. Central spines 0–1(2), white to yellow …… *M. duwei*
4. Central spines (0)1(2), reddish …… *M. nana*
2. Axiles non–bearing bristles …… 5
5. Seed with aril ……...……. *M. tezontle*
5. Seed without aril ……...……... 6
6. Circular areoles ……..……...……. *M. painteri*
6. Oblong areoles ……..……... *M. scoria*

Additional specimens examined: *Mammillaria crinita* DC. Mexico. Hidalgo: Mpio. Tecozautla, south shore of Presa Zimapán, 1568 m elev., 28 March 1995, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2372* (MEXU); east shore of Presa Zimapán, 1609 m elev., 17 July 1995, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2379* (MEXU). Mpio. Zimapán, Cerro cercano al cementerio del poblado de Tenguedho, a 2.7 km al este del libramiento de Zimapán, 2017 m elev., 18 October 2015, *E. Asturiano et al. 92* (MEXU); east of Aguas Blancas, 1908 m elev., 12 December 1994, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2346* (MEXU). Guanajuato: Mpio. Atarjea, aproximadamente 5 a 6 km sobre la terracería Aldama – Atarjea, 2216 m elev., 19 June 2014, *S. Arias & D. Aquino 2225* (MEXU); +/- 9 km de Xichú, por la brecha a Atarjea, 1249 m elev., 30 May 1996, *E. Pérez-Calix & S. Zamudio 3340-A* (IEB). Mpio. Victoria, ca. 2 km al N de Puerto de Palmas, sobre camino a Álamos de Martínez, 1634 m elev., 17 November 1995, *R. T. Bárcenas et al. 817* (MEXU), near La Laguna, 1300 m elev., 20 March 1996, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2391* (MEXU), South of Las Higueras, 1900 m elev., 04 November 1996, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2397* (MEXU). Querétaro: Mpio. Cadereyta de Montes, este de Tolimán, 2159 m elev., 03 September 2022, *D. Aquino & P. González-Zamora 540* (MEXU); Mesa León, 1900 m elev., 26 October 1997, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2402* (MEXU); Barranca del Sordo, 2048 m elev., 01 September 2004, *E. Sánchez et al. 76* (MEXU); El Palmito, 2064 m elev., 27 October 2004, *E. Sánchez 92* (MEXU); San Pablo Toliman – Higuerillas, 1948 m elev., 08 February 2002, *E. Sánchez 122* (MEXU). Mpio. Colón, N de Colón, 1898 m elev., 03 September 2022, *D. Aquino & P. González-Zamora 539* (MEXU); north of Colón, 1900 m elev., 18 October 1991, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2182* (MEXU); 2.6 km al OSO de San Martín, 2025 m elev., 20 May 2014, *O. Rubio 876* (IEB). Mpio. Peñamiller, near Molinitos, 1900 m elev., 21 December 1994, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2384* (MEXU). Mpio. Tolimán, km 48 South of Tolimán, 2100 m elev., 01 March 1992, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2187* (MEXU, DES), South of Camarco [Camargo], 1500 m elev., 10 March 1995, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2370* (MEXU), Panales, 1766 m elev., 19 November 1986, *U. Guzmán 685* (ANSM), km 49.3 de la carretera Bernal – Toliman, 1950 m elev., 25 April 2013, *O. Rubio 523* (QMEX), laderas de rocas ígneas cercanas a Tolimán, Querétaro, 1634 m elev., 27 November 1973, *H. Sánchez-Mejorada 2193* (MEXU).
Mammillaria duwei Rogoz. & P. J. Braun. Mexico. Guanajuato: Mpio. San Luis de la Paz, entre San Luis de la Paz y sitio La Luz, 2023 m elev., 28 February 1987, *L. Scheinvar 4816* (MEXU). Mpio. Victoria, east of San Luís de la Paz, 1850 m elev., 17 March 1987, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1641* (MEXU, DES); cerro al NE del Rancho La Luz, a 19 km al E de San Luís

de la Paz por camino a Xichú, 2053 m elev., 01 June 1993, *H. Hernández & R. Bárcenas 2541* (MEXU).
Mammillaria nana Backeb. Mexico. Guanajuato: Mpio. San Diego de la Unión, brecha a Vergel de Guadalupe, 2115 m elev., 09 December 2015, *S. Arias & D. Aquino 2255* (MEXU); north of San Luís de la Paz, 2094 m elev., 27 January 1990, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1988* (MEXU); microondas west of km 113, carretera 57, 2054 m elev., 27 January 1990, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1989* (MEXU); west of El Vergel de Guadalupe, 2171 m elev., 27 March 1995, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2371* (MEXU). Mpio. San Miguel de Allende, 1.5 km N del cruce del libramiento Dolores Hidalgo y camino a la estación de ferrocarril de San Miguel de Allende, 1920 m elev., 16 August 1992, *R. T. Bárcenas 08* (MEXU). San Luis Potosí: Mpio. Santa María del Río, carretera a Lourdes, 1814 m elev., 02 September 2022, *D. Aquino & P. González-Zamora 533* (MEXU); Tepozán, 1890 m elev., 02 September 2022, *D. Aquino & P. González-Zamora 536* (MEXU); old road to Lourdes, 1700 m elev., 21 October 1989, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1980* (MEXU, DES); new road to Lourdes, 1800 m elev., 13 July 1991, *W. A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2144* (MEXU, DES). Mpio. Zaragoza, SE of Zaragoza, 1945 m elev., 29 October 1986, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1606* (MEXU); SW of Zaragoza, 1870 m elev., 29 October 1986, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1607* (MEXU); Cañón Yañez, 1900 m elev., 07 November 1986, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1609* (MEXU); K175 southeast of SLP, 1900 m elev., 07 November 1986, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1610* (MEXU).
Mammillaria painteri Rose. Mexico. Querétaro: Mpio. Amealco de Bonfil, Cañón Amealco, 1800 m elev., *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2028* (MEXU, DES); Barranca de Amealco, +/- 10 km al S de Galindo, 1987 m elev., 23 March 1998, *S. Zamudio & L. Hernández 10682* (MEXU, IEB). Mpio. Cadereyta de Montes, al SE de Cadereyta de Montes, 2090 m elev., 13 October 2010, *U. Guzmán 3746* (IEB). Mpio. El Marqués, east of La Cañada, 1955 m elev., 02 March 1992, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2188* (DES); La Cañada, 1955 m elev., 06 May 1987, *L. Scheinvar 5051* (MEXU). Mpio. San Juan del Río, 12 km east of San Juan del Río, 1900 m elev., 01 May 1987, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1646* (MEXU, DES). Mpio. Tequisquiapan, Al suroeste de la Trinidad, en el camino a la mina, 2089 m elev., 07 July 2004, *E. Sánchez 70* (MEXU); La Trinidad, 2082 m elev., *E. Sánchez et al. 192* (MEXU).
Mammillaria tezontle W.A.Fitz Maur. & B.Fitz Maur. Mexico. San Luis Potosí: Mpio. Soledad de Graciano Sánchez, km 32.5 # 57 northeast of SLP, 1900 m elev., 25 October 1989, *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 1983* (MEXU); [ca.] Villa Hidalgo, 1900 m elev., *W.A. Fitz Maurice & B. Fitz Maurice 2015* (MEXU).

DISCUSSION

Multivariate analysis revealed significant differences between *Mammillaria scoria* and comparative taxa. The new taxon presents on average 1.7 central spines (0.425 mm in length) and 18.86 radial spines (Table 3). Additionally, *M. scoria* lacks thickened roots, axile bristles, and arillate seed (Figs. 2Q–2T; see Diagnosis). This set of characters have proven useful in delineating species within *M.* ser. *Stylothelae* (González-Zamora *et al.*, 2022; González-Zamora *et al.*, 2023; Ortiz-Brunel *et al.*, 2023). *Mammillaria scoria* grows on extrusive basic igneous rock (CETENAL, 1973a) (Fig. 2S), similar to *M. tezontle*, which inhabits basalt igneous rock (CETENAL, 1973b) (Fig. 2W). However, the two species are separated by 206 km, and *M. tezontle* is distinguished by its arillate seeds (Fig. 2X). Although phenotypic plasticity could be invocated to explain the morphological variation found in *M. scoria*, plants in cultivation have developed the same morphology as plants in their habitat. They consistently lack thickened roots (Fig. 2Q) and spine length remains within the same range (Fig. 2R). We also observed this consistency of morphological characters in *M. tezontle* (Figs. 2U–2V) as previously reported (Fitz-Maurice & Fitz-Maurice, 2009).
As noted in previous work (González-Zamora *et al.*, 2022), the broad concept of *M. crinita* (Fitz-Maurice & Fitz-Maurice, 2009) is not supported. Recent phylogenomic analyses demonstrated

that different samples of *M. crinita* did not form a monophyletic group (Ortiz-Brunel, 2025). Morphological analyses confirmed *Mammillaria scoria* as a diagnosable entity.

CONCLUSION

Based on these findings, we propose and describe a new species of *M*. ser. *Stylothelae* from Querétaro, Mexico, highlighting its unique morphological and ecological traits.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors thank to the staff of DES, IBUG, and MEXU. We are grateful to Dr. Alfredo Flores Valdés and Miguel Aguilar González of the CINVESTAV Unidad Saltillo for MEB pictures of seeds. We appreciate the comments and suggestion of the editor and anonymous reviewers.

LITERATURE CITED

Aquino-García, D. (2014). *Delimitación de las especies de Mammillaria serie Polyedrae (Cactaceae).* Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

Arias, S., Aquino, D. (2019). FAMILIA CACTACEAE I. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes*.

Bachman, S., Moat, J., Hill, A. W., Torre, J. de, & Scott, B. (2011). Supporting Red List threat assessments with GeoCAT: geospatial conservation assessment tool. *ZooKeys*. (150), 117–126.

Breslin, P. B., Wojciechowski, M. F., & Majure, L. C. (2021). Molecular phylogeny of the Mammilloid clade (Cactaceae) resolves the monophyly of *Mammillaria*. *TAXON, 70*(2), 308–323.

Cervantes, C. R., Hinojosa-Alvarez, S., Wegier, A., Rosas, U., & Arias, S. (2021). Evaluating the monophyly of *Mammillaria* series *Supertextae* (Cactaceae). *PhytoKeys, 177*, 25–42.

CETENAL (1973a). Hoja Villa del Marqués (F-14-C-66), Querétaro. *Secretaría de Programación y Presupuesto. Comisión de Estudios del Territorio Nacional (actualmente INEGI)*, Escala 1:50000.

CETENAL (1973b). Hoja Villa Hidalgo (F-14-A-74), San Luis Potosí. *Secretaría de Programación y Presupuesto. Comisión de Estudios del Territorio Nacional (actualmente INEGI)*, Escala 1:50000.

Chincoya, D. A., Arias, S., Vaca-Paniagua, F., Dávila, P., & Solórzano, S. (2023). Phylogenomics and Biogeography of the Mammilloid Clade Revealed an Intricate Evolutionary History Arose in the Mexican Plateau. *Biology, 12*(4), 512.

Fitz-Maurice, W.A. & Fitz-Maurice, B. (1997). Fieldnotes – *Mammillaria tezontle* – a long-term study. *Cactus and Succulent Journal, 64*(4), 190–194.

Fitz-Maurice, W.A., & Fitz-Maurice, B. (1995). *Mammillaria tezontle* sp. nov. *Cactáceas y Suculentas Mexicanas, 40*(3), 59–62.

Fitz-Maurice, W.A., & Fitz-Maurice, B. (2009). *Stylothelae* Dilemmas, Old and New. *Cactus and Succulent Journal, 81*(4), 210–213.

González-Zamora, P., Aquino, D., Mohl, J., Sánchez, D. (2022). A new endemic species of *Mammillaria* (Cactaceae) from San Luis Potosí, Mexico. *Willdenowia, 52*(3), 359-372.

González-Zamora, P., Aquino, D., Rodríguez, A., Sánchez, D. (2023). *Mammillaria monochrysacantha* (Cactaceae), a new endemic species from Guanajuato, Mexico. *Phytotaxa, 618*(3), 243–253.

Recibido:
6/marzo/2025

Aceptado:
12/junio/2025

Hammer, O., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia electrónica, 4*(1), 1–9, from https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

Hernández, H. M., & Gómez-Hinostrosa, C. (2015). *Mapping the cacti of Mexico. Part II: Mammillaria.* Milborne Port, UK: dh Books.

Hunt, D. R., Taylor, N. P., & Charles, G (2006). *The New Cactus Lexicon, text, and atlas.* Milborne Port, UK: dh Books.

IUCN (2024). *Guidelines for using the International Union for Conservation of Nature Red List categories and criteria: Ver. 15.1,* from https://www.iucnredlist.org/resources/redlistguidelines.

Korotkova, N., Aquino, D., Arias, S., Eggli, U., Franck, A., Gómez-Hinostrosa, C., et al. (2021). Cactaceae at Caryophyllales.org – a dynamic online species-level taxonomic backbone for the family. *Willdenowia, 51*(2), 251-270.

Lüthy, J. M. (1995). *Taxonomische Untersuchung der Gattung Mammillaria Haw.* Ph.D. Dissertation, Universität Bern.

Mangan, M. T., & Cashman, K. V. (1996). The structure of basaltic scoria and reticulite and inferences for vesiculation, foam formation, and fragmentation in lava fountains. *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 73*(1-2), 1–18.

Ortiz-Brunel, J. P. (2025). *Evolución y biogeografía de Mammillaria serie Stylothelae (Cactaceae).* PhD dissertation, Universidad de Guadalajara.

Ortiz-Brunel, J. P., Carrillo-Reyes, P., Sánchez, D., Ruíz-Sánchez, E., & Rodríguez, A. (2023). A morphological analysis of the *Mammillaria fittkaui* species complex (Cactaceae) reveals a new species from Jalisco, México. *Botanical Sciences, 101*(2), 619–631.

Pilbeam, J. (1999). *Mammillaria. The cactus handbook 6.* Southampton, UK: Cirio Publishing Services.

Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México.* Mexico: Editorial Limusa.

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods, 9*(7), 671–675.

Tabachnick, B. G., & Fidell, L. S. (2012). *Using multivariate statistics: (6th ed.).* Boston, US: My Publisher.

Thiers, B. M. (2024+). *Index Herbariorum: A global directory of public herbaria and associated staff.*

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

REVISIÓN DEL GÉNERO *Karwinskia* (Rhamnaceae) EN MEXICO

REVIEW OF THE *Karwinskia* GENUS (Rhamnaceae) IN MEXICO

Fernández Nava, R., M.L. Arreguín Sánchez

REVISIÓN DEL GÉNERO *Karwinskia* (Rhamnaceae) EN MEXICO
REVIEW OF THE *Karwinskia* GENUS (Rhamnaceae) IN MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 15-38 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.2

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Revisión del género *Karwinskia* (Rhamnaceae) en México

Review of the *Karwinskia* genus (Rhamnaceae) in Mexico

Rafael Fernández Nava / rfernan@ipn.mx
https://orcid.org/0000-0001-5636-7109
María de la Luz Arreguín Sánchez
Departamento de Botánica
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas
Instituto Politécnico Nacional

Fernández Nava, R., M.L. Arreguín Sánchez

REVISIÓN DEL GÉNERO *Karwinskia* (Rhamnaceae) EN MEXICO

REVIEW OF THE *Karwinskia* GENUS (Rhamnaceae) IN MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 15-38. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.2

RESUMEN Se presenta una revisión taxonómica detallada del género *Karwinskia* Zucc. (Rhamnaceae), un grupo de arbustos nativos de América cuyo centro de diversidad se encuentra en México. A pesar de su relevancia ecológica y económica, las especies de *Karwinskia* han recibido poca atención en estudios taxonómicos. En este trabajo se describen 11 especies para México: *K. calderoni, K. humboldtiana, K. johnstonii, K. latifolia, K. mollis, K. parvifolia, K. rzedowskii, K. subcordata, K. umbellata, K. tehuacana y K. venturae*, siendo *K. humboldtiana* la de mayor distribución. La identificación de las especies se realizó mediante una combinación de características morfológicas y ecológicas. Este trabajo incluye una clave dicotómica y descripciones actualizadas de las especies presentes en México.
Palabras clave: taxonomía, diversidad, clave dicotómica, descripciones morfológicas, especies mexicanas.

ABSTRACT: A detailed taxonomic review of the genus *Karwinskia* Zucc. (Rhamnaceae) is presented, a group of shrubs native to the Americas with Mexico as its center of diversity. Despite their ecological and economic importance, *Karwinskia* species have received little attention in taxonomic studies. In this paper, 11 species are described for Mexico.: *K. calderoni, K. humboldtiana, K. johnstonii, K. latifolia, K. mollis, K. parvifolia, K. rzedowskii, K. subcordata, K. umbellata, K. tehuacana, and K. venturae*, with *K. humboldtiana* being the most widely distributed. Species identification was based on a combination of morphological and ecological characteristics. This study includes a dichotomous key and updated descriptions of the species found in Mexico.
Key words: taxonomy, diversity, dichotomous key, morphological descriptions, Mexican species.

INTRODUCCIÓN

El género *Karwinskia* fue descrito por Joseph Gerhard Zuccarini y publicado en Abh. Math.-Phys. Cl. Königl. Bayer. Akad. Wiss. (1: 349–353, pl. 16) en 1832. La especie tipo es *Karwinskia glandulosa* Zucc. Este género comprende aproximadamente 20 especies, principalmente de hábito arbustivo, aunque en raras ocasiones presentan porte arbóreo. Su distribución abarca desde el norte de México hasta Centroamérica, incluyendo las Antillas y Florida (Fernández 1992).

Entre los trabajos florísticos en los que se ha revisado este género destacan los realizados por Standley (1923), Wiggins (1964, 1980) y Martínez, (1979). En cuanto a estudios taxonómicos sobre la familia Rhamnaceae en México, sobresalen las contribuciones de Fernández (1986, 1996).

Hasta la fecha, los estudios del género en México se han centrado principalmente en aspectos florísticos, ecológicos y de distribución geográfica de las especies (Fernández

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

1992); el objetivo de este trabajo es realizar una revisión taxonómica detallada del género *Karwinskia* (Rhamnaceae) en México, mediante el análisis de características morfológicas y ecológicas, con el fin de actualizar la clasificación de sus especies, facilitar su identificación a través de una clave dicotómica y contribuir al conocimiento de su diversidad y distribución en el país.

MATERIALES Y METODOS

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva con el objetivo de recopilar información relevante sobre la familia Rhamnaceae, (Brongniart 1826), (Suessenguth 1953), (Brizicky 1964), Richardson *et al.* (2000). En el caso del género *Karwinskia*, se consultaron trabajos de Fernández (1988) y Johnston (1966). Asimismo, se revisaron estudios florísticos que mencionan al género. Para estudios taxonómicos de la familia Rhamnaceae en México, se consideraron las investigaciones de Fernández (1986, 1996). Respecto a los nombres comunes y usos del género *Karwinskia*, se revisaron las publicaciones de Martínez (1973).
Se realizó también un análisis detallado de especímenes de herbario, revisando aproximadamente 500 ejemplares depositados en herbarios nacionales (ANSM, CHAPA, ENCB, IBUG, IEB, INIF, MEXU, XAL) y extranjeros (A, BM, CAS, F, GH, K, LL, MICH, MO, NY, P, S, TEX, UC, US, WIS) siguiendo los estándares de Holmgren *et. al* (1990).
Además, se efectuaron visitas de campo para observar poblaciones naturales de *Karwinskia*. Durante estas expediciones, se registraron datos ecológicos como altitud, tipos de vegetación en los que prosperan las poblaciones, nombres comunes, usos locales y la distribución geográfica de las especies. Esta información fue obtenida a partir de observaciones directas y de entrevistas con pobladores locales.

RESULTADOS

Actualmente, se reconocen 11 especies de *Karwinskia* en México, para las cuales se usan veintidós nombres comunes. Se encontraron distintos tipos de usos para las especies: medicinal 1 especie), leña 2 especies) y ornamental 1 especie).

KARWINSKIA Zucc., Abh. Math.-Phys. Cl. Königl. Bayer. Akad. Wiss. 1: 349–353, pl. 16. 1832.
Decorima (Cav.) Raf., Sylva Tellur. 31. 1838.
Especie tipo: *K. humboldtiana* (Roem. & Schult.) Zucc.
Árboles o arbustos, inermes. Hojas opuestas o subopuestas usualmente pelúcido-glandulosas, el margen entero, crenado u ondulado, nerviación pinnada; pecioladas; estípulas pequeñas, deciduas. Inflorescencias de cimas axilares o las flores solitarias, pedúnculo corto o ausente; flores hermafroditas, verdosas, pequeñas; cáliz 5-lobado, los lóbulos triangulares y agudos; pétalos, cortamente unguiculados, cuculados; estambres más largos que los pétalos, los filamentos subulados; disco verdoso, delgado; ovario súpero, subgloboso, 2-3 locular; óvulos 2 por lóculo, estilo 2-3 lobado en el ápice, estigmas obtusos y papilosos. Fruto drupáceo, subgloboso u ovoide, apiculado, rodeado en la base por el cáliz, con un pireno conteniendo 2-3 semillas; erectas, obovoides, con la testa membranosa, endospermo escaso, carnoso, cotiledones de forma elíptica, radícula muy corta.

CLAVE PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS ESPECIES MEXICANAS DE *KARWINSKIA*

1 Pubescencia presente en envés de las hojas maduras, pedúnculos florales y sépalos.

2 Hojas de menos de 4 cm de largo, pecíolos de 1-2 mm de largo, margen por lo común crenado, envésgrisáceo; inflorescencia usualmente reducida a una sola flor. Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León,
Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas ……..…… ***K. mollis***

2 Hojas de más de 4 cm de largo, pecíolos mayores de 2 mm de largo, margen entero, envés no grisáceo; inflorescencia usualmente con 4 o más flores.

3 Inflorescencias con 6-8 flores, pedúnculos florales de 2-7 mm de largo; fruto de8-10 mm de largo; semillas blanco-amarillentas, lisas, de 4.5-5 mm de largo. Durango, Jalisco,
Zacatecas ……..… ***K. rzedowskii***

3 Inflorescencias con 4-5 flores, pedúnculos florales de 1-2 mm de largo; fruto de5-7 mm de largo; semillas café-oscuras con pequeñas papilas negras sobre la superficie, de 3-4 mm de largo. Estado de México, Guerrero ……. ***K. venturae***

l Pubescencia ausente en envés de las hojas maduras, pedúnculos florales y sépalos. 4 Hojas claramente cordadas en la base.

5 Hojas pecioladas, de 3-4 cm de largo, de 1-3 cm de ancho; textura membranosa y venas transversales poco prominentes; ..... cimas con 2-4 flores, pedúnculo floral de 1-2 mm de largo: floración de mayo a julio. Michoacán, Guerrero …….. ***K. johnstonii***

5 Hojas sésiles, de 4-8 cm de largo, de 3-6 cm de ancho; textura coriácea y venas transversales muy prominentes; cimas con 6-8 flores, pedúnculo floral de 5-7 mm de largo; floración de febrero a abril. Morelos, Puebla, Guerrero .....***K. umbellata***

4 Hojas redondeadas u obtusas en la base, no claramente cordadas.

6 Hojas hasta de 2.5 cm de largo y de 1-2 cm de ancho; sépalos y pétalos de 0.5-1 mm de largo; frutosde 3-5 mm de diámetro.

7 Margen de las hojas crenado, con pequeñas manchas negras; estípulas deltoides de ca. 1 mm de largo; pedicelos en el fruto de 4-5 mm de largo; Sonora, Sinaloa, plantas del bosque tropical Caducifolio ……..… ***K. parvifolia***

7 Margen de las hojas ondulado, sin pequeñas manchas negras; estípulas subuladas de 2.5-3 mm de largo; pedicelos en el fruto de 8-10 mm de largo; plantas del matorral xerófilo. Hidalgo, Querétaro ……. ***K. subcordata***

6. Hojas mayores de 2.5 cm de largo y de más de 2 cm de ancho; sépalos y pétalos de más de 1 mm de largo; frutos de más de 5 mm de diámetro.

8 Pecíolos de 1-3 cm de largo; hojas usualmente de 3.5-5 cm de ancho, ápice redondeado. Aguascalientes, Jalisco, Nayarit, Sinaloa, Zacatecas …… ***K. latifolia***

8 Pecíolos de menos de 1 cm de largo; hojas usualmente de 2-3 cm de ancho, ápice obtuso oacuminado.

9 Hojas con el ápice acuminado; pedúnculos florales usualmente bifurcados. Guerrero, Oaxaca, Chiapas ……. ***K. calderoni***

9 Hojas con el ápice obtuso; pedúnculos florales no bifurcados.

10 Hojas de color verde limón, nervaduras del envés muy resaltadas; fruto de 10-12 mm de diámetro,Puebla ……... ***K. tehuacana***

10 Hojas color distinto al verde limón, nervaduras del envés poco resaltadas; fruto de 6-9 mm dediámetro, de amplia distribución geográfica..... …..***K. humboldtiana***

KARWINSKIA CALDERONII Standl., J. Wash. Acad. Sci. 13: 352. 1923. Tipo. El Salvador. Aculhuaca.Jul. 1922. *Calderón 900* (Holotipo: US; isotipo GH!). Figura 1.

Nombres comunes. Pimiento (México); guiliguiste, huilihuiste (El Salvador); pimientillo (Honduras).

Arbusto o árbol de 2 a 7 m de alto; ramas maduras glabras. Hojas opuestas, láminas oblongo-lanceoladas u oblongo-ovadas, de 3.5-10 cm de largo, de 2-3 cm de ancho, haz verde, glabro, envés máspálido, glabro, margen entero o crenado, ápice fuertemente acuminado, la base redondeada, pecíolosusualmente de menos de 1 cm de largo. Inflorescencias a manera de cimas axilares con 6-10 flores, pedúnculos a veces de 6 mm de largo pero usualmente más cortos y frecuentemte bifurcados, pedicelosde 1.5-4 mm de largo; copa floral campanulada o subcampanulada de 2-3 mm de largo; sépalos verde-amarillentos, triangulares, de 1.8-2 mm de largo, de 1.2-1.5 mm de ancho, glabros; pétalos blanco- amarillentos, unguiculados, 1.3-1.5 mm de largo, de 0.8-1 mm de ancho, membranosos; estambres envueltos parcialmente por los pétalos, anteras café-amarillentas, de 0.8-1 mm de largo. Fruto verde enla juventud, negro en la madurez, esferoide de 6-7 mm de largo, lustroso.

Distribución. México (Guerrero, Oaxaca, Chiapas). También se distribuye en El Salvador, Nicaragua y Honduras. Figura 2.

Ejemplares examinados. Chiapas: Col. Emiliano Zapata, mpio. Cintalapa, *Fernández 3526* (ENCB); Km 47 Tuxtla Gutiérrez-entronque Tapachula Arriaga, *García et al. 387* (CHAPA); Chicomuselo, *Matuda 4460* (A,MICH, US); Siltepec, *Matuda 5612* (LL, MICH); Concordia, *Matuda 5907* (LL); Finca Carmen, along the road Acala to Pugiltik, mpio. of Venustiano Carranza, *Shilom 3200* (LL); Ignacio Allende, Mpio, Chiapa deCorzo, *L. Soto* 1123 (CHAPA); **Guerrero:** Terreno frente a gasolinera Revolcadero, Puerto Marqués, *López-Forment 1422* (MEXU); Acapulco and vicinity, Palmer 127 (A, GH, MICH, NY). **Oaxaca:** North of Jayacatlan along road towards Nacaltepec, *Breedlove 35948* (LL); 10-15 Km northwest of the city of Tehuantepec, *Merrill 758* (ENCB, MICH).

Altitud. 50-17OO m. **Tipos de vegetación**: bosque tropical caducifolio, bosque de encino, bosque de pino.

Floración. Junio-agosto.

Usos. La madera de esta especie se caracteriza por ser muy dura, por lo que se usa para hacer varias herramientas, como mazos, ejes de rueda, uniones de vías de ferrocarril, etc. También es apreciada como combustible; las semillas son consideradas como tóxicas, produciendo parálisis de miembros superiores e inferiores al ser consumidos.

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figure 1. Ramas con hojas y frutos de *K. calderonii* Standl.
Figure 1. Branches with leaves and fruits of *K. calderonii* Standl.

K. calderonii está relacionada desde el punto de vista morfológico con *K. humboldtiana* pero es evidentemente distinta en las hojas acuminadas y en los pedúnculos florales frecuentemente bifurcados. Esta especie había sido citada únicamentepara Centroamérica. Encontrándose en la actualidad también en el estado de Chiapas y en algunas poblaciones de los estados de Guerrero y Oaxaca.

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

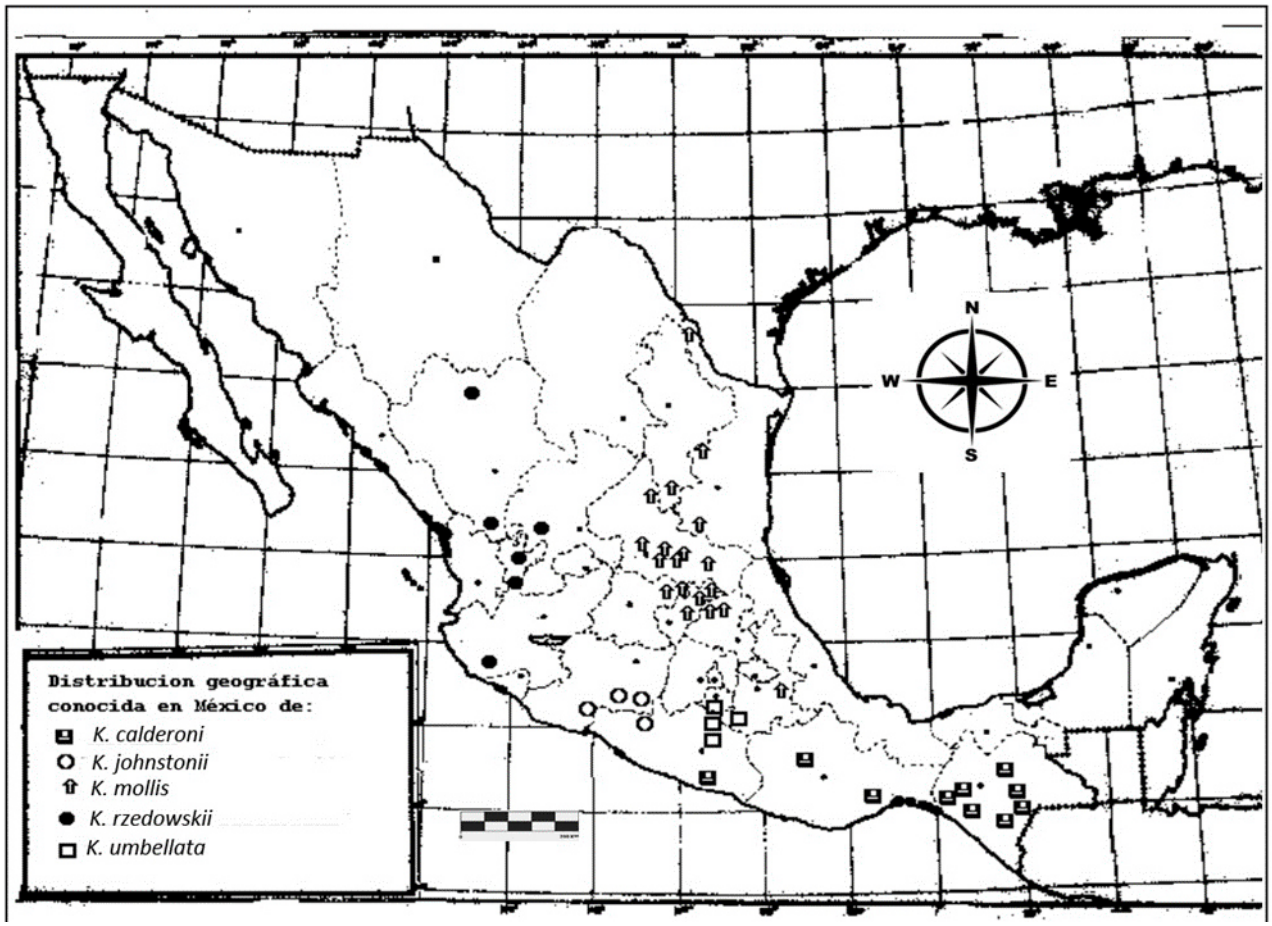


Figura 2. Distribución geográfica conocida en México de: *K. calderoni, K. johnstonii, K. mollis, K. rzedowskii* y *K. umbellata*.
Figure 2. Known geographic distribution in Mexico of: *K. calderoni, K. johnstonii, K. mollis, K. rzedowskii* and *K. umbellata*

KARWINSKIA HUMBOLDTIANA Abh. Math.-Phys. Cl. Königl. Bayer. Akad. Wiss. 1: 353 (1829-1830 publ. 1832). Fig 3.

Nombres comunes. Caracochilla, cachila (Baja California); capulincillo (Nuevo León, Querétaro y Oaxaca); saraguayo (Querétaro); coyotillo (Tamaulipas); tullidor (Coahuila y Tamaulipas); tullidora (Querétaro).

Arboles pequeños o arbustos, de 1-8 m de alto; tallos hasta de 20 cm de diámetro; ramas usualmente pulverulentas y pruinosas. Hojas opuestas, láminas oblongo-lanceoladas o elíptico-ovadas, de 2.5-7.5 cmde largo, de 2-3 cm de ancho, el haz verde, lustroso, glabro, el envés más pálido, glabro (en ocasionescuando las hojas están jóvenes se presenta una pubescencia escasa), con pequeñas manchas negras esparcidas a lo largo de las nervaduras principales, el margen entero o crenado, el ápice obtuso, la base redondeada; pecíolos delgados hasta de 1 cm de largo. Inflorescencias en cimas axilares, de pocas flores o estas solitarias, sésiles o cortamente pedunculadas; sépalos triangulares, de 1.2-1.8 mm de largo, 1-1.2 mm de ancho, glabros, con glándulas oscuras a lo largo del margen; pétalos blancos a amarillentos, de 1-
1.2 mm de largo, ca. 1 mm de ancho envolviendo parcialmente a los estambres; anteras de ca. 0.5 mm de largo. Fruto negro, lustroso, subgloboso, de 6-9 mm de diámetro; semillas 2-3, verdes a pardas o negras y lustrosas en madurez avanzada.

Distribución. Estados Unidos (parte oeste de Texas); México (Baja California Sur a Tamaulipas, Veracruz,Oaxaca, Chiapas y Yucatán). Figura 4.

Ejemplares examinados. **Baja California Sur:** Los Tejones, *J. M. Alcocer 12* (ENCB); **Campeche:** 3 Km al Sde Bolonchen de Rejón, cerca de las Grutas de Xtacumbilxunan, por la carretera vía ruinas a Campeche,
E. Cabrera & H. de Cabrera 11761 (ENCB, MEXU); Near Xpujil (18□ 10'N, 88□ 45'W), *J. D. Shepherd 82* (INIF); **Coahuila:** Rancho Los Apaches, Mpio. de Hidalgo, *C. Morales s.n.* (ENCB); **Chiapas:** Ejido Portal,Mpio. Frontera Comalapa, *J. I. Calzada et al. 3852* (ENCB); near Xpujil, *Shepherd 82* (WIS); canyon of Cienagas, Cuatro Cienagas, *White 1893* (GH); **Chihuahua:** Batopilas, Barranca La Bufa Quirare, *Bye 7739*(GH, MICH); La Bufa, SE of Creel, *I. Knobloch 426* (ENCB); road from creel to Batopilas; La Bufa Canyon,
W. A. Weber & R. Bye 8385 (INIF); **Guanajuato:** 2 Km al E de Empalme Escobedo, *R. Fernández N. 2543*(ENCB, INIF); **Guerrero:** Canyon of the Mano Negra, *Alexander & Hernández 2060* (NY): **Hidalgo:** 5 Km alE de Jonacapa, Mpio. de Alfajayucan, *R. Fernández N. 3709* (ENCB); **Jalisco:** El Saucillo, Mpio. Hostotipaquillo, *R. Fernández 3593 N.* (CHAPA, ENCB); **Michoacán:** A 25 Km al NW de Caleta de Campos,Carretera a Coahuayana, *J. C. Soto N. & R. Torres C. 2770* (ENCB, MEXU); **Nayarit:** Isla Ma. Magdalena, *J.*
C. Boyas D. s.n. (INIF); **Nuevo León:** Valley of Monterrey, *Pringle 1910* (A, MICH, NY); **Oaxaca:** 1.5 Km alSW del Límite entre Puebla y Oaxaca, Mpio. Santiago Chatumba, *R. Fernández N. 3204* (ENCB); **Puebla:**Al SW de Tehuacán, lomerios cerca de Zapotitlán de las Salinas, *J. Marroquín 813* (INIF); **Querétaro:** Palmillas, cerca de San Juan del Río, *R. Fernández N. 725* (ENCB); 1 km al S de San Javier, Mpio. Cadereyta, *R. Fernández N. 1599* (ENCB); 5 Km al NNW de Querétaro, sobre carr. a San Luis Potosí, *R. Fernández N. 2545* (ENCB); 8 km al N de Vizarrón, Mpio. Cadereyta, *R. Fernández N. 3285-A* (ENCB); SanJavier, Mpio. de Cadereyta, *R. Fernández N. 4653* (ENCB); **Quintana Roo:** Xel-ha, *Téllez & Cabrera 3008*(ENCB, MEXU, NY): **San Luis Potosi:** 1 Km al S de Ciudad Valles, *J. Rzedowski 10362* (ENCB); entre Joyita y Paso de Ordeña, Mpio. de Tierra Nueva, *J. Rzedowski 10721* (ENCB) 5 km al NNW de Tierra Nueva, *J. Rzedowski 10784* (ENCB, MEXU, NY, TEX); **Sinaloa:** 10 Km al S de la Concordia, Mpio. de la Concordia, *R.Hernández M. & P. Tenorio 7384* (ENCB, MEXU); **Sonora:** Sierra La Elenita, a 12 Km al este de Cananea, *R.Andrade s.n.* (INIF); between La Joya and Los Hornos, *Breedlove 16442* (MICH); **Tamaulipas:** Cañón deLa Peregrina Río San Felipe, *M. Yañez 00124* (ENCB); **Veracruz:** Plán del Río, Mpio. de Dos Ríos, *F. Ventura A. 2668* (ENCB); Palo Gacho, Mpio. de Dos Ríos, *F. Ventura A. 9257* (ENCB); La Ceiba, Mpio. dePuente Nacional, *F. Ventura A. 10716* (ENCB, INIF); **Yucatán:** Ruinas de Edzna, Mpio. Campeche, *J. S. Flores & C. Chan 8610* (ENCB); Progreso, *Gaumer & Sons 23319* (A, NY, US); km 28 Mérida road, *Lundell& Lundell 7992* (LL, MICH); Kabah, 50 m antes de llegar al Arco Triunfal, Mpio. Santa Elena, *A. Puch et al.649* (ENCB); J.B.R., Mpio. Mérida, *P. Simá 1216* (ENCB); Ruinas de Labná, 28 Km al SW de Oxkutzcab, Mpio. Oxkutzcab, *S. Xelhuantzi 5440* (ENCB); **Zacatecas:** 6 Km al SW de Coxpala, *J. C. Boyás D. s.n.* (INIF).

Altitud. Desde el nivel del mar hasta los 2200 m.

Tipos de vegetación. Bosque tropical perennifolio; bosque tropical caducifolio; bosque de encino; matorral xerófilo, pastizal.

Floración. Junio-septiembre.

Esta especie es la más importante del género en términos de área de distribución y en donde las poblaciones son más numerosas, siendo además la que ofrece mayor dificultad para delimitarse, ya quepresenta polimorfismo a nivel de hojas, flores y frutos. *Karwinskia humboldtiana* se encuentra prosperando en diferentes condiciones y zonas geográficas; en las regiones áridas del centro y norte deMéxico, estas poblaciones se ajustan muy bien a la descripción de la especie tipo; sin embargo, en el NWde México y Baja California Sur donde también prospera y por otro lado el SE de México, particularmente la Península de Yucatán, los individuos de esas poblaciones presentan ligeras variantescon respecto a las primeras poblaciones mencionadas, principalmente en cuanto a tamaño y forma de las hojas. Esnecesario realizar estudios biosistemáticos que nos permitan llegar a conclusiones más certeras sobreesta compleja especie.

Figura 3. Ramas con hojas y frutos de *K. humboldtiana* (Roem. & Schult.) Zucc.
Figure 3. Branches with leaves and fruits of *K. humboldtiana* (Roem. & Schult.) Zucc.

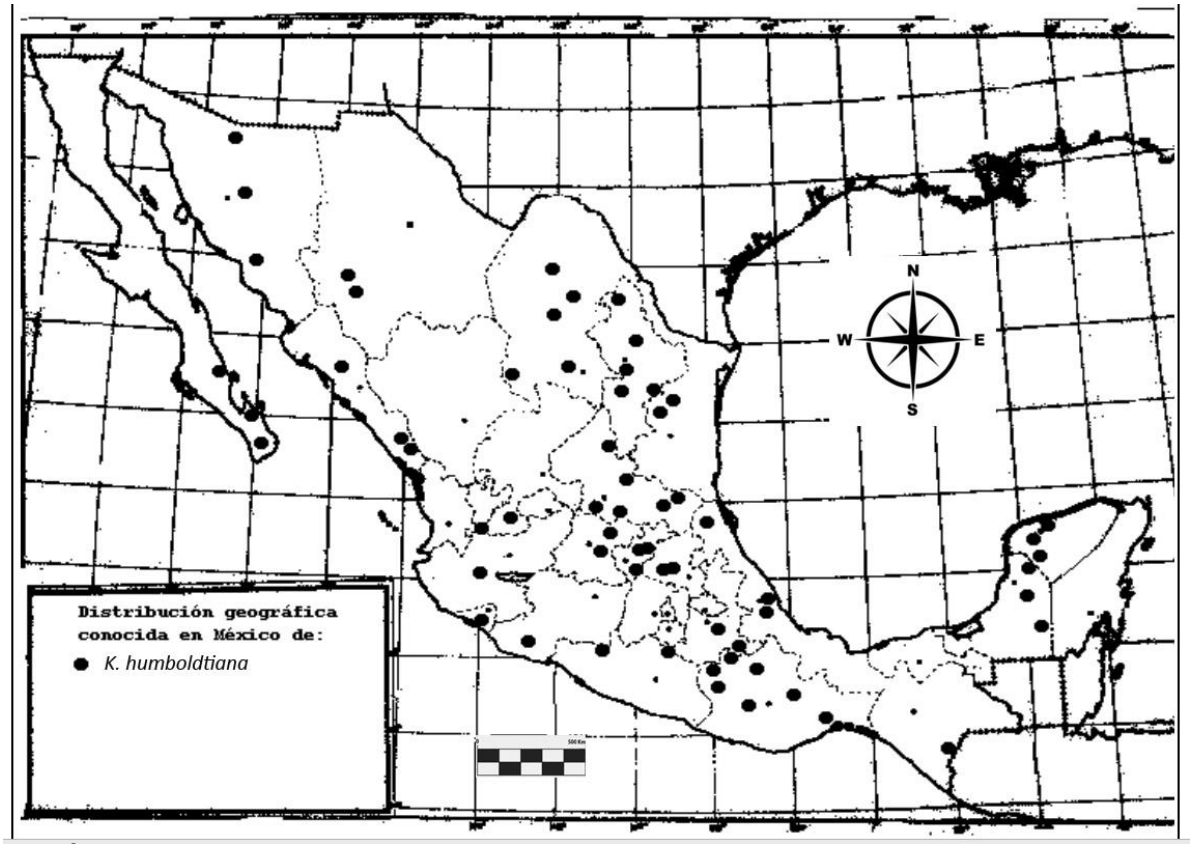


Figura 4. Distribución geográfica conocida en México de: *K. humboldtiana*
Figure 4. Known geographic distribution in Mexico of: *K. humboldtiana*

KARWINSKIA JOHNSTONII R. Fernández, Acta Bot. Mex. 2:18-20.1988. Tipo: México. Michoacán.11 km al W de Santiago Conguripio, Mpio. de Huetamo, R. Fernández N. 2558 (holotipo: ENCB!, isotipos: CHAPA!, MEXU!, TEX!, XAL!, US!). Figura 5.

Nombres comunes. Cerezo, guanito, guayabillo, huanito Guerrero, Michoacán).

Arbustos o arbolitos de 2-6 m de alto, ramas jóvenes grisáceas, en la madurez cafés-oscurasy glabras. Hojas opuestas, láminas ovado-elípticas a ovado-lanceoladas, de (2.5)3-4(6) cm de largo, (1)2-2.5(3) cm de ancho de textura membranosa, haz glabro de color verde olivo, envés ligeramente más pálido, glabro, con 10 a 12 pares de nervaduras secundarias poco prominentes, margen entero, ápice agudo a redondeado, base cordada, pecíolos de 1-2 mm de largo, glabros; estípulas deltoides, de aproximadamente 0.5 mm de largo, cafés- claras, glabras, persistentes. Inflorescencias dispuestas en cimas axilares de 2-4 flores, pedúnculo floral de 1-2 mm de largo, glabro; copa floral campanulada de ca. 1 mm de largo, glabra; sépalos deltoides, de más o menos 1 mm de largo, conspicuamente carinados, glabros; pétalos blancos, fuertemente unguiculados y cimbiformes, del mismo tamaño o ligeramente más cortos que los estambres, estilo dividido en dos lóbulos pequeños. Fruto verde, subesférico, de 7-10 mm de largo; una semilla por lóculo, de ca. 4 mm de largo, blanca, con pequeñas motas negras sobre la superficie.

Distribución. México: Guerrero, Michoacán. Figura 2.

Ejemplares examinados. **Guerrero**: Placeres-Camerón, District Mina, Hinton 9085 (NY, TEX, US); Michoacán: El Guayabito, 8 Km al S de la desviación de Infiernillo-Playa Azúl, R. Fernández N. 4668 (ENCB, IEB); Carretera a Playa Azúl-Nueva Italia, a 4 Km al S de Rancho Nuevo y a 47 Km al NE de Arteaga, M. Ladd O. et al. 350 (ENCB, MEXU); El Machute, cerca del ejido Hinduri, Mpio. de Arteaga, 30 Km al NNW de Infiernillo, sobre la carretera a Nueva Italia, J. Rzedowski 36870 (ENCB); Turitzio, Mpio. de Huetamo, E. Saucedo O. 9 (ENCB); desviación al Infiernillo, carr. Nueva Italia-Playa Azul, Soto & Ramírez 1620 (MEXU); en Las Juntas de Sicangio, camino Huetamo-San Jerónimo, Mpio. de Huetamo, J. C. Soto N. 4183 (ENCB, MEXU); A 14 Km al W de San Jerónimo, carretera a Churumuco, Mpio. de Huetamo, J. C. Soto N. 4193 (ENCB, MEXU); En Las Trincheras, 12 Km al N de Huetamo, J. C. Soto N. 5336 (ENCB, MEXU).

Altitud. 350 a 450 m. Tipo de vegetación: bosque tropical caducifolio.

Floración. Mayo-julio.

Tipos de vegetación. Bosque tropical caducifolio.

En México, las especies de *Karwinskia* con hojas claramente cordadas son *K. johnstonii* y *K. umbellata*. Sin embargo, *K. johnstonii* se distingue por tener hojas generalmente de 3 a 4 cm de largo, con pecíolos de 1 a 2 mm de longitud, textura membranosa y venas transversales poco prominentes. En contraste, *K. umbellata* presenta hojas de 4 a 8 cm de largo, sésiles, con una textura marcadamente coriácea y venas transversales prominentes. Las poblaciones de *K. johnstonii* prosperan a altitudes inferiores a 500 m, alcanzando su máxima floración de mayo a julio. Por su parte, las poblaciones de *K. umbellata* se desarrollan a altitudes cercanas a 1000 m, con su periodo de floración máxima también de mayo a julio.

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figura 5. *K. johnstonii* R. Fernández: Michoacán, Mpio. de Huetamo R. Fernández N. 2558 (US).
Figure 5. *K. johnston*ii R. Fernández: Michoacan, Mpio. de Huetamo R. Fernández N. 2558 (US).

KARWINSKIA LATIFOLIA Standl. Contr. U.S. Nat. Herb. 23(3):716. 1923. Tipo: México, Nayarit.
Tepic, Palmer 1848 (Holotipo US!, isotipo GH!, fototipo ENCB!). Figura 6.
Nombre común. Margarita (Jalisco)
Arbusto o arbolito de hasta 6 m de alto, ramas en la madurez glabras y de color grisáceo. Hojas opuestas, láminas oblongo-lanceoladas a ovado-elípticas de 6-11 cm de largo, 3.5-5 cmde ancho, haz glabro, envés más pálido, glabro, nervaduras secundarias pocas y distintas, margen entero,

ápice redondeado y mucronado, base redondeada y obtusa, pecíolos de 1-3 cm de largo, glabros, estípulas deltoides, café oscuras, a veces con un mechón de pelos blancos en el ápice. Inflorescencias en cimas axilares de 6 a 8 flores, pedúnculo de 3-8 mm de largo, glabro, copa floral campanulada, de 1.5-2 mm de largo, glabra, sépalos deltoides de más o menos 1.5 mm de largo, carinados, glabros, pétalos unguiculados y cimbiformes, deaproximadamente el mismo largo de los estambres; disco poco evidente, estilo bífido. Fruto subesférico, de 7-10 mm de largo; una semilla por lóculo.
Distribución. México: Sur de Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Aguascalientes y Zacatecas. Fig 13.
Ejemplares examinados. **Aguascalientes**: 2 miles south of Calvillo, McVaugh & Koelz 64 (MICH); **Jalisco**: Río Verde, 30 Km al N de Tepatitlán, Mpio. de Tepetitlán, R. Fernández N. 3594 (ENCB); Zacatecas: 17 Km al S de Moyahua, J. Rzedowski 9137 (ENCB).
Altitud. 1300 a 1800 m.
Tipo de vegetación. Bosque tropical caducifolio.
Floración. Marzo-mayo.
Figura 6. Ramas con hojas de *K. latifolia* Standl.
Figura 6. Branches with leaves of *K. latifolia* Standl.

KARWINSKIA MOLLIS Schltdl. Linnaea 15: 461. 1841. Tipo. México. Hidalgo (?), Barranca de Santa María (locus inquirend.), junio, ca. 1831. Schiede s.n. (Tipo no visto). Figura 7.
Nombres comunes. Capulín, cualzorra (Querétaro, Hidalgo).
Arbustos de 0.5-1 (2) m de alto; ramas densamente pilosas. Hojas opuestas, lámina oblongo-elíptica,de 1.5-3.5 cm de largo, (0.8) 1-1.5 cm de ancho, haz verde oscuro, densamente pubescente, envésgrisáceo, con una pubescencia muy fina y abundante, usualmente con pequeñas manchas negras esparcidas a lo largo de las nervaduras más prominentes, margen crenado, raramente entero, ápice obtuso o redondeado, base redondeada o truncada; pecíolos de 1-2 mm de largo, pubescentes, estípulas cuneiformes, de aproximadamente 1 mm de largo, densamente pubescentes, caducas. Inflorescencias umbeliformes, usualmente sésiles, frecuentemente reducidas a una sola flor;sépalos 5, verdoso-canescentes, de 1-1.6 mm de largo, con glándulas oscuras a lo largo del margen; pétalos 5, blancos, de ca. 1 mm de largo; disco poco evidente, verde-amarillento, estilo pequeño, persistente y con el ápice bífido. Fruto verde, tornándose oscuro en la madurez, esférico, de 7-9 mm dediámetro.
Distribución. México (Guanajuato, Hidalgo, Querétaro, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas). Figura 13.
Ejemplares examinados. **Guanajuato:** alrededores de la mina de Xichú, *Fernández 3626-A* (ENCB); **Hidalgo:** 3 Km al W de Jacala, *J. Rzedowski 23096* (ENCB, INIF); **Nuevo León:** Charco Blanco, *J. Marroquín893* (INIF); **Puebla:** Cañada de Mamacla, Dpto. Tepeji de Rodriguez (12 Km al W de Molcaxac), *F. González-Medrano et al. 12402* (INIF, MEXU); **Querétaro:** 8 Km al N de Vizarrón, Mpio. Cadereyta, *R. Fernández N. 2625* (CHAPA, ENCB); 7 Km al W de Tilaco, camino a Santa Ines, Mpio. de Landa de Matamoros, *R. Fernández N. 3129* (ENCB); El Pozo de la Peña, 4 Km al W de San Antonio Tancoyol, Mpio.de Jalpan, *R. Fernández N. 4774* (ENCB); **San Luis Potosi:** 5 Km al E de Santa Rita, Mpio. de Río Verde, *J. Rzedowski 9558* (ENCB); **Tamaulipas:** Brecha a San Ignacio a 41 Km al SE de Nuevo Laredo, Mpio. de Guerrero, *C. González R. 00205* (ENCB).

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figura 7. Ramas con hojas y frutos de *K. mollis* Schlecht.
Figure 7. Branches with leaves and fruits of *K. mollis* Schlecht.
Altitud. 1000-2000 m.

Tipos de vegetación: matorral xerófilo, con frecuencia también en bosque de *Juniperus*.
Floración: Mayo-junio.
Posiblemente el tipo de esta especie se encontraba depositado en el Herbario de Berlin, que fué bombardeado en la segunda guerra mundial sufriendo grandes daños, de ahí la posible razón de que este no ha sido localizado. Fernández (1986) menciona que *K. mollis* ha sido citado para el municipio de Huayacocotla, Veracruz; aunque, hasta la fecha no se ha encontrado ningún ejemplar de herbario que ratifique la presencia de este taxa en la localidad arriba mencionada. Dados sus requerimientos ecológicos, es posible que esta especie se encuentre en Huayacocotla.

KARWINSKIA PARVIFOLIA Rose, Contr. U.S. Nat. Herb. 1:315. t.31. 1895. Tipo: México, Sonora, Agiabampo, *Palmer 773* (Holotipo US!, isotipo GH!, fototipo ENCB!). Fig 8.
Karwinskia pubescens Standl. Contr. U.S. Natl. Herb. 23: 716 (1923).
Karwinskia parvifolia var. *pubescens* (Standl.) Wiggins. Contr. Dudley Herb. 4: 20 (1950)

Nombre común. Cacachila (Sinaloa, Sonora).
Arbusto de 2-3 (5) m de alto, ramas glabras, hojas opuestas o subopuestas, láminas oblongo-lanceoladas, de 1.4-2 cm de largo, 1-(1.2) cm de ancho, haz y envés glabros, margen crenado, con pequeñas manchas negras, ápice obtuso, base obtusa o redondeada; pecíolos delgados, de 3-5 mm de largo, glabros; estípulas deltoides de aproximadamente 1 mm de largo, glabras, persistentes. Inflorescencias dispuestas en cimas axilares de 3 a 4 flores, pedúnculo floral ausente o de estar presente de 2 mm de largo, con pequeñas motas negras sobre la superficie, glabro; pedicelos en la fructificación de 4-5 mm de largo; copa floral infundibuliforme, de ca. 2 mm de largo, glabra; sépalos deltoides, de 0.5-1 mm de largo, carinados; glabros; pétalos blancos, unguiculados y cimbiformes, ligeramente más cortos que los estambres, persistentes, disco delgado, verde a café-oscuro, estigma 2-lobado, persistente en los frutos maduros. Frutos axilares, frecuentemente solitarios, verdes en la juventud, cafés claros en la madurez, de 4.5-5 mm de largo; semilla 1 por lóculo.
Distribución. México (Sinaloa, Sonora). Figura 13.
Ejemplares examinados. **Sinaloa:** vicinity of Culiacan, *Brandegee s.n.* (GH); 2 Km al S de Los Natochis, 30Km al N de Los Mochis, Mpio. de Los Mochis, *R. Fernández N. 3595* (ENCB); Isla Tachechitle, *H.S.Gentry 7132* (MICH, NY); Tachichilte, Mpio. Angostura, *González Ortega 1024* (MEXU); Ahome, *González Ortega 5578* (GH, US);**Sonora:** 1.2 miles southeast of La Dura, *Hasting & Turner 69-182* (ENCB); along road from Navojoa to Alamos, *Mason Jr. et al. 2904* (NY, INIF); Sierra de Alamos, *Rose et al. 13053* (NY); 2 miles N of Nacori, *Wiggins & Rollins 390* (A, LL, MICH, US).
Altitud. 20-160 m.
Tipo de vegetación. Bosque tropical caducifolio.
Floración. Junio-julio.
Standley (1923) ubica a *K. parvifolia* como sinónimo de *K. humboldtiana,* sin embargo, la primera se diferencia claramente de la segunda por tener hojas, sépalos y pétalos mucho más pequeños.

Figura 8. Ramas con hojas y frutos de *K. parvifolia* Rose
Figure 8. Branches with leaves and fruits of *K. parvifolia* Rose

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

KARWINSKIA RZEDOWSKII R. Ferrnández, Acta Bot. Mex. 2:11. (1988). Tipo: México, Jalisco, Los Alacranes, 12 km al N de Chimaltitán, Mpio. de Bolaños, *R. Fernández N. 3195* (holotipo: ENCB!; isotipos: CHAPA!, GH!, MEXU!, NY!, TEX!, XAL!, US!). Figura 9.

Nombres comunes. Margarita, tugui (huichol, Jalisco); pimientilla (Durango).

Arbusto o arbolito de 2-8 m de alto, ramas jóvenes tomentosas con pelos largos y muy entrecruzados, blanco-grisáceos, en la madurez glabrescentes y de color café-rojizo. Hojas opuestas, láminas oblongo-ovadas u oblongo-lanceoladas, de 4-9 cm de largo, 1.7-3.5 cm de ancho, haz de color verde-olivo, glabro o glabrescente, el envés más pálido, con pubescencia muy abundante, margen entero, ápice agudo, base redondeada; pecíolos de 8-10 mm de largo, pubescentes a glabrescentes, estípulas deltoides. Inflorescencias dispuestas en cimas axilares de 6 a 8 flores, pedúnculo de 2-7 mm de largo, pubescente;copa floral campanulada de ca. 2 mm de largo, muy pubescente; sépalos deltoides de más o menos 2mm de largo, fuertemente engrosados del lado adaxial en el centro, abaxialmente planos y pubescentes;pétalos blancos, por lo general persistentes, de 1.5-2 mm de largo, ca. 1.5 mm de ancho, marcadamentecimbiformes, en la base abruptamente angostados en una uña, cada pétalo envolviendo un estambre;estambres un poco más largos que los pétalos, anteras café-amarillentas de ca. 1 mm de largo, disco grande verdoso, estilo bilobado en el ápice, estigmas 2, papilosos. Fruto rojo a negro en la madurez, esférico, de 8-10 mm de largo, indehiscente; semillas 2 o 3, elipsoides y algo comprimidas dorsiventralmente, de 4.5-5 mm de largo, 3.5-4 mm de ancho, blanco-amarillentas, lisas.

Distribución. México (Durango, Jalisco y Zacatecas). Figura 13.

Ejemplares examinados. **Durango:** 1 km de Temoaya por el camino a El Mezquital, Mpio. de El Mezquital*González & Rzedowski 1350* (CIIDIR, ENCB, MEXU); **Jalisco:** 8 Km al S de San Martín de Bolaños, Mpio.San Martín de Bolaños, *R. Fernández N. 2600* (ENCB); Arroyos del Agua, 10 km al NW de Huejuquilla, *J.Rzedowski 17616* (CHAPA, ENCB, IBUG, MICH, MEXU, NY, TEX); **Zacatecas:** Foothills of Sierra de los Huicholes, 12-10 km by road southwest of San Juan Capistrano and 20-25 km southwest of the crossingof Río Atenco (Chapalagana), *McVaugh 25732* (MICH).

Altitud. 1000-1700 m.

Tipo de vegetación. Bosque tropical caducifolio.

Floración. Abril-agosto.

Usos. En la práctica médica popular el cocimiento de las hojas se usa para bajar la fiebre y en ocasionespara provocar el vómito.

Figura 9. *Ramas con hojas de K. rzedowskii* R. Fernández
Figure 9. Branches with leaves of *K. rzedowskii* R. Fernández

K. rzedowskii se distingue por su abundante pubescencia, presente en las ramas jóvenes, el envés de las hojas, los pedúnculos florales y los sépalos. Aunque *K. mollis* también exhibe pubescencia en estas estructuras, se diferencia de *K. rzedowskii* por tener hojas más pequeñas con el envés de color grisáceo, flores poco numerosas y frutos de menor tamaño. Además, *K. mollis* prospera principalmente en matorrales xerófilos.

KARWINSKIA SUBCORDATA Schltdl. Linnaea 15: 462. 1841. Tipo. México, Hidalgo, entre Ixmiquilpan yZimapán, *Schiede s.n.* Junio. ca. 1831 (isotipo W, no visto). Figura 10.
Karwinskia microphylla Suess. Sydowia 7: 185–186. 1953.
Arbusto de 0.5-1.5 m de alto, ramas glabras y de color grisáceo. Hojas opuestas, lámina ovada a suborbicular, de 1-2.5 cm de largo, 1-2 cm de ancho, haz verde oscuro, glabro, envés más pálido, glabro,con una nervadura principal y 8-9 pares de nervaduras secundarias, con pequeñas manchas negras, margen ondulado, ápice obtuso, base obtusa, ligeramente cordada, pecíolos de 1-2 mm de largo, glabros; estípulas subuladas, de 2.5-3 mm de largo, glabras, persistentes. Inflorescencias en cimas axilares de 3 a 4 flores, pedúnculo de 1-2 mm de largo, frecuentemente ausente; pedicelos en la fructificación de 8-10 mm de largo; copa floral subcampanulada, de ca. 1 mm de largo, glabra, sépalostriangulares, con el ápice muy agudo, de más o menos 1 mm de largo, engrosados adaxialmente en elcentro, abaxialmente planos, glabros y con 4 a 5 motas negras sobre los márgenes, pétalos blancos,
obovados, cimbiformes y unguiculados, cada uno envolviendo un estambre; estambres ligeramente máscortos que los pétalos, anteras ovadas, disco café oscuro, poco evidente; estilo bilobado. Fruto usualmente uno por axila, subesférico, de 4-5 mm de largo, café amarillento al secarse; semillas 1 porlóculo.
Distribución. México (Hidalgo y Querétaro). Figura 13.
Ejemplares examinados. **Hidalgo:** 8 Km al N de Detzane, camino a Mina Lomo de Toro, *R.*

Fernández N.2652 (ENCB, IEB); **Querétaro:** Alrededores de la mina La Negra, cerca de Maconi, Mpio. Cadereyta, *J. Rzedowski 47629* (CHAPA, IEB).
Altitud. 1500- 1600 m.
Tipo de vegetación: matorral xérofilo.
Floración. Mayo-junio.

Figura 10. Ramas con hojas y frutos de *K. subcordata* Schlecht.
Figure 10. Branches with leaves and fruits of *K. subcordata* Schlecht.

Se tuvo la oportunidad de analizar una fotografía del tipo de *K. microphylla* y revisar la descripción original de esta especie. Como resultado de estas observaciones, se concluyó que *K. microphylla* es, en realidad, un sinónimo de *K. subcordata*. Johnston (1966) y Fernández (1988) señalaron que *K. subcordata* se conocía únicamente en los alrededores de Zimapán, Hidalgo, y que aparentemente era endémica de esta región. Sin embargo, recientemente se realizó una colecta en la zona de Maconí, municipio de Cadereyta, en el estado de Querétaro, por J. Rzedowski (47629), lo que amplía la distribución geográfica previamente conocida de esta especie.

KARWINSKIA TEHUACANA R. Fernández et N. Waksman. Phytologia 73(6): 435. 1992. Tipo: México. Puebla: 6 Km al S de Tepeyehualco, R. Fernández N. 4375 (holotipo ENCB!). Figura 11. Arbol o arbusto de 3-8 m de alto, ramas glabras, grisáceas. Hojas simples opuestas, láminas ovado- elípticas a ovado-lanceoladas de 3-5 cm de largo, 1.5-2.0 cm de ancho, haz verde-limón, glabro, el envés ligeramente más pálido y con las nervaduras secundarias muy prominentes, glabro, margen entero, ápice agudo, base aguda a ligeramente redondeada, pecíolos de 3-5 mm de largo, glabros, estípulas deltoides, ca. 0.5 mm de largo, glabras, persistentes. Inflorescencias dispuestas en cimas axilares de 3-4, pendúnculo de 2-3 mm de largo, glabro; copa floral campanulada de ca. 1.5 mm de largo, glabra; sépalos deltoides de 1.0-1.5 mm de largo, 1.2-1.5 mm de ancho, con abundantes motas negras sobre la superficie; pétalos blanco-amarillentos, unguiculados y cimbiformes de 1.3-1.5 mm delargo, 0.8-1 mm de ancho; estambres envueltos parcialmente por los pétalos, anteras cafè- amarillentas, de 0.5-0.8 mm de largo; disco no muy evidente, verdoso, estilo bilobado en el ápice, estigmas dos papilosos. Fruto drupáceo, verde en la juventud, que se torna a rojo y después a negro en la madurez, globoso a subgloboso, de 10-12

mm de diámetro; semillas 2-3 elipsoides de ca. 5mm delargo, blanco-amarillentas, listas.
Ejemplares examinados. México. **Puebla**: Cascadas de Acatzitzimitla, 9 Km al SE de Tepeyehualco, Mpio. de Atoyatempan, R. Fernández N. 2630 (ENCB); 6 Km al S de Tepeyehualco, 1 Km al W sobre brecha a la cascada de Acacatzimitla, R. Fernández N. 4818 (ENCB).
Distribución. México (Puebla, sólo se conoce de la zona de Tehuacán).
Tipo de vegetación. Matorral xerófilo, que prospera sobre suelo calizo.
Floración. Junio-julio.
Karwinskia tehuacana se asemeja a *K. humboldtiana* Zucc., especie ampliamente distribuida en México(Fernández 1988), pero difiere conspicuamente en sus hojas y frutos. Las hojas presentan un color verde limón muy llamativo aún en los ejemplares ya herborizados, las nervaduras secundarias del envés se presentan muy resaltadas y el tamaño de los frutos es notablemente más grande. Es muy probable queestas dos especies presenten una evolución paralela.

Figura 11. Ramas con hojas y frutos de *K. tehuacana* R. Fernández *et* N. Waksman
Figure 11. Branches with leaves and fruits of *K. tehuacana* Fernández *et* Waksman

KARWINSKIA UMBELLATA (Cav.) Schltdl. Linnaea 15:460. (1841).
Nombres comunes. Arnica (Puebla); guayabillo (Morelos); laurel de Chile (Guerrero).
Arbusto de 1 a 3 m de alto, ramas maduras cafés oscuras y glabras. Hojas opuestas, coriáceas, sésiles,láminas elíptico-ovadas, de 4-8 cm de largo, 3-6 cm de ancho, haz glabro, verde claro, en los ejemplares secos generalmente se torna muy oscuro, envés del mismo color que el haz o ligeramente más pálido,glabro, con una nervadura principal y 9 a 14 pares de nervaduras secundarias muy prominentes, margen entero o ligeramente ondulado, ápice obtuso o redondeado, base fuertemente cordada; estípulas de ca.5 mm de largo, coriáceas y truncadas. Inflorescencias dispuestas en cimas axilares de 6-8 flores, pedúnculo floral comúnmente axilar, de 5-7 mm de largo, glabro; copa floral campanulada, de ca. l.5 mmde largo; sépalos deltoides, de aproximadamente l mm de largo, carinados y glabros; pétalos blancos, unguiculados y cimbiformes, del mismo largo de los estambres; anteras ovadas y sulcadas; disco verdoso, estilo subulado, estigmas globosos. Fruto esférico, de 7-8 mm de diámetro, indehiscente; semillas de ca. 5 mm de largo, blancas con pequeñas motas negras sobre la superficie.
Distribución. México (Guerrero, Morelos y Puebla). Figura 2.
Ejemplares examinados. **Guerrero:** above Iguala, *Pringle 8424* (A, GH, NY, US); 6 Km al S de Zacacoyuca,sobre la carretera a Chilpancingo, *J. Rzedowski 29824* (ENCB, LL, MICH); **Morelos:** Fraccionamiento "LaCima" más ó menos 6 Km al norte de Santa Rosa Treinta, *R. Fernández N.*

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

940 (ENCB); 2 Km al SE de Ahuehuetzingo, Mpio. Alpuyeca, *R. Fernández N. 2609* (ENCB, IEB); 2 Km al S de la desviación a Ahuehuetzingo, carr. libre a Puente de Ixtla, Mpio. Puente de Ixtla, *R. Fernández N. 4371* (CHAPA, ENCB);2 Km al S de la desviación a Ahuetzingo, carr. libre a puente de Ixtla, Mpio. Puente de Ixtla, *R. Fernández*
N. 4594 (ENCB, IEB); **Puebla:** Ejido Santa María Cohetzala, mpio. Cohetzala, *Lugo 21* (MEXU); 2 Km. al Nde San Pedro de las Palmas, *Razo y García 15* (CHAP, IEB).

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figura 12. Ramas con hojas y frutos de *K. umbellata* (Cav.) Schltdl.
Figure 12. Branches with leaves and fruits of *K. umbellata* (Cav.) Schltdl.Altitud. 850-1200 m.

Tipo de Vegetación. Bosque tropical caducifolio.**Floración**. Febrero-abril.
Usos. Medicinal, para inflamaciones producidas por golpes.
Las poblaciones de esta especie generalmente se encuentran en zonas perturbadas principalmente porfuego, en suelos muy pobres y pedregosos.

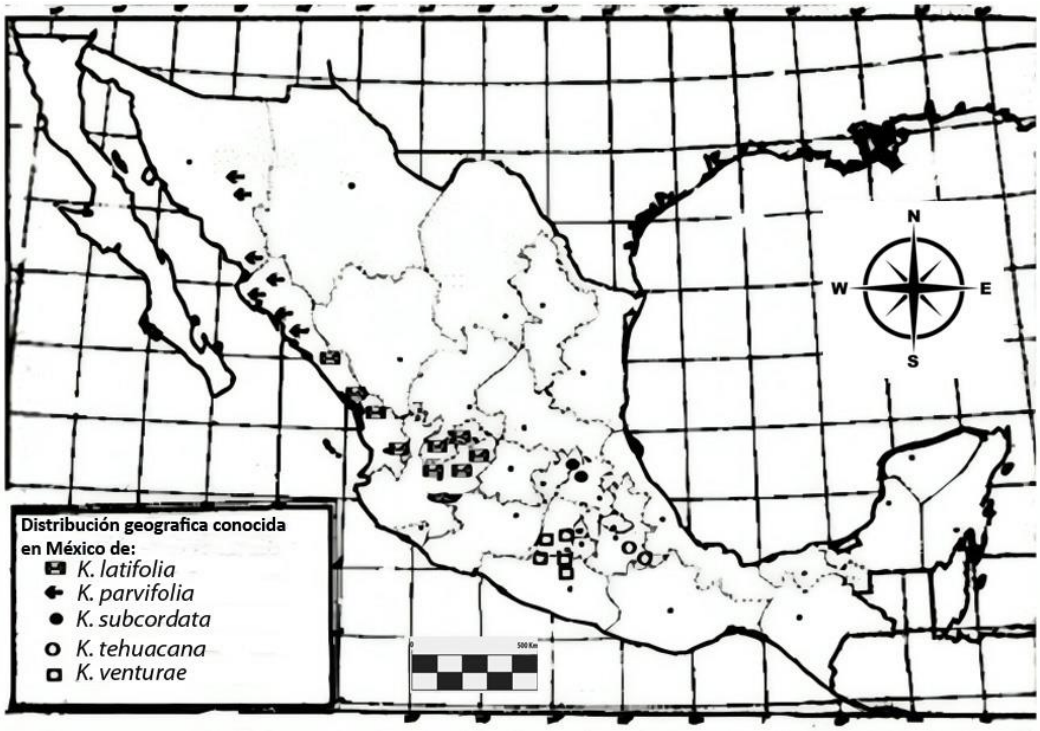


Figura13. Distribución geográfica conocida en México de: *K. latifolia*, *K. parvifolia*, *K. subcordata*, *K. tehuacana* y *K. venturae*.
Figure 13. Known geographic distribution in Mexico of*: K. latifolia, K. parvifolia, K. subcordata, K. tehuacana* y *K. venturae.*

KARWINSKIA VENTURAE R. Fernández. Acta Bot. Mex. 2:14-16. 1988. Tipo: México, Estado de México, El Zapote, Mpio. Tejupilco, *R. Fernández N. 3184* (holotipo: ENCB!; isotipos: CHAPA!, GH!. MEXU!, NY!, TEX!). Figura 14.
Nombre común. Diente de león (estado de México). Figura 13.
Arbusto de 1-3 m de alto, ramas jóvenes pubescentes, en la madurez glabrescentes y de color café claro.Hojas opuestas, láminas ovadas a ovado-elípticas, de 4-5(6) cm de largo, (2.5)3-4(6) cm de ancho, hazglabrescente o subpubescente, verde (en los ejemplares secos de color café oscuro) el envés ligeramente más pálido y pubescente, especialmente sobre las nervaduras, margen entero, ápice redondeado (raramente agudo), base redondeada, a veces truncada; pecíolos de (3)4-5(8) mm de largo,pubescentes, estípulas subuladas, de ca. 1 mm de largo, café-amarillentas, pubescentes, generalmentepersistentes. Inflorescencias dispuestas en cimas axilares de 4-5 flores, pedúnculos de 1-2 mm de largo,pubescentes; copa floral campanulada, de 1.5-2 mm de largo, pubescente; sépalos deltoides, de más omenos 1 mm de largo, pubescentes; pétalos blancos, del mismo largo de los estambres, persistentes; disco grueso, verde, estilo corto, estigmas 2, papilosos. Fruto verde con algunas manchas cafés claras sobre el exocarpio, esférico a subesférico, de 5-7 mm de largo; semillas 1 por lóculo, elipsoides, comprimidas dorsoventralmente, de 3-4 mm de largo, por 2-3 mm de ancho, café oscuras con pequeñas papilas de color negro sobre la superficie.

Núm. 60: 15-38 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figura 14. *K. venturae* R. Fernández: Estado de México, Mpio. Tejupilco R. Fernández N. 3184 (US).
Figure 14. *K. venturae* R. Fernández: Estado de México, Mpio. Tejupilco R. Fernández N. 3184 (US).

Distribución. México (México y Guerrero).
Ejemplares examinados. **Guerrero:** Ejido Chapultepec, Cerro de Tres Cruces, 15 Km al Sur de Tlalchapa,
C. Aguirre 100-6 (ENCB, INIF); Km 124 Carretera Toluca-Zihuatanejo, *I. García R. 172* (ENCB); El Zapote,carr. Acamuchititlán, mpio. Tejupilco, *E. Guízar 457* (CHAPA); Trincheras, District Mina, *Hinton 10123*
(GH, NY, US); Km. 157 de la carr. a Taxco, *Lundell & Lundell 12318* (MICH, NY, TEX, US); en lomas del Alambrado, camino de herradura Lidice-Las Moneras, sobre el camino Iguala Cd. Altamirano al W de Taloloapan, Mpio. Teloloapan, *E. Martínez s. 629* (CHAPA, MEXU);2 km al W de Milpillas; sobre el camino Milpilllas-Xochipala Filo de Caballo, Mpio. Zumpango del Rio, *E. Martínez 677* (CHAPA, MEXU);**Mexico:** Nanchititla, District Temascaltepec, *Hinton 3630* (NY, US); Tenayac, District Temascaltepec, *Hinton 3004* (NY); Temascaltepec, *Hinton 4085* (NY, US); Temascaltepec, *Hinton 4352* (NY, TEX. US);
Altitud. 950-1530 m.
Tipo de vegetación. Bosque tropical caducifolio.
Floración. Mayo-junio.

DISCUSIÓN

El género *Karwinskia* está representado en México por varias especies que exhiben una distribución amplia pero fragmentada, ocupando diversos ecosistemas. Estas especies prosperan principalmente en hábitats xerófilos y bosques tropicales caducifolios. Su rango de distribución en el país se extiende desde Baja California Sur hasta Chiapas y desde Tamaulipas hasta la península de Yucatán, abarcando un intervalo altitudinal que oscila entre los 20 y los 2,000 m.s.n.m. Las poblaciones son más densas en áreas de baja a media altitud, particularmente en suelos bien drenados. *Karwinskia* crece en diversos tipos de matorrales xerófilos, bosques tropicales caducifolios y zonas de transición entre estos ecosistemas y encinares, con una mayor concentración en el altiplano central de México. En la literatura se registraron varios nombres de especies para este género, y su revisión taxonómica estableció que hay 11 especies aceptadas. Muchas de las especies del género presentan adaptaciones ecológicas distintivas, como su preferencia por suelos planos y bien drenados. Estas plantas son mayoritariamente caducifolias, perdiendo su follaje durante la temporada seca. Su ciclo fenológico está estrechamente relacionado con la temporada de lluvias: la floración ocurre entre mayo y julio, mientras que la fructificación tiene lugar entre agosto y noviembre. Varias especies del género están catalogadas como vulnerables debido a la pérdida de sus hábitats naturales, provocada principalmente por actividades humanas como la expansión de asentamientos y la conversión de tierras para uso agrícola. *K. humboldtiana*, ampliamente distribuida en el norte y centro de México, ha experimentado una notable disminución de sus poblaciones en algunas regiones debido a la explotación intensiva de su madera. Las especies del género tienen usos diversos en México, destacándose como fuente de leña y en aplicaciones medicinales o alimenticias de sus frutos. Sin embargo, la toxicidad de los frutos en algunas especies limita su uso directo en la alimentación, aunque este riesgo es conocido y gestionado tradicionalmente por las comunidades rurales.
Además, ciertas especies poseen un notable valor ornamental debido a su atractivo porte y follaje, lo que las hace ideales para proyectos de reforestación o jardinería en zonas áridas. No obstante, debe tenerse precaución al utilizarlas en entornos urbanos para evitar riesgos asociados a su toxicidad. *Karwinskia* representa un componente esencial de los ecosistemas xerófilos y tropicales de México, con una relevancia ecológica y cultural significativa que exige medidas de conservación y manejo sostenible.

CONCLUSIONES

Actualmente se reconocen 11 especies del género *Karwinskia* en México. Este género tiene una amplia distribución en el país y es predominantemente termófilo, ubicándose principalmente en matorrales xerófilos, aunque también se encuentra en bosques tropicales caducifolios. Su rango altitudinal abarca desde los 20 hasta los 2,000 m s.n.m., con presencia en 23 estados de la República Mexicana. Entre los taxa endémicos destacan *K. johnstonii*, *K. latifolia*, *K. mollis*, *K. parvifolia, K. rzedowskii*, *K. subcordata, K. umbellata*, *K. tehuacana* y *K. venturae*. Los estados del norte y centro de México concentran el mayor número de especies. La especie más ampliamente distribuida es *K. humboldtiana*, presente en 12 estados, mientras que *K. tehuacana* y *K. venturae* son exclusivas de una sola entidad federativa. Las especies de *Karwinskia* se conocen por varios nombres comunes que varían según la región, con un total de 22 nombres diferentes registrados. Esto implica que aproximadamente el 82% de las especies cuentan con al menos un nombre común en México. Además, varias especies tienen usos documentados, principalmente en el ámbito medicinal, como leña y con fines ornamentales.

AGRADECIMIENTOS

Se hace un amplio reconocimiento a los curadores de los siguientes herbarios nacionales: ANSM, CHAPA, ENCB, IBUG, IEB, INIF, MEXU y XAL y de los herbarios internacionales: A, BM, CAS, F, GH, K, LL, MICH, MO, NY, P, S, TEX, UC, US y WIS, por todas las facilidades otorgadas para la consulta de los ejemplares.

LITERATURA CITADA

Recibido:
15/diciembre/2024

Aceptado:
6/junio/2025

Brizicky, G. K. (1964). The genera of Rhamnaceae in the southeastern United States. *J. Arnold Arbor.*(45), 439-463.

Brongniart, A. (1826). Memoire sur la famille des Rhamnées, ou histoire naturalle des genres qui composent ce groupe de plantes. *Ann. Sci. Nat.*(10), 320-386.

Fernández N., R. (1996). Rhamnaceae. *Flora del Bajío y de Regiones adyacentes*(Fascículo 43), 1-69.

Fernández, R. (1986). *Rhamnaceae. En Flora de Veracruz. Instituto Nacional de Investigaciones sobre los recursos bióticos. Xalapa, Veracruz. Fasc. 50. 36-41 pp.*

Fernández, R. (1988). El género *Karwinskia* (Rhamnaceae) en México. Tesis de Maestria. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 89.

Fernández, R. (1992). Nombres comunes, usos y distribución geográfica del género *Karwinskia* (Rhamnaceae) en México. *Anales Del Instituto De Biología Serie Botánica, 63*(1), 1-23.

Holmgren, P. K., Holmgren, N. H., & Barnett, L. C. (1990). Index Herbariorum: Part I: The Herbaria of the World (8th ed.). New York Botanical Garden.

Johnston, M. C. (1966). Systematic studies in the plant genus *Karwinskia* in México and Central America. *Yearb. Amer. Philos. Soc.* , 351-357.

Martínez, M. (1939). Las plantas medicinales de México 2a. ed. Ed. Botas. México D.F. . 463-464.

Martínez, M. (1979). Las Ramnáceas. En: Flora del Estado de México. Biblioteca Enciclopédica del Estado de México. *Biblioteca Enciclopédica del Estado de México*(1), 282-286.

Richardson, J. E., Fay, M. F., Cronk, Q., Bowman, D., & Chase, M. W. (2000). A phylogenetic analysis of Rhamnaceae using rbcl and trnl-f plastid dna sequences. *American Journal of Botany, 87*(9), 1309-1324. doi:https://doi.org/10.2307/2656724

Standley, P. C. (1923). Rhamnaceae. Trees and Shrubs of Mexico. Contr. U.S. Nat. Herb. *23*(6), 710-727.

Suessenguth, K. (1953). *Rhamnaceae. In: Engl. & Prantl, Nat. Pflanzenfam. ed. 2. 20d:7-173.*

Wiggins, I. L. (1964). Vegetation and Flora of the Sonoran Desert. Stanford University Press. (2), 856-869.

Wiggins, I. L. (1980). *Flora of Baja California.* Stanford University Press. Calif. pp 780-787.

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

DIVERSIDAD FLORÍSTICA DE LAS AREAS VERDES URBANAS DE MIAHUATLÁN, UNA CIUDAD PEQUEÑA DE OAXACA, MÉXICO

FLORISTIC DIVERSITY OF THE URBAN GREEN AREAS OF MIAHUATLÁN, A SMALL CITY IN OAXACA, MEXICO

Gutiérrez Pacheco, V., D. Coromoto Rebolledo López

DIVERSIDAD FLORÍSTICA DE LAS AREAS VERDES URBANAS DE MIAHUATLÁN, UNA CIUDAD PEQUEÑA DE OAXACA, MÉXICO
FLORISTIC DIVERSITY OF THE URBAN GREEN AREAS OF MIAHUATLÁN, A SMALL CITY IN OAXACA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 39-59 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.3

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Núm. 60: 39-59 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Diversidad florística de las areas verdes urbanas de Miahuatlán, una ciudad pequeña de Oaxaca, México

Floristic diversity of the urban green areas of Miahuatlán, a small city in Oaxaca, Mexico

Gutiérrez Pacheco, V., D. Coromoto Rebolledo López

DIVERSIDAD FLORÍSTICA DE LAS AREAS VERDES URBANAS DE MIAHUATLÁN, UNA CIUDAD PEQUEÑA DE OAXACA, MÉXICO

FLORÍSTIC DIVERSITY OF THE URBAN GREEN AREAS OF MIAHUATLÁN, A SMALL CITY IN OAXACA, MÉXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 39-59. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.3

Víctor Gutiérrez Pacheco / v.guty@yahoo.com.mx
https://orcid.org/0000-0002-3768-6515
Deisy Coromoto Rebolledo López https://orcid.org/0000-0003-1596-0453
División de Posgrado, Universidad de la Sierra Sur
Guillermo Rojas Mijangos S/N, esq. Av. Universidad, Col Ciudad Universitaria,
Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México

RESUMEN: Las investigaciones respecto a las funciones socioambientales de las áreas verdes se enfocan en las grandes urbes dejando a las medianas, pero sobre todo a las pequeñas, carentes de estudios. Esto podría estar llevando a las ciudades pequeñas a repetir los errores en la materia que han experimentado las ciudades grandes de México. Reconsiderando este enfoque, el objetivo de este trabajo fue determinar el aprovisionamiento de área verde per cápita en la ciudad de Miahuatlán, inventariar los componentes de su flora vascular y evaluar su biodiversidad. A través de recorridos se cuantificó el área verde y se realizó un inventario de la flora vascular. El análisis de diversidad alfa se hizo a través de los índices de Margalef y de Pielou y se utilizó el índice foráneo para estimar el porcentaje de especies no nativas. Con 19 áreas verdes, se tiene una provisión de 4.65 m^2 por habitante. Taxonómicamente se registraron 151 especies de plantas vasculares correspondientes a 118 géneros y 50 familias. El 42% de la flora se concentra en seis familias de las que destaca Fabaceae con el 12% de especies y el 14% de géneros. De las especies, 77 son nativas y 74 son introducidas, de las cuales 37 son ruderales. La diversidad de acuerdo a los índices de Margalef y de Pielou es de 11.83 y 0.49, respectivamente. *Jacaranda mimosifolia* D.Don es la especie arbórea más abundante. Se requiere aumentar el área verde y convertir estos espacios en un refugio para la flora nativa, revalorando su papel en el entramado ecológico de la ciudad y su entorno.
Palabras clave: especies introducidas, especies nativas, flora vascular, plantas ruderales, plantas sinantrópicas

ABSTRACT: Research regarding the socio-environmental functions of green areas focuses on large cities, leaving medium-sized ones, but especially small ones, lacking studies. This could lead small cities to repeat the mistakes experienced by large cities in Mexico in this regard. Reconsidering this approach, the objective of this work was to determine the green area provision per capita in the city of Miahuatlán, inventory the components of its vascular flora, and evaluate its biodiversity. Through tours, the green area was quantified and an inventory of the vascular flora was carried out. The alpha diversity analysis was done through the Margalef and Pielou indices and the foreign index was employed to estimate the percentage of non-native species. With 19 green areas, there is a provision of 4.65 m2 per inhabitant. Taxonomically, 151 species of vascular plants corresponding to 118 genera and 50 families were recorded. Forty-two percent of the flora is concentrated in six families, with Fabaceae standing out at 12% of species and 14% of genera. Of the species, 77 are native and 74 are introduced, of which 37 are ruderal. The diversity according to the Margalef and Pielou indices is 11.83 and 0.49, respectively. *Jacaranda mimosifolia* D.Don is the most abundant tree species. It is necessary to increase the green area and convert these spaces into a refuge for native flora, re-evaluating their role in the ecological framework of the city and its surroundings.
Key words: introduced species, native species, ruderal plants, synanthropic plants, vascular flora.

INTRODUCCIÓN

La importancia de los espacios arbolados en las grandes ciudades se percibe de inmediato dada la urbanización tan acentuada de estos territorios. No así en ciudades pequeñas, donde lo rural es aún muy cercano, y la necesidad de área verde se diluye ante el deseo de ciudad y la urgencia de urbanizar lo más rápidamente posible el entorno.

A pesar de la necesidad de espacios verdes para los conglomerados urbanos, estudios en ciudades grandes de México dan cuenta de las deficiencias que acusan en el aprovisionamiento de espacio verde por habitante; son los casos, por ejemplo, de la CDMX con 7.5 m^2/hab, Puebla con 2.4 m^2/hab, Culiacán con 5.1 m^2/hab y Querétaro con 9 m^2/hab (ICMA, 2020; Núñez, 2021). La media para el país es de 2.1 m^2/hab (CMM, 2017). Esta situación no se limita al contexto nacional, pues en América Latina el promedio de área verde es de 3.5 m^2/hab (BID, 2014), y solo casos muy contados como el de Curitiba, Brasil están por encima de esta condición con 50 m^2/hab (CMM, 2017). Países de otras regiones han atendido esta deficiencia y con base en políticas públicas de aprovisionamiento de área verde se han acercado o rebasado los 9 m^2/habitante que marcan algunas recomendaciones internacionales (Banco Mundial & Schaeffer, 2016; ICMA, 2020). Es el caso de las ciudades que encabezan el *ranking*: Bratislava, Eslovaquia con 332.87 m^2/hab, Auckland, Nueva Zelanda con 357.2 m^2/hab y Reikiavik, Islandia con 410.84 m^2/hab (Statista, 2024).

La deficiencia de área verde para una ciudad, así como la condición de abandono que frecuentemente presentan los espacios arbolados, tiene repercusiones negativas dado el valor ecológico-ambiental y social de la vegetación: remoción de contaminantes atmosféricos, protección del suelo, recarga de acuíferos, regulación de la temperatura local y de la radiación solar, sostenimiento de la biodiversidad, arquitectura de paisaje, mejoramiento de la salud física y emocional de los usuarios y disfrute estético, entre otros (Nowak, Crane, & Stevens, 2006; Mullaney, Lucke, & Trueman, 2014; Bollo, Martín, & Martínez, 2022). Particularmente, la composición florística de los espacios verdes se relaciona con la calidad de los servicios ambientales que proporcionan. Es el caso, en zonas áridas, donde el tipo de vegetación (nativa o introducida) impacta en el aprovechamiento del agua y en el almacenamiento de carbono, siendo más eficiente la vegetación nativa xerófila que la flora introducida (Guillen-Cruz, Rodriguez-Sánchez, Férnandez-Luqueño, & Flores-Rentería, 2021).

Usualmente la condición de abandono en las áreas verdes se relaciona con la carencia de planes para su manejo, lo que deriva en acciones erradas de mantenimiento y mejoramiento (Benavides & Fernández, 2012). Así, se encuentran masas arboladas con ciertos grupos altamente representados, generalmente de especies introducidas, y/o elevadas densidades de plantación de árboles con las consecuentes deformaciones en los especímenes ante la competencia por la luz, crecimiento incipiente por insuficiencia de nutrientes y proliferación de enfermedades (Benavides & Fernández, 2012; Román-Guillén, y otros, 2019). Un aspecto relevante lo constituye la presencia cada vez mayor de especies introducidas y su mayor abundancia en detrimento de las especies nativas, todo lo cual impacta en la conservación de la biodiversidad de los espacios verdes (Domínguez, Acocal, Esteban, Aguilar, & Torres, 2016; Román-Guillén, y otros, 2019; Benavides & García, 2023; Almeida-Cerino, Bertolini, & Martínez-Trinidad, 2024).

Acorde al principio de que para atender un problema o deficiencia en el ámbito de lo público es necesario primero conocer lo que se tiene o con lo que se cuenta, las ciudades grandes y medias del país tienen acceso a estudios y/o diagnósticos que les permiten conocer, al menos, sus deficiencias en el tema de los espacios verdes o arbolados. Sin embargo, las ciudades pequeñas que se manejan en un estado de urgencia constante para atender otros servicios de competencia municipal, carecen de recursos para atender el tema de las áreas verdes. De allí la ausencia de diagnósticos municipales al respecto, situación que se acentúa con la carencia de trabajos en revistas especializadas donde los esfuerzos se centran en las grandes urbes, obviando el que también las ciudades pequeñas son parte del fenómeno de lo urbano.

Sin embargo, es necesario acercarse a este problema para buscar ayudar a que los gobiernos locales trasciendan de ese estado de atención de lo urgente e inmediato a una cogestión institucionalizada. En materia de aprovisionamiento de áreas verdes esto puede significar el establecer las bases para remontar deficiencias en el tema, aprovechar el entorno rural cercano, y crear un entorno citadino amigable con el ambiente para un futuro de crecimiento poblacional y

de aumento de la mancha urbana, que son las tendencias actuales. Lo anterior con la idea de evitar que se repitan los escenarios de deficiencia, en este tema y en otros de competencia municipal, en que se han desenvuelto las grandes ciudades de la actualidad.

Los espacios arbolados son los preferidos por los usuarios (Jensen & Birche, 2021), de allí que no baste con solo contar con mayor área verde en los contextos urbanos, sino también con un componente florístico en las mejores condiciones posibles dada su importancia socio-ambiental, argumento que sustenta la propuesta de este trabajo en cuanto a evaluar la diversidad florística en una ciudad pequeña como lo es Miahuatlán.

Al ser Miahuatlán una ciudad pequeña su cercanía con lo rural es aún estrecha, lo que permitiría plantear la hipótesis de que la flora de la ciudad conserva aún muchos elementos de los ecosistemas autóctonos. Esto es atractivo desde el punto de vista de los intereses conservacionistas, ya que esta condición podría servir como base para instrumentar políticas públicas locales en la materia, y como referente para estudios y propuestas al respecto en otras ciudades pequeñas del estado y del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en las áreas verdes de la ciudad de Miahuatlán; la cual se ubica en el municipio del mismo nombre en el Estado de Oaxaca, al sur de la república mexicana en las coordenadas 16º19´ Norte y 96º35´ Oeste, y a 1600 msnm (Figura 1) (Alvarez, 1997). Tiene una superficie de 2299.5 ha (Ramirez-Ospitia, Ramírez-Arellanes, Maya-Lucas, & Sánchez-Hernández, 2017) y una población de 29 130 habitantes (INEGI, 2020). El clima es semiseco semicálido, la temperatura media anual es de 19.7 ºC y la precipitación media anual es de 593 mm. Los tipos de suelo son luvisol, vertisol y phaeozem (INEGI, 2010).

Miahuatlán se asienta en un punto donde terminan los Valles Centrales y se inicia el ascenso hacia la Sierra Sur en una zona dominada por lomeríos (INEGI, 2010). Los ecosistemas originales son de Selva Caducifolia y Matorral Xerófilo (Miranda & Hernández-X, 1963; Rzedowski, 2006) con áreas de transición, y vegetación de galería presente a lo largo del río y arroyos intermitentes que cruzan la localidad (SEMARNAT, 2014). En los terrenos de la periferia urbana dominan las tierras de cultivo y de vegetación secundaria, así como relictos de la vegetación originaria en arroyos, barrancas, laderas y cercas que delimitan las propiedades rurales.

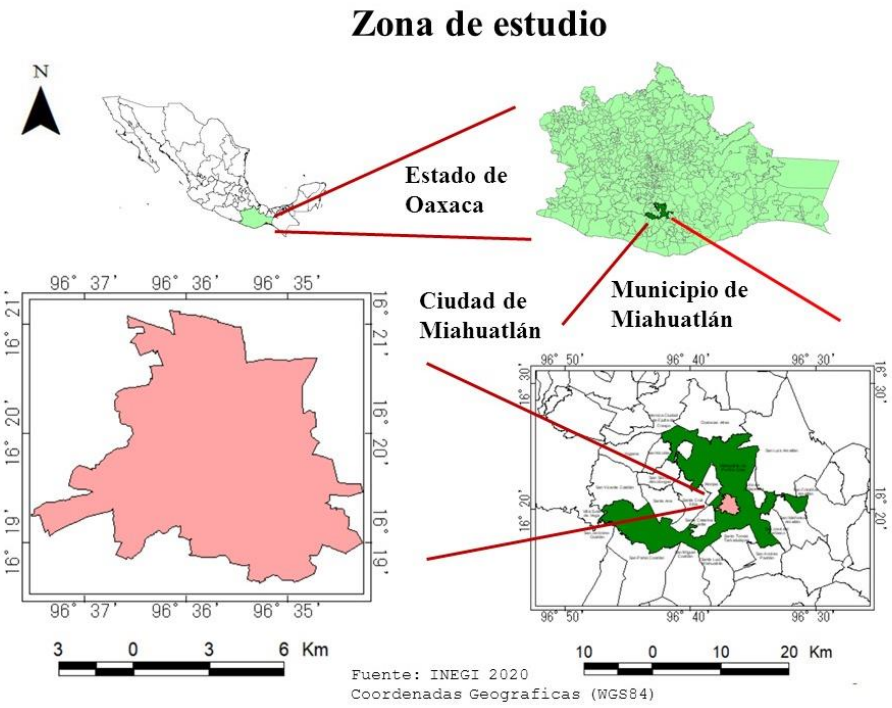


Figura 1. Localización de la ciudad de Miahuatlán.
Figure 1. Location of the city of Miahuatlan

Algunos de los géneros típicos del estrato arbóreo de la vegetación original de la región, observados en las periferias de la ciudad durante el trabajo de campo son: *Bursera, Ceiba, Eysenhardtia, Ficus, Fouquieria, Ipomoea, Leucaena, Lysiloma, Parmentiera, Pithecellobium, Plumeria, Prosopis, Psidium, Sapindus, Senegalia, Senna* y *Stenocereus*. En el estrato arbustivo se observaron géneros como *Acaciella, Amicia, Cestrum, Dodonaea, Lantana, Opuntia, Salvia, Tecoma, Vachellia* y *Wigandia*; y en el estrato herbáceo a *Bidens, Dyssodia, Erigeron Euphorbia, Ipomoea, Mimosa, Salvia* y *Solanum*. Sobre el curso del río y arroyos que cruzan la ciudad se desarrolla bosque de galería con presencia de especies de los géneros *Adiantum, Equisetum, Fraxinus, Salix, Xanthosoma,* y *Taxodium mucronatum* Ten. como especie dominante (Rzedowski, 2006).

Recolecta y determinación florística

De octubre de 2022 a septiembre de 2023 se hicieron recorridos sistemáticos por las 19 áreas verdes y/o arboladas de la zona consolidada de la ciudad de Miahuatlán (14 parques, dos áreas deportivas y tres calles arboladas), con el fin de medirlas mediante una cinta métrica y recolectar ejemplares y muestras botánicas de las plantas vasculares mediante la técnica de colecta propuesta por Sánchez y González (2007).

La forma biológica o hábito de crecimiento se determinó de acuerdo con los criterios propuestos por Font (2000) y Rzedowski (2006), la cual considera categorías distribuidas en tres atributos distintos: forma de crecimiento (árbol, arbusto y hierba), hábitat (litófita y epífita) y forma de nutrición (autótrofa y hemiparásita).

La determinación taxonómica de las especies se realizó con base en la consulta de trabajos taxonómicos y de especialistas; y la revisión de bibliografía florística y biogeográfica: Plantas medicinales del Distrito de Ocotlán, Oaxaca (Cervantes & Valdés, 1990); Flora fanerogámica del Valle de México (Calderón de Rzedowski & Rzedowski, 2005); Vegetación de México (Rzedowski, 2006); Plantas silvestres de Puebla (Rodríguez, Coombes, & Jimenez, 2009); Plantas ruderales del área urbana de Malinalco, Estado de México, México (Martínez-De La Cruz, y otros, 2015);

Conocimiento tradicional de plantas silvestres en una comunidad de los valles centrales de Oaxaca (Arrazola-Guendulay, Hernández-Santiago, & Rodríguez-Ortíz, 2018); Tribus de Asteraceae en México, morfología y clave de identificación (Redonda-Martínez, 2022); Vegetación viaria en el municipio de Malinalco, Estado de México, México (Martínez-De La Cruz, Vibrans, Lozada-Pérez, Romero-Manzanares, & Luna-Cavazos, 2024); y Las leguminosas del área natural protegida del Boquerón de Tonalá, Oaxaca, México (Sotuyo, Julio-Catarino, & Contreras-Jiménez, 2023). Las muestras se cotejaron con la colección del HUAP (Herbario de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla).

Se elaboró una base de datos en Microsoft Excel con toda la información y se utilizó este mismo programa para realizar los análisis estadísticos mencionados en el apartado: Determinación de la biodiversidad. La lista de especies se construyó de forma alfabética por grupos taxonómicos. El orden de las familias se hizo de acuerdo a los sistemas de clasificación propuestos por Christenhusz, *et al* (2011) para Gimnospermas y del Angiosperm Phylogeny Group [APG IV] (2016) para Angiospermas. La nomenclatura taxonómica y su validez se verificaron de acuerdo con Villaseñor (2004; 2016), Villaseñor, Ortiz, & Redonda-Martínez (2008), Villaseñor & Ortíz (2014), Martínez-De La Cruz, Villaseñor, Aguilera, & Arriaga (2018) y con las bases de datos del *International Plant Name Index* (IPNI, 2024) y *The World Flora Online* (WFO, 2024).

Para cada especie se determinó su estatus de origen (nativa o introducida), y la condición de especies ruderales que muchas de ellas presentan, sobre todo las herbáceas nativas. El estatus de la flora nativa en México y el origen geográfico de las especies introducidas se determinaron a través de la consulta de literatura florística como Rzedowski y Calderón de Rzedowski (1990), Villaseñor y Espinosa-García (2004), Villaseñor y Magaña (2006), Villaseñor (2016) y Martínez-De La Cruz et al. (2018); y de los sitios web *Tropicos* del *Missouri Botanical Garden* (2024), Malezas de México (Vibrans, 2006) y la *Encyclopedia of Life* (EOL) del *National Museum of Natural History* (NMNH, 2024).

Determinación de la biodiversidad

Para la evaluación de los patrones de diversidad alfa, se consideraron como especies de diagnóstico a las especies leñosas conforme a los principios del método fitosociológico y de la escuela norteamericana de aproximación a la vegetación (Alcaraz, 1999). Para cada especie de diagnóstico se determinó la abundancia a partir del número de individuos censados en las áreas verdes, considerándose únicamente a aquellos especímenes con un diámetro a la altura del pecho (DAP) ≥ 5 cm y para el caso de especies arborescentes como las palmeras, una altura mínima de 1.3 m (Benavides & García, 2023). La estimación se hizo con el índice de Margalef (D_{mg}) a través de la riqueza de especies (ecuación 1) y el índice de Pielou (J´) a través de la estructura de la comunidad (ecuación 2). Se utilizó el índice foráneo (Sa) para estimar el porcentaje de especies no nativas (ecuación 3).

$$D_{mg} = (S-1)/\ln(N) \quad (1)$$
$$J' = H'/H_{max} \quad (2)$$
$$Sa = (\frac{Si}{S})100 \quad (3)$$
$$H' = -\sum_{i=1}^{s} Pi(lnPi) \quad (4)$$
$$H_{max} = lnS \quad (5)$$
$$Pi = ni/N \quad (6)$$

Donde:
S=número de especies
N=número de todos los individuos de todas las especies
Si=número de especies introducidas
ni=número de individuos de la especie i
Pi=proporción de individuos de la especie i respecto al total de individuos N (abundancia relativa de la especie i) (Moreno, 2001; Magurran, 2004; Morales-Gallegos, y otros, 2023).;

Se usó también la regla 10-20-30, la cual estima la diversidad bajo el principio de que una especie arbórea no debe exceder su presencia más allá del 10%, un género del 20% y una familia del 30% (Almeida-Cerino, Bertolini, & Martínez-Trinidad, 2024).

RESULTADOS

Área de estudio

La ciudad de Miahuatlán cuenta con 19 áreas verdes, que van desde los 81 m^2 hasta los 56 602 m^2, y que en total suman 135 484 m^2. Considerando su población de 29 130 habitantes (INEGI, 2020), se tiene una provisión de 4.65 m^2/ hab.

Riqueza florística

La flora registrada en las áreas verdes de la zona de estudio se compone de un total de 151 especies agrupadas en 118 géneros y 50 familias (Tabla 1). Siete especies fueron gimnospermas y 144 angiospermas. Las eudicotiledóneas representaron poco más del 75% de las especies, géneros y familias (Tabla 2). Seis familias registraron 63 especies concentrando el 42% del total, destacan por su riqueza Fabaceae (18), Asparagaceae (10), Asteraceae (10) y Solanaceae (10) (Figura 2). Las familias con mayor número de géneros son Fabaceae (16), Asteraceae (9) y Arecaceae (6) (Figura 2). La familia Fabaceae es la mejor representada con el 12% de las especies (18) y el 14% de los géneros (16). Los géneros con mayor número de especies fueron *Agave* (7), *Solanum* (7), *Euphorbia* (6) y *Ficus* (4) (Figura 3).

Tabla 1. Lista de especies presentes en las áreas verdes de Miahuatlán, Oaxaca, México.
Table 1. List of species present in the green areas of Miahuatlan, Oaxaca, Mexico.

Familia y especie	FC/H/N	Ind	Origen
GIMNOSPERMAS			
PINIDAE			
ARACAURIACEAE (1/1)			
Araucaria heterophylla (Salisb.) Franco	Ar/L/A	2	I (Oc)
CUPRESSACEAE (3/5)			
Cupressus lusitanica Mill.	Ar/L/A	16	I (Mx)
Cupressus sempervirens L.	Ar/L/A	82	I (Eu)
Cupressus x leylandii A.B. Jacks. & Dallim.	Ar/L/A	5	I (Eu)
Juniperus flaccida Schltdl.	Ar/L/A	1	N
Platycladus orientalis (L.) Franco	Ar/L/A	14	I (As)
PINACEAE (1/1)			
Pinus montezumae Lamb.	Ar/L/A	1	I (Mx)
ANGIOSPERMAS (MAGNOLIIDAE)			
MAGNÓLIDAS			
ANNONACEAE (1/1) *Annona cherimola* Molino	Ar/L/A	2	N
MONOCOTILEDÓNEAS			
AMARYLLIDACEAE (1/1)			
Hippeastrum sp.	He/L/A		I (Mx-SA)
ARACEAE (2/2)			
Dieffenbachia seguine (Jacq.) Schott	He/L/A		I (Mx-SA)
Zantedeschia sp.	He/L/A		I (Af)
ARECACEAE (6/7)			
Brahea armata S.Watson	He/L/A		I (Mx)

Familia y especie	FC/H/N	Ind	Origen
Chamaedorea seifrizii Burret	He/L/A	3	I (Mx-SA)
Cocos nucifera L.	He/L/A		I (Oc)
Phoenix roebelenii O´Brien	He/L/A		I (As)
Roystonea regia (Kunth) O.F.Cook	He/L/A	4	I (Mx-CA)
Washingtonia filifera (Linden ex André) H.Wendl. ex de Bary	He/L/A	3	I (Mx-NA)
Washingtonia robusta H. Wendl.	He/L/A	7	I (Mx)
ASPARAGACEAE (4/10)			
Agave americana var. *marginata* Trel.	He/L/A	5	I (Mx)
Agave lyobaa García-Mend. & S. Franco	He/L/A	1	N
Agave angustifolia Haw.	He/L/A	1	I (Mx-CA)
Agave karwinskii Zucc.	He/L/A	5	N
Agave kerchovei Lem.	He/L/A		N
Agave marmorata Roezl	He/L/A	7	N
Agave potatorum Zucc	He/L/A	4	N
Cordyline fruticosa (L.) A.Chev	He/L/A		I (As)
Sansevieria trifasciata Prain	He/L/A		I (Af) (Rud)
Yucca aloifolia L.	At/L/A		N
ASPHODELACEAE (1/1)			
Aloe vera (L.) Burm.f.	He/L/A		I (As)
CANNACEAE (1/1)			
Canna indica L.	He/L/A		I (Mx-SA)
MUSACEAE (1/1)			
Musa x paradisiaca L.	He/L/A	1	I (As)
POACEAE (4/4)			
Arundo donax L.	He/L/A		I (As) (Rud)
Cenchrus echinatus L.	He/L/A		N (Rud)
Chloris submutica Kunth	He/L/A		N (Rud)
Melinis repens (Willd.) Zizka	He/L/A		I (Af) (Rud)
EUDICOTILEDÓNEAS			
AMARANTHACEAE (1/1)			
Amaranthus spinosus L.	He/L/A		N (Rud)
ANACARDIACEAE (3/4)			
Mangifera indica L.	Ar/L/A	2	I (As)
Pistacia vera L.	Ar/L/A	8	I (As)
Schinus areira L.	Ar/L/A	22	I (SA)
Schinus terebinthifolius Raddi	At/L/A		I (SA)
APOCYNACEAE (5/5)			
Asclepias glaucescens Kunth	He/L/A		N (Rud)
Cascabela thevetia (L.) Lippold	At/L/A	1	N

Familia y especie	FC/H/N	Ind	Origen
Catharanthus roseus (L.) G.Don	He/L/A		I (Af)
Nerium oleander L.	At/L/A	5	I (VM)
Plumeria rubra L.	At/L/A	10	N
ARALIACEAE (2/2)			
Hedera helix L.	He/L/A		I (VM)
Schefflera actinophyla (Endl.) Harms	Ar/L/A	1	I (Oc)
ASTERACEAE (9/10)			
Barkleyanthus salicifolius (Kunth) H.Rob. & Brettell	At/L/A	6	N
Bidens pilosa L.	He/L/A		N (Rud)
Brickellia veronicifolia (Kunth) A.Gray	He/L/A		N (Rud)
Dyssodia decipiens (Bartl.) M.C.Johnst. ex M.C Johnst. & B.L.Turner	He/L/A		N (Rud)
Erigeron canadensis L.	He/L/A		N (Rud)
Erigeron longipes DC.	He/L/A		N (Rud)
Psilactis brevilingulata Sch.Bip. ex Hemsl.	He/L/A		N (Rud)
Sanvitalia procumbens Lam.	He/L/A		N (Rud)
Sonchus oleraceus L.	He/L/A		I (Eu) (Rud)
Tagetes sp.	He/L/A		N (Rud)
BIGNONIACEAE (5/5)			
Jacaranda mimosifolia D.Don	Ar/L/A	313	I (CA-SA)
Parmentiera aculeata (Kunth) Seem.	Ar/L/A	2	N
Spathodea campanulata Beauv.	Ar/L/A	7	I (Af)
Tabebuia rosea (Bertol.) Bertero ex A.DC.	Ar/L/A	60	I (Mx-SA)
Tecoma stans (L.) Juss.ex Kunth	At/L/A	73	N
BORAGINACEAE (3/3)			
Cordia curassavica (Jacq.) Roem. & Schult.	At/L/A		N (Rud)
Ehretia tinifolia L.	Ar/L/A	39	I (Mx-CA)
Wigandia urens (Ruiz & Pav.) Kunth	At/L/A	2	N (Rud)
BURSERACEAE (1/2)			
Bursera bipinnata (Moc. & Sessé ex DC.) Engl.	Ar/L/A	1	N
Bursera glabrifolia (Kunth) Engl.	Ar/L/A	2	N
BUXACEAE (1/1)			
Buxus sempervirens L.	At/L/A		I (Eu)
CACTACEAE (4/4)			
Lophocereus marginatus (DC.) S.Arias & Terrazas	At/L/A	20	N
Myrtillocactus schenckii (J.A.Purpus) Britton & Rose	At/L/A	2	I (Mx-CA)
Opuntia auberi Pfeiff.	At/L/A	2	N
Stenocereus griseus (Haw.) Buxb.	Ar/L/A	1	N
CASUARINACEAE (1/1)			
Casuarina equisetifolia L.	Ar/L/A	131	I (Oc)

Familia y especie	FC/H/N	Ind	Origen
CELASTRACEAE (1/1)			
Euonymus japonicus Thunb.	At/L/A	6	I (As)
CONVOLVULACEAE (1/1)			
Ipomoea intrapilosa Rose	Ar/L/A	3	N
CRASSULACEAE (1/1)			
Echeveria elegans Rose	He/L/A		I (Mx)
ERICACEAE (1/1)			
Rhododendron indicum (L.) Sweet	At/L/A		I (As)
EUPHORBIACEAE (3/8)			
Cnidoscolus aconitifolius (Mill.) I.M.Johnst	At/L/A	14	N
Euphorbia cotinifolia L.	At/L/A	2	I (SA)
Euphorbia hypericifolia L.	He/L/A		N (Rud)
Euphorbia milii Des Moul.	At/L/A		I (Af)
Euphorbia prostrata Aiton	He/L/A		N (Rud)
Euphorbia pulcherrima Willd. Ex Klotzsch	At/L/A	17	N
Euphorbia tirucalli L.	At/L/A	4	I (Af)
Ricinus communis L.	At/L/A	23	I (Af) (Rud)
FABACEAE (16/18)			
Acaciella angustissima (Mill.) Britton & Rose	At/L/A	2	N
Amicia zygomeris DC.	At/L/A		N
Bauhinia variegata L.	Ar/L/A	2	I (As)
Cassia fistula L.	Ar/L/A	2	I (VM)
Dalea foliolosa (Aiton) Barneby	He/L/A		N (Rud)
Delonix regia (Hook.) Raf.	Ar/L/A	7	I (Af)
Eysenhardtia polystachya (Ortega) Sarg.	Ar/L/A	1	N
Leucaena diversifolia (Schltdl.) Benth.	Ar/L/A	3	N
Leucaena esculenta (DC.) Benth.	Ar/L/A	38	N
Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit	Ar/L/A	5	N
Lysiloma acapulcense (Kunth) Benth.	Ar/L/A	10	N
Macroptilium atropurpureum (DC.) Urb.	He/L/A		N (Rud)
Pithecellobium dulce (Roxb.) Benth.	Ar/L/A	15	N
Prosopis juliflora (Sw.) DC.	Ar/L/A	9	N
Senegalia hayesii (Benth.) Britton & Rose	Ar/L/A	1	N
Senna wislizeni (A.Gray) H.S.Irwin & Barneby	At/L/A	17	N
Tamarindus indica L.	Ar/L/A	2	I (Af)
Vachellia farnesiana (L.) Wight & Arn.	At/L/A	1	N
GERANIACEAE (1/1)			
Geranium sp.	He/L/A		I (VM)
LAMIACEAE (1/1)			
Salvia mexicana L.	He/L/A		N (Rud)

Familia y especie	FC/H/N	Ind	Origen
LORANTHACEAE (2/2)			
Psittacanthus calyculatus (DC.) G. Don.	He/Ep/He		N
Struthanthus interruptus (Kunth) G. Don	He/Ep/He		N
MALVACEAE (3/4)			
Ceiba pentandra (L.) Gaertn	Ar/L/A	17	I (Mx-CA)
Hibiscus elatus Sw.	Ar/L/A	27	I (CA)
Hibiscus rosa-sinensis L.	At/L/A	8	I (As)
Sida rhombifolia L.	At/L/A		N (Rud)
MELIACEAE (2/2)			
Cedrela odorata L.	Ar/L/A	17	I (Mx-SA)
Melia azedarach L.	Ar/L/A	52	I (As)
MORACEAE (1/4)			
Ficus benjamina Lin	Ar/L/A	124	I (As)
Ficus crocata (Miq.) Mart. ex Miq.	Ar/L/A	2	N
Ficus insipida Willd.	Ar/L/A	2	N
Ficus retusa L.	Ar/L/A	18	I (As)
MYRTACEAE (2/2)			
Eucalyptus globulus Labill.	Ar/L/A	6	I (Oc)
Psidium guajava L.	Ar/L/A	2	N
NYCTAGINACEAE (2/2)			
Bougainvillea spectabilis Willd.	At/L/A	125	I (SA)
Mirabilis jalapa L.	He/L/A		N (Rud)
OLEACEAE (1/1)			
Ligustrum lucidum W. T. Aiton	Ar/L/A	1	I (As)
PAPAVERACEAE (1/1)			
Argemone ochroleuca Sweet	He/L/A		N (Rud)
PLANTAGINACEAE (1/1)			
Plantago major L.	He/L/A		I (VM) (Rud)
PLATANACEAE (1/1)			
Platanus mexicana Moric.	Ar/L/A		I (Mx-SA)
ROSACEAE (3/4)			
Eriobotrya japonica (Thunb.) Lindl.	At/L/A	3	I (As)
Prunus persica (L.) Batsch	At/L/A		I (As)
Rosa centifolia L.	At/L/A	1	I (VM)
Rosa spp.	At/L/A	2	I (VM)
RUTACEAE (1/2)			
Citrus limon (L.) Osbeck	At/L/A		I (VM)
Citrus reticulata Blanco	At/L/A	1	I (As)
SANTALACEAE (1/1)			
Phoradendron sp.	He/Ep/He		N

Familia y especie	FC/H/N	Ind	Origen
SAPINDACEAE (2/2)			
Sapindus saponaria L.	Ar/L/A	5	N
Dodonaea viscosa (L.) Jacq.	At/L/A	85	N
SCROPHULARIACEAE (1/1)			
Buddleja cordata Kunth	At/L/A	1	N
SOLANACEAE (4/10)			
Cestrum dumetorum Schltdl.	At/L/A	1	N
Nicotiana glauca Graham	At/L/A	3	I (SA) (Rud)
Physalis lagascae Roem. & Schult.	He/L/A		N (Rud)
Solanum americanum Mill.	He/L/A		N (Rud)
Solanum citrinum M. Nee	At/L/A	1	N (Rud)
Solanum erianthum D. Don	At/L/A		N (Rud)
Solanum hazenii Britton	At/L/A	1	N
Solanum lanceolatum Cav.	He/L/A		N (Rud)
Solanum rostratum Dunal	He/L/A		N (Rud)
Solanum rudepannum Dunal	He/L/A		N (Rud)
THEACEAE (1/1)			
Camellia sp.	At/L/A	1	I (As)
VERBENACEAE (2/4)			
Duranta erecta L.	At/L/A		I (Mx-SA)
Lantana achyranthifolia Desf.	At/L/A		N
Lantana camara L.	At/L/A		N
Lantana velutina M. Martens & Galeotti	At/L/A		N
ZYGOPHYLLACEAE (1/1)			
Kallstroemia rosei Rydb	He/L/A		N (Rud)
Total		**1562**	

Abreviaturas: FC: Forma de crecimiento, Ar: Árbol, At: Arbusto, He: Hierba; H: Hábitat, L: Litófita, Ep: Epífita; N: Tipo de nutrición, A: Autótrofa, He: Hemiparásita; Ind: Número de individuos; I: Introducida, N: Nativa, Oc: Oceanía, Eu: Europa, As: Asia, Af: África, VM: Viejo Mundo, Mx: México, SA: Sudamérica, CA: Centroamérica, Mx-SA: México a Sudamérica, Mx-CA: México a Centroamérica, Mx-NA: México a Norteamérica; CA-SA: Centroamérica a Sudamérica, Cos: Cosmopolita, Rud: Ruderal.

Forma de crecimiento, forma de nutrición y hábitat

Con relación a la forma de crecimiento, las herbáceas representaron el 38% de la flora con un total de 58 especies, los arbustos el 31% con 46 especies y los árboles el 31% con 47 especies. De acuerdo al tipo de nutrición, se registraron 148 especies autótrofas (98%) y tres especies hemiparásitas (2%). Respecto al hábitat, 148 especies son litófitas (98%) y tres son epífitas (2%).

Tabla 2. Riqueza florística de las áreas verdes de Miahuatlán
Table 2. Floral richness of the green areas of Miahuatlan

Clases	Familias	Géneros	Especies
Gimnospermas	3 (6%)	5 (4.2%)	7 (4.6%)
Magnólidas	1 (2%)	1 (0.9%)	1 (0.7%)
Monocotiledóneas	8 (16%)	20 (16.9%)	27 (17.9%)
Eudicotiledóneas	38 (76%)	92 (78%)	116 (76.8%)
Total	**50**	**118**	**151**

Origen geográfico

Respecto al estatus migratorio, 77 especies son nativas de los ecosistemas naturales donde se asienta la ciudad de Miahuatlán (51%) y 74 especies son introducidas (49%). Las especies nativas son originarias de matorral xerófilo o de selva caducifolia, y en muchos de los casos de ambos ecosistemas. Es el caso de 30 de las 37 especies ruderales, las cuales son originarias de ambos ecosistemas y se relacionan con ambientes transformados por la acción humana como jardines, huertos, lotes baldíos u orillas de las vías de comunicación, entre otros. Las otras siete especies ruderales son introducidas.

Las especies introducidas tienen diferentes orígenes geográficos. Aunque 20 son originarias de regiones biogeográficas que incluyen a México, para este trabajo se consideran como introducidas por ser originarias de otros ecosistemas, por ejemplo, *Cupressus lusitanica* Mill. y *Pinus montezumae* Lamb. Siete proceden de otras regiones del continente americano y 47 de otros continentes, sobre todo de Asia. Dado el origen incierto de algunas especies, su amplia distribución y los criterios variados de los autores, ocho especies solo se refieren como originarias del Viejo Mundo sin que se especifique el continente.

Análisis de la información

Las especies de diagnóstico (leñosas) fueron 88 de las cuales 41 fueron nativas y 47 introducidas. La diversidad alfa de especies, de acuerdo al índice de Margalef fue de 11.83 y de acuerdo al índice de Pielou de 0.49. Conforme al índice foráneo, el 53% de las especies de diagnóstico son introducidas y respecto a la regla 10-20-30, *Jacaranda mimosifolia* D.Don la rebasa (20%), el género *Jacaranda* se ajusta al límite (20%) y la familia Bignoniaceae se acerca muy estrechamente al límite (29%).

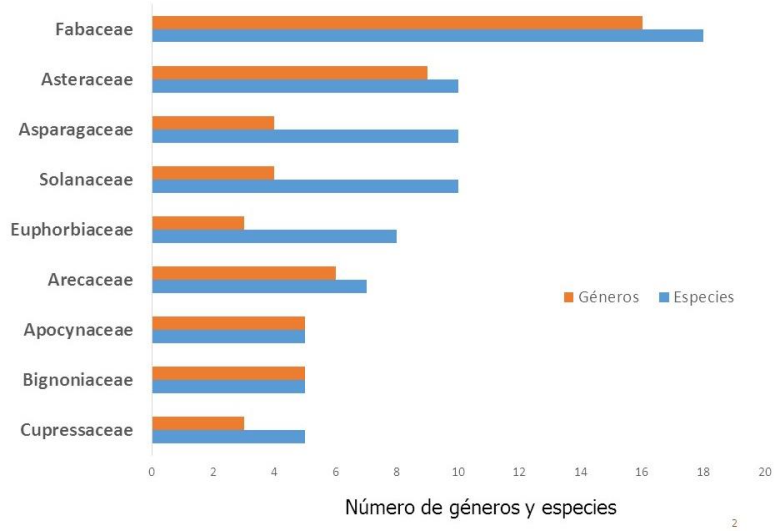


Figura 2. Número de especies y géneros de las familias más representativas de las áreas verdes de Miahuatlán, Oaxaca.
Figure 2. Number of species and genera of the most representative families in the green areas of Miahuatlan, Oaxaca.

DISCUSIÓN

La provisión de área verde por habitante (4.65 m^2) de la ciudad de Miahuatlán, aunque por encima de la media nacional (2.1 m^2/habitante) (CMM, 2017) y de la media para América Latina (3.5 m^2/habitante) (BID, 2014), es inferior a lo recomendados para conglomerados urbanos por la Organización Mundial de la Salud (9 a 15 m^2/hab) (Banco Mundial & Schaeffer, 2016; ICMA, 2020).

Esta condición sitúa a la ciudad de Miahuatlán en un contexto de carencia en la materia, que de no atenderse se acentuará en un futuro próximo dadas las tendencias de crecimiento poblacional actuales (Ramirez-Ospitia, Ramírez-Arellanes, Maya-Lucas, & Sánchez-Hernández, 2017) y al hecho de que el municipio no cuenta con una política de aprovisionamiento de espacios verdes para la ciudad.

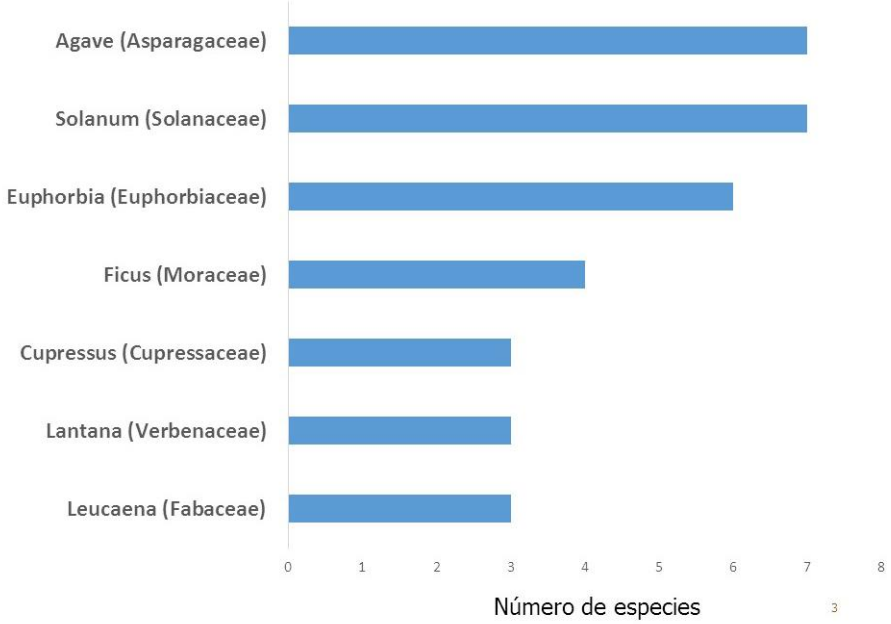


Figura 3. Géneros con mayor número de especies de las áreas verdes de Miahuatlán.
Figure 3. Genera with the greatest number of species in the green areas of Miahuatlan.

Respecto a la flora de las áreas verdes, su composición refleja prácticamente una condición de igualdad entre la presencia de especies introducidas (49%) y de especies nativas (51%). Estos resultados concuerdan con los reportados para las áreas verdes de Tapachula, Chiapas en las que las especies introducidas (65) están en igualdad numérica a las especies nativas (65) (Almeida-Cerino, Bertolini, & Martínez-Trinidad, 2024). La ciudad de Tapachula, por contraste, es una ciudad de mayores dimensiones que Miahuatlán, lo que haría suponer que esta última aun conservaría mayores elementos nativos en sus espacios verdes dada su mayor cercanía con el espacio rural. Sin embargo, los resultados respaldan una práctica muy generalizada en esta región, que es considerar de mayor valor a la flora introducida sobre la flora nativa, por lo que es común retirar toda la flora originaria e introducir especies en afinidad con el modelo europeo de paisaje verde ampliamente adoptado en el mundo (Bernal, Navarro, & Moreno, 2019).

Así, la sobrevivencia de muchas especies nativas en lo que eran sus hábitats originarios ha sido posible no por acciones de conservación de la flora autóctona, sino por la falta de manejo de estos espacios que hubiese significado la introducción de especies. Es el caso de especies sinantrópicas relacionadas con ambientes alterados, pertenecientes sobre todo a las familias Asteraceae y Solanaceae que son de las que presentan mayor riqueza de especies nativas. La presencia de estas familias, que se conforman principalmente de especies conocidas como ruderales, está en concordancia con resultados para otros ambientes urbanos como la flora de la ciudad de México (Vibrans, 1998) y Malinalco en el Estado de México (Martínez-De La Cruz, Vibrans, Lozada-

Pérez, Romero-Manzanares, & Luna-Cavazos, 2024). Y para el caso particular de la familia Asteraceae, el ser la familia más diversa en la República Mexicana (Villaseñor, 2018) y a que muchas de sus especies se ven favorecidas por el disturbio (Redonda-Martínez & Villaseñor-Ríos, 2011).

Este número sustancial de especies nativas ruderales, 30 de 37 totales, concuerda con el hecho de que México es un centro de evolución de malezas. Además de ser las especies ruderales una parte importante de la biodiversidad del país y aportar el 12.3% de la flora total (Rzedowski, 1991; Martínez-De La Cruz, y otros, 2015).

Otras familias con fuerte presencia en las áreas verdes fueron Asparagaceae y Fabaceae. En el caso de Asparagaceae, además de estar constituida por especies propias de la región, en los últimos tiempos se han empezado a cultivar especies del género *Agave* por considerarse que constituyen elementos estéticamente atractivos. Por su parte Fabaceae presentó la mayor riqueza de especies, sobre todo arbóreas y arbustivas. Su mayor presencia, considerando la vegetación leñosa, coincide con estudios realizados en selva baja caducifolia del Istmo-Costa de Oaxaca donde Fabaceae presentó la mayor riqueza de especies (Silva-Aparicio, Castro-Ramírez, Castillo-Campos, & Perales, 2018). Y concuerda también con otros estudios en ambientes urbanos, como el realizado en áreas verdes urbanas de Tapachula, Chiapas, México donde Fabaceae es también la familia con mayor riqueza de especies arbóreas y arbustivas (Almeida-Cerino, Bertolini, & Martínez-Trinidad, 2024). Todos estos resultados muestran que la mayor riqueza de especies de las familias Asparagaceae, Asteraceae, Fabaceae y Solanaceae es concordante con el hecho de que se encuentran entre las 15 familias más ricas y frecuentes de México (Villaseñor, 2003).

A nivel de género la mayor riqueza la presentaron *Agave y Solanum*. La riqueza del primero está relacionada con el hecho de que muchas de las especies de este género son especies clave en ecosistemas del país (Eguiarte & Souza, 2007), como es el caso del matorral xerófilo el cual es uno de los ecosistemas originarios donde se asienta la ciudad de Miahuatlán, y a que Oaxaca es el estado de la república con mayor riqueza de Agaváceas (Golubov, Mandujano, Arizaga, Martínez-Palacios, & Koleff, 2007). Así como la importancia que han adquirido varias especies de este género, en recientes años, por el auge de la producción de mezcal que ha potenciado su cultivo (Vázquez-Pérez, y otros, 2020), y por el reconocimiento ascendente de su belleza que ha llevado a que sea conservado e incluso cultivado con propósitos estéticos.

La riqueza del género *Solanum* es congruente con que es un género altamente representado en la República Mexicana (Villaseñor, 2004), particularmente en la selva baja caducifolia de Oaxaca (Salas-Morales, Schibli, Nava-Zafra, & Saynes-Vázquez, 2007). Y con el hecho de que muchas especies ruderales le pertenecen (Flores-Huitzil, Coombes, & Villaseñor, 2020).

Dentro de la flora introducida se encuentran especies sinantrópicas, aunque la mayoría son taxones con fines ornamentales. El porcentaje de especies ruderales introducidas (19%) se ubica entre el 14% de especies ruderales exógenas de un ambiente rural como lo es la carretera de Malinalco (Martínez-De La Cruz, Vibrans, Lozada-Pérez, Romero-Manzanares, & Luna-Cavazos, 2024) y el 26% de especies ruderales exógenas de un ambiente urbano como la ciudad de Malinalco (Martínez-De La Cruz, y otros, 2015). Este resultado adquiere sentido en tanto Miahuatlán es una ciudad pequeña con una cercanía aún muy estrecha a su entorno rural dadas sus dimensiones territoriales, lo que aún permite la sobrevivencia de un mayor número de especies ruderales nativas que en otros ambientes urbanos más extensos.

De las especies sinatrópicas resaltan *Melinis repens* (Willd.) Zizka y *Ricinus communis* L. consideradas como invasoras extremas (Boege & Bojorquez, 2024). Otra especie sinantrópica importante es *Arundo donax* L., históricamente muy apreciada por su utilidad en trabajos de construcción, cestería y como forraje, sin embargo, dados los cambios en los estilos de vida de la población su uso ha decaído, lo que ha propiciado el aumento de su distribución.

Respecto a la flora introducida con fines ornamentales, algunas de ellas son nativas del territorio mexicano, sin embargo, para efectos de este trabajo se consideran como introducidas ya que de manera natural no crecen en esta región por ser nativas de otros ecosistemas. Tal es el caso de *Pinus montezumae* Lamb. que es nativa de bosque de pino localizado en la región de la sierra sur de Oaxaca, e incluso *Agave angustifolia* Haw. reportado desde Sonora, México hasta Panamá, pero que en Oaxaca tiene presencia de manera natural en otras regiones que no incluye Miahuatlán (CONABIO, 2018) a donde fue introducida con fines comerciales para la producción de mezcal (García & González , 2021).

Núm. 60: 39-59 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Al ser las áreas verdes espacios impactados y manipulados, es previsible que los valores por tipo de hábito difieran del patrón indicado por Villaseñor (2004) para géneros de plantas vasculares de México en zonas silvestres. Sin embargo, los valores por tipo de hábito en las áreas verdes de Miahuatlán: 39% de los géneros incluyen herbáceas, 30% arbustos y 31% árboles; permiten percibir un cierto acercamiento a este patrón, lo cual puede explicarse dada la profusa presencia de especies ruderales, sobre todo de herbáceas.

Estos valores dan cuenta de que tan solo con no retirar las especies ruderales de las áreas verdes urbanas el ecosistema empieza a asemejarse a un ecosistema silvestre, resultados que cuestionan la pertinencia del modelo dominante de que un área verde debe contener árboles y arbustos, y solo pasto en el estrato herbáceo (Alonso, 2015). Dejar atrás este modelo significaría aceptar a estas mal llamadas malezas y promover su permanencia a través de su cultivo, reconociendo con ello que su presencia en estos espacios, sobre todo de las herbáceas, les provee de belleza y riqueza florística. Riqueza que se torna fundamental al permitir el sostenimiento de las cadenas tróficas en los ecosistemas urbanos que de otra manera se derrumban.

La evaluación de la biodiversidad del ecosistema compuesto por las áreas verdes, arrojó un valor de 11.83 de acuerdo al Índice de Margalef. Este valor es indicativo de que existe una alta diversidad alfa derivada de la gran riqueza específica mostrada en las 88 especies leñosas presentes. Este resultado es superior al reportado para la ciudad de Texcoco, con una abundancia muy similar, pero con solo 53 especies (Morales-Gallegos, y otros, 2023).

Sin embargo, de acuerdo al Índice de Pielou cuyo valor fue de 0.49, esta diversidad ya no se muestra tan alta y presenta más bien un nivel medio, indicativo de que la estructura de la comunidad muestra desequilibrios derivados de la representatividad que las diversas especies tienen en el ecosistema. Esto es que, la abundancia por especie es altamente desigual, pues mientras hay especies con solo uno o dos individuos, sobre todo de especies nativas como *Ficus crocata* (Miq.) Mart. ex Miq. y *Ficus insipida* Willd. que solo registran dos individuos cada una; existen especies con una gran cantidad de especímenes, sobre todo de especies introducidas, como son los casos de *Ficus benjamina* Lin con 124 individuos, *Bougainvillea spectabilis* Willd., con 125 individuos, *Casuarina equisetifolia* L. con 131 individuos y *Jacaranda mimosifolia* D.Don con 313 individuos; de una población total en las áreas verdes de 1 562 individuos. Esta situación es común en otras ciudades como Tuxtla Gutiérrez, Chiapas donde *Ficus benjamina* Lin y *Terminalia catappa* L., ambas especies introducidas, suman el 52.9% del total de árboles de una diversidad de 114 especies (Román-Guillén, y otros, 2019).

La alta abundancia de *Jacaranda mimosifolia* D.Don se corrobora con la regla 10-20-30, ya que su especie representa el 20% del total de individuos de todas las especies y lo que también hace que el género *Jacaranda* se ajuste al 20% de representatividad. Y que en conjunto con la especie nativa *Tecoma stans* (L.) Juss.ex Kunth con 73 individuos y la especie introducida *Tabebuia rosea* (Bertol.) Bertero ex A.DC. con 60 individuos, hagan que la familia Bignoniaceae, a la cual pertenecen, se acerque estrechamente al límite de representatividad con un 28.5%. Esta sobrerrepresentación de algunos taxones, sobre todo de especies introducidas, se observa también en otras ciudades del país y del mundo como Tapachula, Chiapas donde *Ficus microcarpa* L. f. rebasa el 10% en abundancia y el género *Citrus* el 20% (Almeida-Cerino, Bertolini, & Martínez-Trinidad, 2024).

De acuerdo al Índice Foráneo el 54% de las especies de diagnóstico son introducidas. Estos resultados marcan una tendencia observada en otras ciudades como Texcoco, México donde la mayoría de áreas verdes presentan un porcentaje de especies introducidas mayor al 50%, e incluso de 100% en algunos espacios. Y de las tres especies con mayor abundancia en esa ciudad, se encuentran *Casuarina equisetifolia* L. y *Jacaranda mimosifolia* D.Don (Morales-Gallegos, y otros, 2023).

Estos resultados son de importancia para los ecosistemas urbanos en la medida en que son las plantas la base de múltiples relaciones entre organismos, al ser la base alimenticia y de refugio que permite la sobrevivencia de poblaciones de organismos heterótrofos como insectos, anfibios, reptiles, aves y mamíferos. Y si las plantas introducidas sustituyen a las nativas, la disposición de alimento para la trama alimenticia que se sustenta en ésta se derrumba contribuyendo con todos esos procesos de extinción de especies que hoy por hoy son uno de los graves problemas ambientales a que se enfrenta la humanidad.

CONCLUSIONES

La ciudad de Miahuatlán debe construir una política pública que le permita resolver la actual insuficiencia de área verde dentro de la ciudad y enfrentar las necesidades en la materia en el futuro dado el previsible crecimiento poblacional y de la mancha urbana. Política que deben instrumentar las demás ciudades pequeñas y medias del país

La biodiversidad es aún de media a alta en la ciudad, sin embargo, esta condición puede seguir reduciéndose si se continúa con la tendencia actual de desestimar las especies nativas y promover la proliferación de solo algunas especies introducidas. Esta consideración adquiere relevancia en ciudades ubicadas en sitios áridos, como lo es Miahuatlán, donde el cambio climático ha acentuado las bajas precipitaciones y la disposición de agua para fines domésticos. Por lo que acciones de reforestación se hacen acuciantes para tratar de mitigar este fenómeno y el uso de plantas autóctonas se hace de lo más pertinente dada su capacidad de adaptación a condiciones de sequedad por ser de la región, recomendación ya hecha para otras ciudades ubicadas en zonas áridas como Hermosillo, México (Bernal, Navarro, & Moreno, 2019).

El cambio de paradigma en la reforestación de áreas urbanas debe poner especial énfasis en aquellas especies con poca presencia y en la reintroducción de especies nativas ausentes. Es el caso en Miahuatlán de *Ceiba aesculifolia* (Kunth) Britten & Baker f. y *Pistacia mexicana* Kunth; árboles nativos de la región ya ausentes en la zona urbana consolidada. Esta reforestación se debe hacer a la par de retirar paulatinamente individuos de especies introducidas, sobre todo de las sobreabundantes. Este cambio de modelo implica también el revalorar a las plantas ruderales nativas como un elemento que contribuye a la riqueza florística de estos espacios, y dejar de considerar que el estrato herbáceo solo debe conformarse de pasto, con su alta demanda de agua situación insostenible y absurda en ambientes áridos.

Así, ante el retroceso que experimenta la vegetación nativa en la zona rural que rodea a la ciudad, podrían las áreas verdes de la población convertirse en un refugio para toda esa flora. Creándose con ello una nueva manera de emprender las acciones de conservación y salvaguarda del patrimonio natural y mejorando la provisión de los servicios ambientales que se les relacionan.

LITERATURA CITADA

Alcaraz, A. F. (1999). *Manual de teoría y práctica de geobotánica.* ICE Universidad de Murcia y Diego Marín.

Almeida-Cerino, C. M., Bertolini, V., & Martínez-Trinidad, T. (2024). Estructura y diversidad florística en áreas verdes urbanas de la ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 15*(83), 131154. http://dx.doi.org/10.29298/rmcf.v15i831457

Alonso, M. M. (2015). *Diseño de áreas verdes con criterios ecológicos.* Madrid: Instituto Juan de Herrera. Obtenido de https://polired.upm.es/index.php/ciur/article/view/3188/3272

Alvarez, L. R. (1997). *Geografía general del estado de Oaxaca.* Carteles Editores-PGO.

Angiosperm Philogeny Group IV. (2016). An update of th Angiosperm Philogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. *Botanical Journal of the Linnean Society, 181*(1), 1-20. http://dx.doi.org/10.1111/boj.12385

Arrazola-Guendulay, A. A., Hernández-Santiago, A., & Rodríguez-Ortíz, G. (2018). Conocimiento tradicional de plantas silvestres en una comunidad de los valles centrales de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas, 5*(1), 55-78.

Banco Mundial, & Schaeffer, I. (2016). *Cuatro maneras de construir las ciudades del futuro.* Obtenido de https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2016/11/03/cuatro-maneras-construir-ciudades-futuros

Benavides, M. H., & Fernández, G. D. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera y Bosques, 18*(2), 51-71. https://doi.org/10.21829/myb.2012.182352

Benavides, M. H., & García, P. N. (2023). Características del arbolado del Panteón Civil Dolores y valoración de sus servicios ambientales. *Madera y Bosques, 29*(2), e2922533. http://dx.doi.org/10.21829/myb.2023.2922533

Bernal, G. M., Navarro, N. L., & Moreno, V. J. (2019). Adopción de especies nativas en la gestón de espacios verdes públicos sostenibles: El caso de Hermosillo. *Frontera Norte, 31*(15), 1-27. https://doi.org/10.33679/rfn.vlil.2049

BID. (2014). *Inicativa de ciudades emergentes y sostenibles.* Banco Interamericano de Desarrollo. Obtenido de https://blogs.iadb.org/ciudades-sostenibles/es/tag/iniciativa-de-ciudades-emergentes-y-sostenibles/

Boege, K., & Bojorquez , L. (2024). *Monitoreo del estado de las invasiones biológicas de plantas en México*. Obtenido de http://www.unibio.unam.mx/invasoras/

Bollo, M. M., Martín, M. G., & Martínez , S. A. (2022). Las áreas verdes de la ciudad de Morelia, Michoacan, México. *Investigaciones Geográficas*, 1-22. http://dx.doi.org/10.14350/rig.60494

Calderón de Rzedowski, G., & Rzedowski, J. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México* (Segunda ed.). Instituto de Ecología A. C. y Comisión para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Cervantes, S. L., & Valdés, G. J. (1990). Plantas medicinales del Distrito de Ocotlán, Oaxaca. *Anales del Instituto de Biología, serie Botánica, 60*(01), 85-103. Obtenido de https://www.revistas.unam.mx/index.php/bot/article/view/1819

Christenhusz, M. J., Reveal, J. L., Farjon, A., Gardner, M. F., Mill, R. R., & Chase, M. W. (2011). A new classification and linear sequence of extant gymnosperms. *Phytotaxa*(19), 55-70. https://doi.org/10.11646/phytotaxa.19.1.3

CMM. (2017). *Ciudades emergentes en México-Avances y rezagos en materia ambiental urbana 2017.* Centro Mario Molina. Obtenido de https://indicedeciudaessostenibles2018.Inpp.cide.edu/resources/Ciudades_Emergentes_en_Mexico_%202017.pdf

CONABIO. (2018). *Fichas técnicas de los agaves de Oaxaca.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Obtenido de http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/NE012_Anexo_Fichas_agave.pdf

Domínguez, H. F., Acocal, L. J., Esteban , M. J., Aguilar, L. J., & Torres , V. V. (2016). Diagnóstico del arbolado de la reserva ecológica "Cerro de Amalucan", ciudad de Puebla, México. *Revista Cubana de Ciencias Forestales, 4*(2), 141-148.

Eguiarte, L. E., & Souza, V. (2007). Historia natural del Agave y sus parientes. En M. P. Colunga-García, Z. A. Larqué, L. E. Eguiarte, & D. Zizumbo-Villareal, *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves* (págs. 3-22). Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Flores-Huitzil, E. C., Coombes, A. J., & Villaseñor, J. L. (2020). Las angiospermas ruderales del municipio Coronango, Puebla, México. *Acta Botánica Mexicana*, e1601. http://dx.doi.org/10.21829/abm127.2020.1601

Font, Q. P. (2000). *Diccionario de Botánica.* Ediciones Peninsula.

García, C. G., & González , C. J. (2021). *La economía de la producción de mezcal en Oaxaca, México. Estudio de contexto: Sistema agave-mezcal en los distritos de Miahuatlán, Yautepec y Tlacolula.* Oaxaca: Cooperación alemana-Giz-The economics of land degradation. Obtenido de https://www.eld-initiative.org/fileadmin/ELD_Filter_Tool/Case_Study_Mexico_2022/Mexico_Oaxaca_2022_Mezcal_ELD_Scoping_Study_ES.pdf

Golubov, J., Mandujano, M. C., Arizaga, S., Martínez-Palacios, A., & Koleff, P. (2007). Inventarios y conservación de Agavaceae y Nolinaceae. En M. P. Colunga-García, S. A. Larqué, L. E. Eguiarte, & D. Zizumbo-Villareal, *En lo ancestral hay futuro: del tequila, los mezcales y otros agaves* (págs. 133-152). Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Guillen-Cruz, G., Rodriguez-Sánchez, A. L., Férnandez-Luqueño, F., & Flores-Rentería, D. (2021). Influence of vegetation type on the ecosystem services provided by urban green areas in an arid zone of northern Mexico. *Urban Forestry and urban Greening*, 127135. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127135

ICMA. (2020). *Reporte de resultados SINDES, 2o semestre 2019.* International City/County Management Association. Obtenido de

https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://back.icmaml.org/filesite/9/359/Reporte+resultados+SINDES+2o+Semestre+2019+vf.pdf

INEGI. (2010). *Compendio de Información Geográfica Municipal 2010 Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20059.pdf

INEGI. (2020). *Panorama Sociodemográfico de Oaxaca, Censo de Población y Vivienda 2020.* Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197933.pdf

IPNI. (2024). *International Plant Name Index*. Obtenido de https://www.ipni.org/

Jensen, K., & Birche , M. (2021). La percepción comunitaria del espacio urbano. La Plata, Argentina. *Bitacora Urbano Territorial, 31*(III), 27-40. http://dx.doi.org/10.15446/bitacora.v31n3.87796

Magurran, A. E. (2004). *Measuring biological diversity.* Blackwell Science.

Martínez-De La Cruz, I., Vibrans, H., Lozada-Pérez, L., Romero-Manzanares, A., & Luna-Cavazos, M. (2024). Vegetación viaria en el municipio de Malinalco, Estado de México, México. *Botanical Sciences, 102*(1), 318-345. https://doi.org/10.17129/botsci.3416

Martínez-De La Cruz, I., Vibrans, H., Lozada-Pérez, L., Romero-Manzanares, A., Aguilera-Gómez, L. I., & Rivas-Manzano, I. V. (2015). Plantas ruderales del área urbana de Malinalco, Estado de México, México. *Botanical Sciences, 93*(4), 907-919. https://doi.org/10.17129/botsci.213

Martínez-De La Cruz, I., Villaseñor, J. L., Aguilera, G. L., & Arriaga, M. R. (2018). Angiospermas nativas documentadas en la literatura para el Estado de México, México. *Acta Botánica Mexicana, 124*, 135-217. https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1273

Miranda, F., & Hernández-X, E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *Boletín de la Sociedad Botánica Mexicana, 28*, 29-179. https://doi.org/10.17129/botsci.1084

Morales-Gallegos, L. M., Martínez-Trinidad, T., Hernández-De la Rosa, P., Gómez-Guerrero, A., Alvarado-Rosales, D., & Saavedra-Romero, L. d. (2023). Diversidad, estructura y salud del arbolado en áreas verdes de la ciudad de Texcoco, México. *Bosque, 44*(2), 401-414. https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000200401

Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad* (Vol. 1). M y T-Manuales y Tesis SEA. Obtenido de http://entomologia.rediris.es/sea/manytes/metodos.pdf

Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. (2014). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Lanscape Urban Planning, 134*, 157-166. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.0130169-2046/

NMNH. (2024). *Encyclopedia of Life*. Obtenido de National Museum of Natural History: https://www.eol.org

Nowak, D., Crane, D., & Stevens, J. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry and Urban Greening, 4*, 115-123. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007

Núñez, J. M. (2021). Análisis espacial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 803-833. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/pdf/est/v21n67/2448-6183-est-21-67-803.pdf

Ramirez-Ospitia, G. S., Ramírez-Arellanes, E. L., Maya-Lucas, R., & Sánchez-Hernández, E. (2017). Ocupación del suelo en periferias urbanas y capacidades institucionales de Miahuatlán de Porfirio Díaz, Oaxaca, México. *Salud y Administración, 4*, 31-50. Obtenido de https://revista.unsis.edu.mx/index.php/saludyadmon/article/view/12/11

Redonda-Martínez, R. (2022). Tribus de Asteraceae en México, morfología y clave de identificación. *Acta Botánica Mexicana, 129*, e2122. https://doi.org/10.21829/abm129.2022.2122

Redonda-Martínez, R., & Villaseñor-Ríos, J. L. (2011). *Asteraceae Bercht. & J. Presl. Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán Fascículo 89.* Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Rodríguez, A. M., Coombes, A. J., & Jimenez, R. J. (2009). *Plantas silvestre de Puebla.* Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Román-Guillén, L. M., Orantes-García, C., del Carpio-Penagos, C. U., Sánchez-Cortés, M. S., Ballinas-Aquino, M. S., & Farrera-Sarmiento, O. (2019). Diagnóstico del arbolado de alineación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Madera y Bosques, 25*(1), 1-13. https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511559

Rzedowski, J. (1991). Diversidad y orígenes de la flora faberogámica de México. *Acta Botánica de México, 14*, 3-21. https://doi.org/10.21829/abm.14.1991.611

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México (1ra edición digital).* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Obtenido de www.academia.edu/9142430/VEGETACION_DE_MEXICO_Jerzy_Rzedowski

Rzedowski, J., & Calderón de Rzedowski, G. (1990). Nota sobre el elemento africano en la flora adventicia de México. *Acta Botánica Mexicana, 12*, 21-24. https://doi.org/10.21829/abm12.1990.602

Salas-Morales, S. H., Schibli, L., Nava-Zafra, A., & Saynes-Vázquez, A. (2007). Flora de la costa de Oaxaca, México (2): lista florística comentada del Parque Nacional Huatulco. *Boletín de la Sociedad Botánica de México, 81*, 101-130. https://doi.org/10.17129/botsci.1769

Sánchez, A., & González, L. M. (2007). Técnicas de recolecta de plantas y herborización. En A. Contreras, C. Cuevas, I. Goyenechea, & U. Iturbide, *La sistemática, base del conocimiento de la biodiversidad* (págs. 123-133). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

SEMARNAT. (2014). *El medio ambiente en México.* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/04_biodiversidad/4_1.html

Silva-Aparicio, M., Castro-Ramírez, A. E., Castillo-Campos, G., & Perales, R. H. (2018). Estructura de la vegetación leñosa en tres áreas con Selva Baja Caducifolia en el Istmo-Costa de Oaxaca, México. *Revista de Biología Tropical, 66*(2), 863-879. https://doi.org/10.15517/rvt.v66i2.33419

Sotuyo, S., Julio-Catarino, L., & Contreras-Jiménez, J. L. (2023). Las leguminosas del Area Natural Protegida del Boquerón de Tonala, Oaxaca, México. *Botanical Sciences, 101*(1), 288-301. http://dx.doi.org/10.17129/botsci.3155

Statista. (2024). *Ranking de las 10 ciudades con más espacios verdes de la OCDE en 2018*. Obtenido de https://es.statista.com/estadisticas/863242/ranking-de-ciudades-con-mas-espacios-verdes-en-la-ocde/

Tropicos. (2024). *Missouri Botanical garden*. Obtenido de http://www.tropicos.org

Vázquez-Pérez, N., Blancas, J., Torres-García, I., García-Mendoza, A., Casas, A., Moreno-Calles, A. I., . . . Rendón-Aguilar, B. (2020). Conocimiento y manejo tradicional de Agave Karwinskii en el sur de México. *Botanical Sciences, 98*(2), 328-347. https://doi.org/10.17129/botsci.2421

Vibrans, H. (1998). Urban weeds of Mexico City. Floristic composition and important families. *Anales del Instituto de Biología serie Bitánica, 69*, 37-69. Obtenido de https://revistas.unam.mx/index.php/bot/article/view/1906

Vibrans, H. (2006). *Malezas de México*. Obtenido de http://www.malezasdemexico.net

Villaseñor, J. L. (2003). Diversidad y distribución de las Magnoliophyta de México. *Interciencia, 28*(3), 160167. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/339/33907806.pdf

Villaseñor, J. L. (2004). Los géneros de plantas vasculares de la flora de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México, 75*, 105-135. https://doi.org/10.17129/botsci.1694

Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad, 87*, 559-902. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017

Villaseñor, J. L. (2018). Diversidad y distribución de la familia Asteraceae en México. *Botanical Sciences, 96*(2), 332-358. https://doi.org/10.17129/botsci.1872

Villaseñor, J. L., & Espinosa-García, F. J. (2004). The allien flowering plants of Mexico. *Diversity and Distributions, 10*, 113-123. https://doi.org/10.1111/j.1366-9516.2004.00059.x

Villaseñor, J. L., & Magaña, P. (2006). Plantas introducidas en México. *Ciencias, 82*, 38-40. Obtenido de

Núm. 60: 39-59 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Recibido:
26/septiembre/2024

Aceptado:
4/junio/2025

https://www.revistacienciasunam.com/images/stories/Articles/82/B3/plantas.pdf

Villaseñor, J. L., & Ortíz, E. (2014). Biodiversidad de las plantas con flores (División Magnoliophyta) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad, 85*, 134-142. https://doi.org/10.7550/rmb.31987

Villaseñor, J. L., Ortiz, E., & Redonda-Martínez, R. (2008). *Catálogo de autores de plantas vasculares de México.* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Nacional Autónoma de México.

WFO. (2024). *The World Flora Online*. Obtenido de http://www.worldfloraonline.org

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE ESPECIES DEL GÉNERO *Hylocereus* (Cactaceae) EN UNA UNIDAD DE CULTIVO LOCALIZADA EN MOLCAXAC, PUEBLA, MÉXICO

MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SPECIES OF THE GENUS *Hylocereus* (Cactaceae) IN A CULTIVATED UNIT LOCATED IN MOLCAXAC, PUEBLA, MEXICO

Olarte Reyes, Y., M.J. Martínez Hernández, V.R. Torres Pelayo, I. Pastor Camacho, B. Solís Martínez

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE ESPECIES DEL GÉNERO *Hylocereus* (Cactaceae) EN UNA UNIDAD DE CULTIVO LOCALIZADA EN MOLCAXAC, PUEBLA, MÉXICO

MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SPECIES OF THE GENUS *Hylocereus* (Cactaceae) IN A CULTIVATED UNIT LOCATED IN MOLCAXAC, PUEBLA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 61-78 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.4

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 61-78 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Caracterización morfológica de especies del género *Hylocereus* (Cactaceae) en una unidad de cultivo localizada en Molcaxac, Puebla, México

Morphological characterization of species of the genus *Hylocereus* (Cactaceae) in a cultivated unit located in Molcaxac, Puebla, Mexico

Yesica Olarte Reyes / yesicaolre_@hotmail.com
https://orcid.org/0009-0001-6546-4629
Maestría en Ciencias Agropecuarias, Universidad Veracruzana
Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana
Circuito Presidentes s/n Col. Centro. CP 91000. Xalapa, Veracruz, México

María de Jesús Martínez Hernández / jesmartinez@uv.mx
https://orcid.org/0000-0003-3049-5289
Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana
Circuito Presidentes s/n Col. Centro. CP 91000. Xalapa, Veracruz, México

Vianey del Rocío Torres Pelayo / vitorres@uv.mx
https://orcid.org/0000-0002-1684-8394
Facultad de Biología, Universidad Veracruzana
Circuito Presidentes s/n Col. Centro. CP 91000. Xalapa, Veracruz, México

Itaí Pastor Camacho / itaipastor10@dgetaycm.sems.gob.mx
https://orcid.org/0009-0002-1838-1879
Brigada de Educación para el Desarrollo Rural No. 10 de la
Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria y Ciencias del Mar
Subsecretaría de Educación Media Superior. Petra Jaime Hernández s/n
Col. Las Juntas, Dos Ríos, Emiliano Zapata, Veracruz, México

Bibiana Solís Martínez / bibiana.solis@dgetaycm.sems.gob.mx
https://orcid.org/0009-0006-6085-5168
Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario 305
Colonia Bugambilias, Puebla, México

RESUMEN: Pitahaya perteneciente al género *Hylocereus* spp, es de gran importancia económica debido a las propiedades alimenticias y capacidad antioxidante del fruto. En México se cultiva varias especies de Pitahaya en traspatios y parcelas, sin embargo, durante en el proceso de domesticación, se han perdido algunas características morfológicas que permiten diferenciar a las especies de gran importancia productiva en cultivos no tradicionales. El objetivo principal de este estudio fue caracterizar morfológicamente la raíz, tallo y flor de cuatro especies de pitahayas del género *Hylocereus* cultivadas en una parcela del municipio de Molcaxac, Puebla, mediante descriptores previamente definidos para apoyar a los agricultores seleccionar hacer un mejor uso de las características morfológicas del cultivo de pitahaya y de aquellos con que sean de mayor potencial productivo. Para la caracterización de la especie se clasificaron de acuerdo con la coloración de la pulpa de la fruta de 10 individuos por especie por tres repeticiones, y completamente al azar: pulpa roja (R); pulpa blanca (B); pulpa rosa Oaxaca (ROAX) y pulpa solferina (SP) de 10 plantas de cada cultivar. Posteriormente, se tomaron medidas de descriptores morfológicos, longitud de raíz

Olarte Reyes, Y., M.J. Martínez Hernández, V.R. Torres Pelayo, I. Pastor Camacho, B. Solís Martínez

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE ESPECIES DEL GÉNERO *Hylocereus* (Cactaceae) EN UNA UNIDAD DE CULTIVO LOCALIZADA EN MOLCAXAC, PUEBLA, MÉXICO

MORPHOLOGICAL CHARACTERIZATION OF SPECIES OF THE GENUS *Hylocereus* (Cactaceae) IN A CULTIVATED UNIT LOCATED IN MOLCAXAC, PUEBLA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 61-78. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.4

Núm. 60: 61-78 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

primaria y secundaria, raíces adventicias, peso de raíces, longitud de flor, longitud y ancho de ovario, longitud y ancho del tubo receptacular, número y longitud de brácteas en ovario, número y longitud de brácteas de tubo receptacular, número/longitud y ancho de sépalos, número/longitud y ancho de petaloides, número/longitud y ancho de pétalos, número de lóbulos bífidos, hercogamía y número de estambres, asimismo se documentaron fotos. Este estudio permitió reconocer a la pitahaya R como *Hylocereus ocamponis;* a la B como *Hylocereus undatus*; pitahaya pulpa rosa ROAX como *Hylocereus* sp. y pitahaya pulpa púrpura SP como *Hylocereus purpusii*. Se encontró variabilidad entre las raíces primarias con mayor longitud en *H. undatus* (26.2cm) y *H. purpursii* (24.2cm) además de hercogamia (1.7cm) en *H.* sp. *H. undatus* (30.6 cm) y *H.* sp presentaron mayor longitud de tallos (32.4 cm). La flor de mayor longitud fue la especie *H. undatus* (33.3 cm), y *H. ocamponis*, fue la que presentó únicamente márgenes marcados de coloración verde y rojizo, principalmente en las brácteas, los sépalos, petaloides y tépalos externos. Esta caracterización morfológica permitió la identificación fenotípica de los individuos de *Hylocereus* cultivados en la parcela "Hermanos Solís" ubicada en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México; con la finalidad de llevar a cabo un mejor manejo de producción y selección de las mimas.
Palabras clave: Pitahaya, descriptores morfología, cactáceas.

ABSTRACT: Pitahaya of the *Hylocereus* genus is of great economic importance due to its nutritional properties and antioxidant capacity. In Mexico, several species of pitahaya are cultivated in backyards and plots; however, during the domestication process, there continues to be a loss of visual morphological details that allow for the differentiation of species that are of significant productive importance. The main objective was to conduct a preliminary morphoagronomic analysis of the root, stem, and flower of four species of pitahayas from the *Hylocereus* genus cultivated in Molcaxac, Puebla, using defined descriptors. A completely randomized experimental design was employed. The selected individuals were classified according to the pulp coloration of the fruit for species characterization: red pulp (R), white pulp (B), Oaxaca pink pulp (ROAX), and purple pulp (SP). Subsequently, measurements of the defined agromorphological descriptors were taken, length of primary and secondary root, adventitious roots, weight of roots, length of flower, length and width of ovary, length and width of receptacular tube, number and length of bracts in ovary, number and length of bracts of receptacular tube, number/length and width of sepals, number/length and width of petaloids, number/length and width of petals, number of bifid lobes, herkogamy and number of stamens, Photos were also documented. The red pulp pitahaya was recognized as *Hylocereus ocamponis*; the white pulp as *Hylocereus undatus*; the Oaxaca pink pulp as *Hylocereus* sp.; and the purple pulp as *Hylocereus purpusii*. Variability was found among the primary roots, with greater length in *Hylocereus undatus* (26.2 cm) and *Hylocereus purpusii* (24.2 cm), and herkogamy (1.7 cm) was found in *Hylocereus* sp. The species *Hylocereus undatus* (30.6 cm) and *Hylocereus* sp. exhibited greater stem lengths (32.4 cm). The longest flower was from the species *Hylocereus undatus* (33.3 cm), while *Hylocereus ocamponis* presented only very pronounced green and reddish margin coloration, mainly in the bracts, sepals, petaloids, and outer tepals. This agromorphological characterization allowed for easy identification among the phenotypes of pitahaya cultivated in the "Hermanos Solís" plot located in the municipality of Molcaxac, Puebla, Mexico, with the purpose of carrying out better production management and selection of the same.
Key words: Pitahaya, morphology descriptors, Cactaceae.

Núm. 60: 61-78 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

INTRODUCCIÓN

La pitahaya (*Hylocereus* spp.) es comúnmente conocida como "Fruta del Dragón" y considerada como una fruta exótica, es atractiva y cotizada tanto en los mercados europeos como asiáticos (Verona-Ruiz *et al.*, 2020) y en México. El fruto de la pitahaya tiene una alta capacidad antioxidante, debido a que presenta compuestos como betalainas, betaninas y betacianinas; con actividad biológica relacionados al estrés, efectos antiflamatorio, además son una fuente de colorante natural asociado al contenido de betacianinas y con un gran aporte nutricional (Jiménez-García *et al.*, 2022; Attar *et al.*, 2022; Verona-Ruiz *et al.*, 2020). En México prevalecen dos géneros, "*Stenocereus*" e "*Hylocereus*"; en el caso del género *Stenocereus* comprende de 22 a 24 especies de pitahayas; de las 17 a 20 que se encuentran en México, ocho especies se cultivan en el centro-sur del país (Sánchez–Mejorada, 1984) desde tiempos prehistóricos. Dentro del género *Hylocereus,* se encuentran 31 especies (Castillo Martínez *et al.*, 2005), de las cuales *Hylocereus minutiflorus, Hylocereus ocamponis, Hylocereus purpusii* e *Hylocereus undatus* se distribuyen en los estados de Quintana Roo, Yucatán, Tabasco, Veracruz, Guerrero, Querétaro, Estado de México, Puebla, Oaxaca, Michoacán, Jalisco, San Luis Potosí, Colima y Sinaloa (Ortiz-Hernández & Carrillo-Salazar, 2012; Bauer, 2003; Esquivel Rodríguez, 2013; Ruiz-Domínguez *et al.*, 2019); y se registra que la especie *H. undatus* se encuentra en forma silvestre en todos estos estados (Montesinos Cruz *et al.*, 2015).

En el estado de Puebla los cultivos de pitahaya se han establecido en huertos familiares con una heterogeneidad del material genético reducido, por ejemplo, se ha encontrado que los frutos difieren en forma, tamaño, color, y número de brácteas, o bien, se reduce el número de frutos desarrollados respecto al total de flores producidas; un hallazgo similar, se reportó en la Península de Yucatán (Castillo Martínez *et al.*, 2005), donde se encontró un genotipo con fruto de color amarillo claro, cuya floración es abundante, pero con reducida producción de frutos. En otros lugares de México se ha reportado que la diversidad biológica de *Hylocereus* cultivados en traspatios y en las plantaciones recién iniciadas son pocos conocidos. Esta controversia en la identificación de la pitahaya se debe en parte al considerar el color del fruto como el único criterio para definir las especies, una práctica que carece de una base taxonómica teórica firme. Además, diversos estudios con especies de cactus domesticadas han demostrado que la variación en los rasgos de los frutos, incluido el color, están relacionados con este proceso de domesticación(Grimaldo-Juárez *et al.*, 2018); por lo tanto, es importante identificar varios caracteres fenotípicos en las plantas y las similitudes entre sus características.

La caracterización de plantas es una herramienta para determinar, diferenciar taxonómicamente (Serrano-Estrada *et al.*, 2023), y estimar en una especie la variabilidad existente en el genoma de la población de individuos que la conforman. Así la caracterización de la diversidad fenotípica de las poblaciones y la identificación de las especies de pitahaya se realiza normalmente con base en características morfológicas como el color de tallos, costillas con bordes, presencia/ausencia de suberificación, ubicación de areolas o tipos de espinas, color de flores y color de frutos (Castillo Martínez *et al.*, 2005); que normalmente son características agronómicas y morfológicas para describir, seleccionar y utilizar los recursos genéticos (Legaria Solano *et al.*, 2005) como una primera aproximación hacia el conocimiento del germoplasma (Cevallos Macías, 2022).

Una caracterización morfológica mediante descriptores estándares permite diferenciar fácil y rápidamente entre fenotipos (Andrés Mejía *et al.*, 2013), dando a conocer las características específicas de cada variedad evaluada. Un caso de ello es el estudio realizado en Bhakti Alam Agrotourism, Pasuruan, (Hamidah *et al.*, 2017), determinaron el número de caracteres distintivos y dominantes de la pitahaya (Hylocereus) y la relación entre la clasificación de la pitahaya con base en sus caracteres morfológicos. Observaron 63 caracteres, incluyendo segmentos de tallo/ramas, areolas, flores, frutos y semillas; estos caracteres se analizaron utilizando métodos descriptivos y fenéticos. Con base en el resultado descriptivo, hubo 59 caracteres distintivos que afectaron la clasificación de cinco especies de pitahaya: pitahaya blanca, pitahaya rosa, pitahaya roja, pitahaya rojo violáceo y pitahaya amarilla. Con base en el análisis fenético, se obtuvo un

dendograma que mostró la relación de la clasificación de la pitahaya. La pitahaya rojo violáceo y la pitahaya roja estuvieron estrechamente relacionadas con un 50.7% en valor de similitud. Asimismo, el análisis de componentes principales, se identificaron 34 caracteres que influyeron significativamente en la clasificación de la pitahaya; dos de ellos fueron los más dominantes: la curvatura del tallo y el número de restos de bracteolas, con un valor de componente de 0,955. Otro estudio similar realizado por (Garbanzo-León *et al.*, 2019), fue para relacionar variables no destructivas con variables destructivas para construir una herramienta para el uso de proyecciones de crecimiento en pitahaya en Costa Rica. A través de regresiones lineales mostraron que existe una alta precisión (r^2 >0,85) en algunas variables de crecimiento en los tallos de pitahaya, lo cual podría ser una herramienta eficaz para generar cuantificaciones de crecimiento en el cultivo a partir de un parámetro alométrico. Asimismo, se continúan realizando estudios relacionados con la caracterización morfológica y la producción de frutos provenientes de huertos familiares con la finalidad de iniciar la selección de los más prometedores y su cultivo en las parcelas o traspatios (Castillo Martínez *et al.*, 2005; Carrillo Criollo & Yumbla-Orbes, 2022). No obstante, en ocasiones no es posible captar algunos detalles morfológicos de la selección tradicional de la pitahaya; debido que durante en el proceso de domesticación, se continúa con la frecuente incorporación de nuevos o diferentes variedades de pitahayas en traspatios o en los cultivos (Carrillo-Galván *et al.*, 2020); sin tener claridad que especies se están cultivando, así como su incompatibilidad sexual, periodo de floración, poca o nula producción de frutos. Es común confundirse, y algunas veces no se pueden identificar que especie de pitahaya se está cultivando. Por ello, es importante detallar las características morfológicas de cada especie de pitahaya, el cuál apoyaría a los productores guiarse sobre que especie necesita polinización cruzada y cuales tienen compatibilidad sexual. Por lo tanto, se debe considerar reunir datos mediante descriptores de cada genotipo cultivado, con una ficha descriptiva individual para disponer de una información ordenada acerca de las características que componen al espécimen bajo estudio y que este favorezca la identificación de las plantaciones cultivadas (Franco & Hidalgo, 2003; Vegas Albino *et al.*, 2015; Morillo Coronado, 2016). A pesar de que existen actualmente varios estudios sobre la morfología de la pitahaya, en este caso particular, fue necesario incrementar las investigaciones sobre la caracterización morfológica que sea fácil de medir, registrar o evaluar la forma, estructura o comportamiento de una accesión de las especies que son cultivadas en parcelas, tal es el caso del cultivo conocido como “Hermanos Solís” propiedad del Sr. Osvaldo Ramos Castro, ubicada en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México, cuyo objetivo principal fue caracterizar morfológicamente la raíz, tallo y flor de cuatro especies de pitahayas del género *Hylocereus* cultivadas en una parcela, usando descriptores previamente reportados y definidos, con la finalidad de apoyar a los agricultores seleccionar y hacer un mejor uso de los cultivos de pitahaya y de aquellos con que sean de mayor potencial productivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El cultivo de pitahaya se encuentra ubicada en la parcela “Hermanos Solís” municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México; en las coordenadas 18º43´38´´ latitud norte y 97º56´25´´ longitud oeste (GPS IN SITU), a una altura a nivel de mar de 1696 msnm. (GPS IN SITU), con una temperatura promedio anual de 19.2 °C y precipitación anual de 600 a 700 mm, con clima semicálido, subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2010).

Selección y colecta del material vegetativo

Se utilizaron cuatro especies de pitahaya y 10 individuos por cada especie por tres repeticiones, las cuales se clasificaron de acuerdo con la coloración de la pulpa de la fruta: pulpa roja (R), pulpa blanca (B), pulpa rosa Oaxaca (ROAX) y pulpa solferina púrpura (SP) y considerando el mismo tiempo de plantación. Durante la primavera y verano, se colectaron las raíces, tallos y

flores de las cuatro especies y se realizó un archivo fotográfico de cada parte área con una cámara digital marca Canon (EOS 4000D). Asimismo, se realizó una lista de descriptores morfológicos para la caracterización morfológica de la pitahaya de cada especie, para ello se utilizó como referencia el trabajo realizado por Carrillo Criollo & Yumbla-Orbes, (2022) y González Espino & Alvarado Ruíz, (2004), con algunas modificaciones que se describen a continuación con más detalle.

Caracterización morfológica

Tomando en cuenta el método descrito por Carrillo Criollo & Yumbla-Orbes, (2022), se seleccionaron 10 plantas de cada cultivar por tres repeticiones y completamente al azar. La caracterización morfológica de raíz, tallo y flor se realizó mediante los parámetros establecidos tanto por la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV, 2010) como por González Espino & Alvarado Ruíz, (2004) con algunas modificaciones, como presencia de raíz primaria y secundaria, raíces adventicias, medición y pesado de raíces, longitud de flor, longitud y ancho de ovario, longitud y ancho del tubo receptacular, número y longitud de brácteas en ovario, número y longitud de brácteas de tubo receptacular, número/longitud y ancho de sépalos, número/longitud y ancho de petaloides, número/longitud y ancho de pétalos, número de lóbulos bífidos, hercogamía y número de estambres.

Caracteres morfológicos de raíz, tallo y flor

En la medición de las raíces, se consideraron diez tallos con raíces de cada especie de pitahaya por triplicado del mismo cultivo, se midió la longitud (centímetro, cm) de raíces primarias, secundarias, y adventicias; posteriormente se obtuvo el peso fresco y seco en gramos (g). Para el tallo, se consideraron los siguientes descriptores de longitud de tallo (cm), ancho del tallo (cm), número y longitud de ramas, altura de la cresta (cm), distancia entre areola (cm), número y longitud de espinas (cm). A las flores colectadas (10 individuos de cada especie) se les midió la longitud de flor (cm); separación y medición de longitud y ancho de los sépalos (tépalos externos), petaloides (tépalos medios) y pétalos. Posteriormente se midió la longitud y ancho interno del ovario (cm) y del tubo receptacular. Asimismo, se cuantificó y se midió la longitud y ancho de brácteas del ovario, así como el número, longitud y ancho de brácteas del tubo receptacular (cm), con la ayuda de un vernier (Pretul VER-6P). En el órgano reproductor se midió la longitud del estilo, se cuantificaron los lóbulos, la hercogamia y el número de estambres.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de cada descriptor evaluado en este estudio fueron analizados mediante análisis descriptivo para obtener la media y error estándar; asimismo se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar las medias, y se utilizó una prueba de comparación múltiple de medias (Tukey $P \leq 0.05$), utilizando el programa STATISTICA®. Posteriormente se graficaron los datos en Excel versión 2018 para representarlos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron cuatro especies de Pitahaya *Hylocereus ocamponis*, *Hylocereus undatus*, *Hylocereus* sp. y *Hylocereus purpusii* en los cultivos de la parcela "Hermanos Solís" municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México, distinguiéndose por su color de pulpa. Hasta ahora, los únicos índices prácticos de cosecha han sido el color de la epidermis y la firmeza del fruto, que generalmente son evaluados subjetivamente por los recolectores de fruta. Por ejemplo, para la especie *H. undatus* se ha demostrado que la epidermis de los frutos se torna completamente rojo cuando han alcanzado la madurez y el desarrollo completamente (Le Bellec & Vaillant, 2011).
Con respecto a la raíz, se encontró entre las raíces primarias una mayor longitud en las especies *Hylocereus undatus* y *Hylocereus purpursii* (26.2 y 24.2 cm, respectivamente) con respecto a

Núm. 60: 61-78 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Hylocereus sp y *Hylocereus acomponis*. Mientras que la especie *H. undatus* presentó mayor longitud de raíces adventicias (3.1 cm). No obstante, se observó que la especie *Hylocereus undatus* y *Hylocereus purpursii* tiene un mayor número de raíces adventicias aparente (1.7 y 2.2, respectivamente). Con respecto a la longitud de raíces secundarias fueron similares entre las cuatro especies de pitahaya (Figura 1) y la especie *Hylocereus* sp. no presentaron raíces adventicias. Con respecto al peso fresco y seco es variable entre las especies, y se observó un mayor peso fresco en *H. purpursii* del 13.4g (Figura 1). Es importante resaltar que las raíces son un componente fundamental para los cultivos, por ejemplo, la morfología de una raíz está determinada por el volumen de suelo disponible para la absorción de agua y nutrientes, y proporcionan el anclaje, dicha actividad está regulada por los genes e influenciado por múltiples factores ambientales (Verona-Ruiz *et al.*, 2020). Sin embargo, por ser un órgano subterráneo, ha sido la menos que las estructuras aéreas. En este estudio en particular, las características morfológicas de las raíces fueron fácilmente observables y expresables en las cuatros especies de Pitahaya, y permitió como primer paso determinar si existe o no variabilidad entre las raíces como un dato taxonómico básico e importante para la caracterización morfológica de los recursos fitogenéticos (Verona-Ruiz *et al.*, 2020), como se han reportado en otros estudios (Hernández-Villarreal A. E., 2013; Morillo *et al.*, 2021); donde se describen las características botánicas de la Pitahaya como una planta epifita o hemiepifita (Andrés Mejía *et al.*, 2013) con raíces primarias y secundarias bien diferenciadas (Meráz Alvarado *et al.*, 2003). Sin embargo, no se puede generalizar que las raíces sea una base para determinar la especie, debido que el tipo de suelo influye en el crecimiento y reorganización de este, o bien, por las condiciones ambientales (temperatura, elementos nutrientes, estrés hídrico y salino, entre otros), como ha sido reportado en otras investigaciones (Balliu *et al.*, 2021; Balliu & Sallaku, 2021; Pedersen *et al.*, 2021), donde han confirmado que las altas temperaturas afectan no sólo la tasa de crecimiento de las puntas de las raíces individuales, sino también la arquitectura total del sistema radicular, especialmente la formación y orientación de las raíces laterales (Balliu & Sallaku, 2021).

Una de las funciones principales de las raíces primarias es absorber los nutrientes y alimentar a la planta, estas se desarrollan entre una profundidad de 5 a 10 cm. Mientras que las raíces secundarias o adventicias nacen en la parte aérea de la planta; su función es de sostén, por lo que se adhieren a las superficies de árboles, piedras o muros (González Espino & Alvarado Ruíz, 2004;Vargas *et al.*, 2020). Esta arquitectura del sistema radicular determina la formación, el alargamiento y el ángulo de crecimiento de las raíces, en si apoya a la caracterización de la planta pitahaya para determinar el conjunto de características morfológicas y diferenciarlas taxonómicamente como un estudio preliminar fenotípico (López-Santiago *et al.*, 2008; Sudarjat Leovika *et al.*, 2018), el cual es importante en la agricultura para implementar prácticas agronómicas efectivas y sostenibles que maximicen la salud y el crecimiento de los cultivos de pitahaya. No obstante, en ocasiones no es posible captar todos los detalles morfológicos de la selección tradicional de la especie bajo estudio; debido que, durante el proceso de domesticación y cultivo, se continúa con la frecuente incorporación de nuevos y diversas especies de plantas de Pitahaya, y aunado a las condiciones ambientales y tipo de suelo; las características físicas y químicas de la solución nutritiva, la disponibilidad de agua y los organismos microbianos que habitan en la rizosfera, pueden afectar el crecimiento de las raíces, el volumen y profundidad de la zona de las raíces, en sí, en todo el sistema radicular de crecimiento, rendimiento y calidad del producto de las plantas en los sistemas de cultivo (Balliu & Sallaku, 2021).

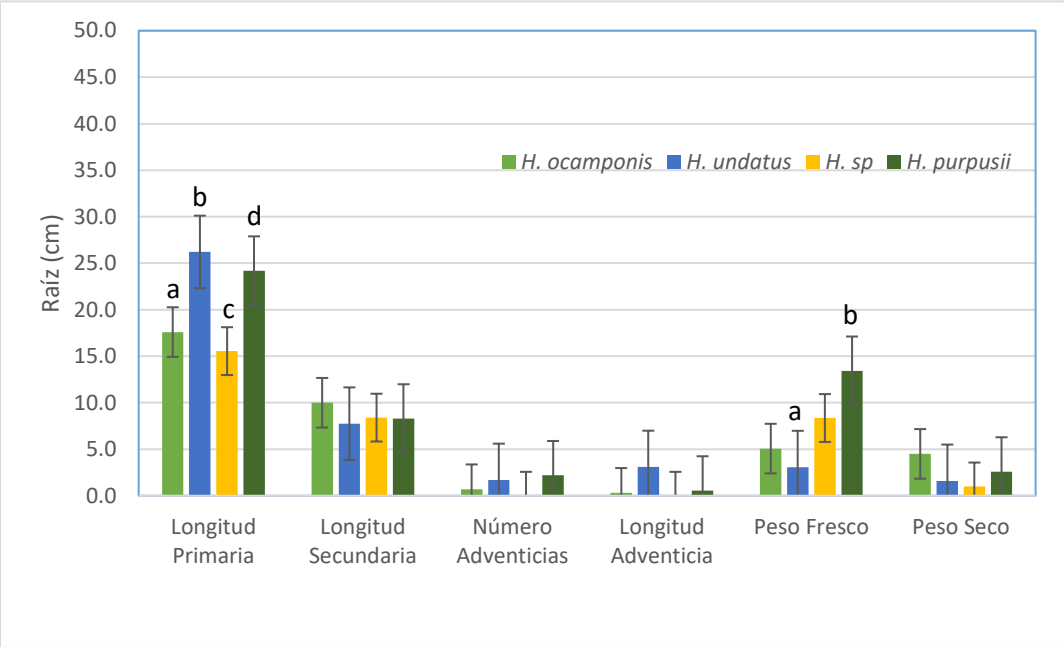


Figura 1. Características morfológicas de raíz entre las cuatro especies de pitahaya, representados en centímetros (cm). Las medias con diferente letra en una columna por grupo de descriptores son diferentes (Tukey P≤0.05).
Figure 1. Root morphological characteristics among the four pitahaya species, represented in centimeters (cm). Means with different letters in a column per descriptor group are different (Tukey P≤0.05).

Con relación a las características morfológicas de los tallos (Figura 2), presentaron color verde claro, con hendiduras, lóbulos y areola de tres a cuatro espinas muy característicos de las pitahayas; no obstante, la especie *H. undatus* y *Hylocereus sp* presentó mayor longitud de tallos (30.6 y 32.4 cm, respectivamente) y número de espinas, 20.6 y 17.8, respectivamente (Figura 3). Mientras que las especies *H. ocamponis* y *purpusii* presentaron una mayor longitud de ramas (44.6 y 47.9 cm, respectivamente), y la de menor longitud fue la especie *H. undatus* (12.4 cm). Comparando las otras características morfológicas, como es el ancho de tallo, número de ramas, altura de la cresta, distancia entre areola y longitud de espinas, no hay variación entre los descriptores estudiados de los cuatros especies de estudio (Figura 3). Con estos hallazgos, se observó que las características morfológicas relevantes son longitud del tallo y ramas, así como el número de espinas en los cuatros especies de pitahayas de este estudio. Generalmente, las diferencias en el germoplasma de pitahaya se pueden demostrar fácilmente con algunas características fenotípicas distintivas, como el tamaño del fruto, el color del fruto y el número de espinas en la areola que se formaron en los segmentos de las ramas/tallos (Goenaga et al., 2020). Estudios similares, registraron que los descriptores de tallos son importantes para diferenciar especies (Andrés Mejía *et al.*, 2013; González Espino & Alvarado Ruíz, 2004). Para el género *Hylocereus*, se encontraron que los tallos están profundamente acostillados (tres costillas) y son epifitos (Bravo-Hollis & Sánchez-Mejorada, 1978; Meráz-Alvarado *et al.*, 2003); y presentan costillas o aristas gruesas; estas características de los tallos son importantes en las formas de propagación vegetativa para conservar y seleccionar las características deseables de cada especie en cuestión, y para que se produzcan raíces en condiciones ambientales favorables y tener un adecuado balance hormonal. Además, los tallos o cladodios de la Pitahaya poseen hábitos trepadores; son del tipo xerofítico, suculentos, verdes, fotosintéticos y de epidermis gruesa, se caracterizan por presentar costillas o aristas gruesas que los recorren longitudinalmente (Rosales-

Bustamante *et al.*, 2009); permitiendo que se desarrollen bien en zonas de bajas precipitaciones (Vallester-Cruzata *et al.*, 2021). Otro dato interesante en el campo de la gastronomía, los tallos de la Pitahaya *H. undatus* son utilizados por su característica consistencia suave y su contenido nutrimental en proteínas, fibra e importantes contenidos de zinc y potasio (Montesinos Cruz *et al.*, 2015). Aunado a ello, la caracterización morfológica de los tallos permitió seleccionar y medir los descriptores morfológicos más adecuados para conocer taxonómicamente a las plantas de pitahayas, que estas sean confiables y discriminativos para evaluaciones futuras dentro de la Parcela y, así seleccionar las plantas que den mejor rendimiento de cosecha. No obstante, se debe considerar las hibridaciones intra e interespecífica que puedan darse durante las plantaciones de pitahayas, debido que esto ha creado cierta confusión taxonómica, incluso a nivel mundial (Silvia *et al.*, 2017). Por lo tanto, es importante considerar este punto y comentarles a los agricultores de la parcela de los "Hermanos Solís" municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México, para un mejor manejo y selección de las especies que ofrezcan mejores posibilidades comerciales.

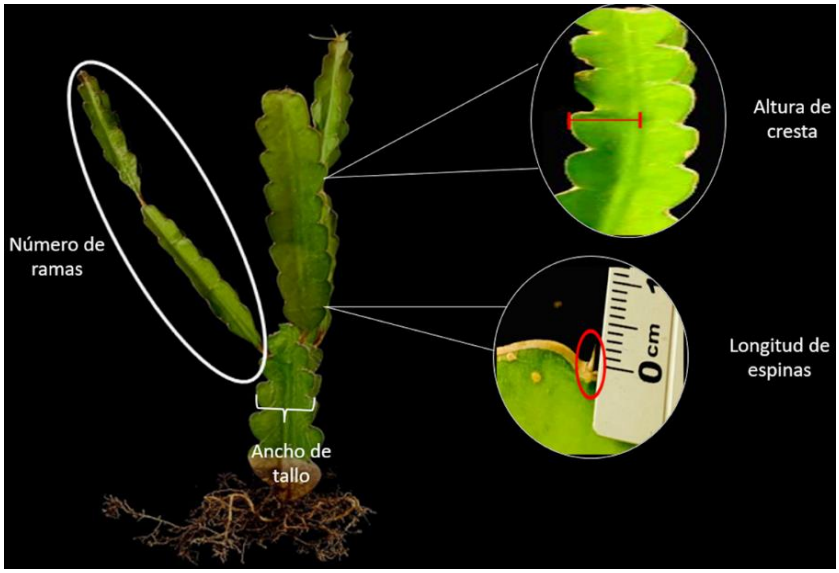


Figura 2. Muestra las partes morfológicas y los tipos de descriptores considerados en el tallo de pitahaya expresados en centímetros (cm).
Figure 2. Show the morphological parts and types of descriptors considered in the pitahaya stem expressed in centimeters (cm).

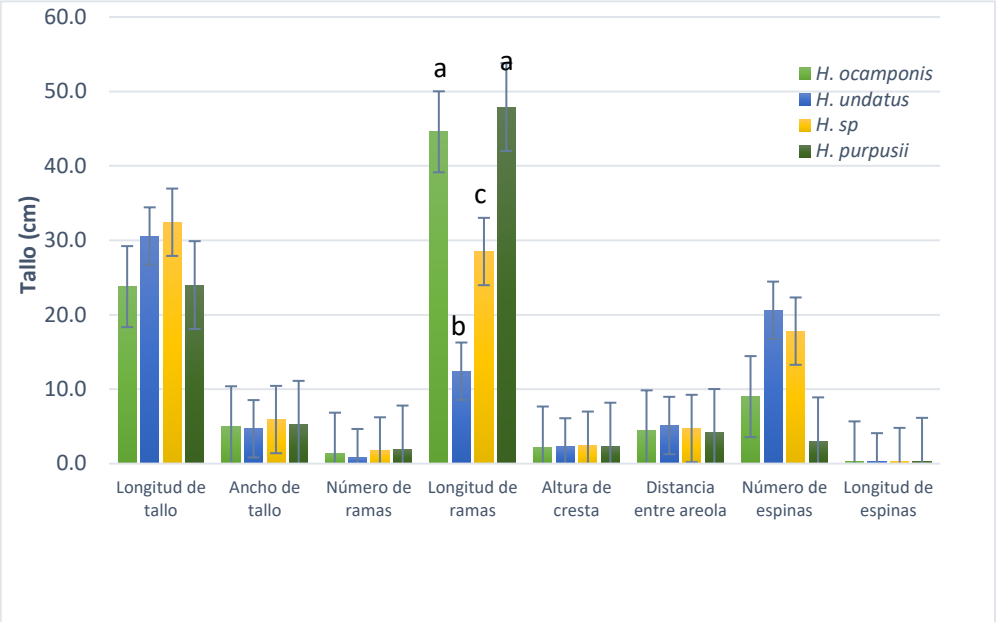


Figura 3. Características morfológicas del tallo entre las cuatro especies de pitahaya, representados en centímetros (cm). Las medias con diferente letra en una columna por grupo de descriptores son diferentes (Tukey P≤0.05).
Figure 3. Morphological characteristics of the stem among the four species of pitahaya, represented in centimeters (cm). Means with different letters in a column per descriptor group are different (Tukey P≤0.05).

En el caso de las flores, se identificaron caracteres descriptivos florales relevantes en las cuatro especies de pitahaya evaluadas, las cuales fueron longitud de flor (Figura 4), longitud y ancho del ovario, longitud y ancho del tubo receptacular, número-longitud y ancho de brácteas de ovario, número y longitud de brácteas del tubo receptacular, número-longitud y ancho de sépalos, número-longitud y ancho de petaloides, número-longitud y ancho de pétalos, número de lóbulos bífidos, distancia de hercogamia y número de estambres (Tabla 1, Figura 4). La flor más grande fue la especie *H. undatus* (33.3 cm) y *H.* sp (31.2 cm). Morillo-Coronado *et al.*, (2021), mencionaron que un descriptor es una variable o atributo que se observa en un conjunto de individuos de una población de plantas, como es el caso de la Pitahaya. Por ejemplo, la coloración de tépalos de las flores y tamaño (Figura 5 e-h); estas características podrán ser usadas visualmente en las evaluaciones preliminares y preferentemente con consenso de cultivos particulares (Quevedo Guerrero *et al.*, 2020).

Núm. 60: 61-78 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figura 4. Representa las partes de la flor externa (lado izquierdo) y un corte longitudinal con caracteres descriptivos florales de pitahaya (lado derecho), así como las brácteas de ovario, brácteas de tubo receptacular, sépalos, petaloides. pétalos, ovario, estambres y lóbulos.
Figure 4. Represents the parts of the external flower (left side) and a longitudinal section with descriptive floral characters of pitahaya (right side), as well as the ovary bracts, receptacle tube bracts, sepals, petaloids, petals, ovary, stamens and lobes.

Por otro lado, se encontró en la especie *H. ocamponis* un mayor número de brácteas ovárica el cual fue de 28.0 y de brácteas del tubo receptacular de 18.4. En cuanto al número de sépalos (tépalos externos) fue de 18.6, petaloides (tépalos medios) de 25.9 y pétalos de 27.6; observándose un mayor número de estambres de 926.1, en relación con las otras tres especies de pitahaya. Mientras que la *H. undatus*, las únicas variaciones en relación con las otras tres especies de pitahaya fueron el ancho interno del ovario el cual fue de 2.2 cm, longitud del tubo de 10.0 cm, y longitud de brácteas del tubo receptacular que fue de 10.3cm. En la especie *Hylocereus* sp., tuvo una mayor longitud de sépalos de 15.7 cm y petaloides de y 17.2 cm (Tabla 1). Castillo Martínez *et al.*, (2005), en años anteriores concluyeron que la variedad de genotipos de pitahaya se diferenció principalmente por las características de sus estructuras reproductivas y quienes eran autocompatibles, así como quienes podrían tener un mayor potencial económico para la región sur de Quintana Roo, México. Generalmente, las flores de la pitahaya son grandes y tienen simetría ligeramente bilateral debido a la curvatura o inclinación del tubo receptacular (Andrés Mejía *et al.*, 2013; Cituk Chan *et al.*, 2024). Estudios similares han reportado que las características del cladodio, florales y del fruto de la especie de pitahaya *H. megalanthus*, como las nervaduras marginales del cladodio, la cera, el color del sépalo, el color del anillo en la base de los órganos reproductivos en la flor, la forma del fruto, la posición hacia la cáscara, la pulpa el color, el color de la cáscara y el tamaño de la semilla son rasgos taxonómicos visibles para distinguir entre la especie *H.undatus* y *H. costariscensis* (Morillo-Coronado *et al.*, 2021).

Tabla 1. Descriptores florales relevantes para las cuatro especies de pitahaya. Los números en negrita reflejan el promedio de las principales variaciones en cada especie. La media en cada columna que son diferentes (Tukey P≤0.05)*.
Table 1. Relevant floral descriptors for the four pitahaya species. The numbers in bold reflect the average of the main variations in each species. Means in each column that are different (Tukey P≤0.05)*.

Descriptores florales	*H. ocamponis*	*H. undatus*	*H.* sp	*H. purpusii*
Longitud de la flor (cm)	28.6	**33.3***	**31.2**	26.5
Longitud interna del ovario (cm)	4.4	3.3	3.5	2.7
Ancho interno del ovario (cm)	1.8	**2.2***	1.8	1.8
Longitud del tubo (cm)	9.9	**10.0***	7.3	8.6
Ancho del tubo (cm)	0.7	1.0	0.9	1.1
Número de brácteas ovario	**28.0***	16.1	13.1	13.4
Longitud de brácteas ovario	2.5	3.5	3.4	3.9
Ancho de brácteas chicas	1.1	1.7	2.0	1.8
Número de brácteas del tubo receptacular	**18.4***	13.4	12.2	10.4
Longitud de brácteas del tubo receptacular (cm)	6.0	**10.3***	8.8	8.5
Número de sépalos (tépalos externos)	**18.6***	13.5	12.8	14.3
Longitud de sépalos (cm)	6.0	10.3	**15.7***	9.5
Ancho de sépalos (cm)	1.3	1.6	1.4	1.5
Número de petaloides (tépalos medios)	**25.9***	10.7	11.8	12.3
Longitud de petaloides (cm)	12.2	16.1	**17.2***	12.3
Ancho de petaloides (cm)	1.3	1.4	1.1	1.3
Numero de pétalos	**27.6***	19.7	22.0	19.4
Longitud de pétalos (cm)	10.3	13.6	13.7	10.4
Ancho de pétalos (cm)	2.2	3.1	2.9	1.8
Lóbulos bífidos	0.0	0.9	0.1	3.3
Distancia hercogamia (cm)	0.5	1.3	1.7	0.8
Número de estambres	**926.1***	764.2	729.7	661.1

Otra característica morfológica relevante que se observó fue en la especie *H. ocamponis*, presento márgenes muy marcados de coloración verde y rojizo en las brácteas, los sépalos, petaloides y tépalos externos (Figura 5 a y e). Por otro lado, en las cuatro especies registradas en este estudio, está presente la hercogamia, y se le atribuye como especies autoincompatibles (Castillo Martínez *et al.*, 2005; Lichtenzveig *et al.*, 2000; Morillo-Coronado *et al.*, 2021),que obliga la polinización cruzada para su fecundación (de Nettancourt, 1977). La flor de la especie *Hylocereus* sp tiene una distancia de hercogamia 1.7 cm, mientras que la flor de *H. ocamponis* tiene una distancia de 0.5 cm. Se describe que la hercogamia se refiere a la separación espacial de anteras y estigmas de la misma flor, lo que impide o reduce la autopolinización y la autogamia. Esta característica morfológica es una forma única de polimorfismo morfológico en las flores de algunas especies de plantas, que impide la autofecundación de cada flor (Jiménez-Durán & Cruz-García, 2011). El origen del polen también puede influir en el tiempo transcurrido entre la polinización y la cosecha del fruto (conocido como fenómeno de metaxenia, que anteriormente solo se observaba en *H. polyrhizus* (Le Bellec & Vaillant, 2011). Un caso particular es en la especie *H. undatus*, los

Núm. 60: 61-78 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

episodios de floración son cíclicos y se extienden durante un periodo de cinco a seis días, la polinización de las flores ocurre durante la noche por murciélagos nectarívoros como *Leptonycteris curasoae* y *Choeronycteris mexicana* o por una especie de mariposa perteneciente a la familia Sphingideae, del género *Maduca*. Durante el día, las abejas (*Apis melifera*) polinizan las flores, esto al parecer no es un mayor problema relacionado con el rendimiento de los frutos en los principales países productores de América Latina y Asia (Le Bellec & Vaillant, 2011).

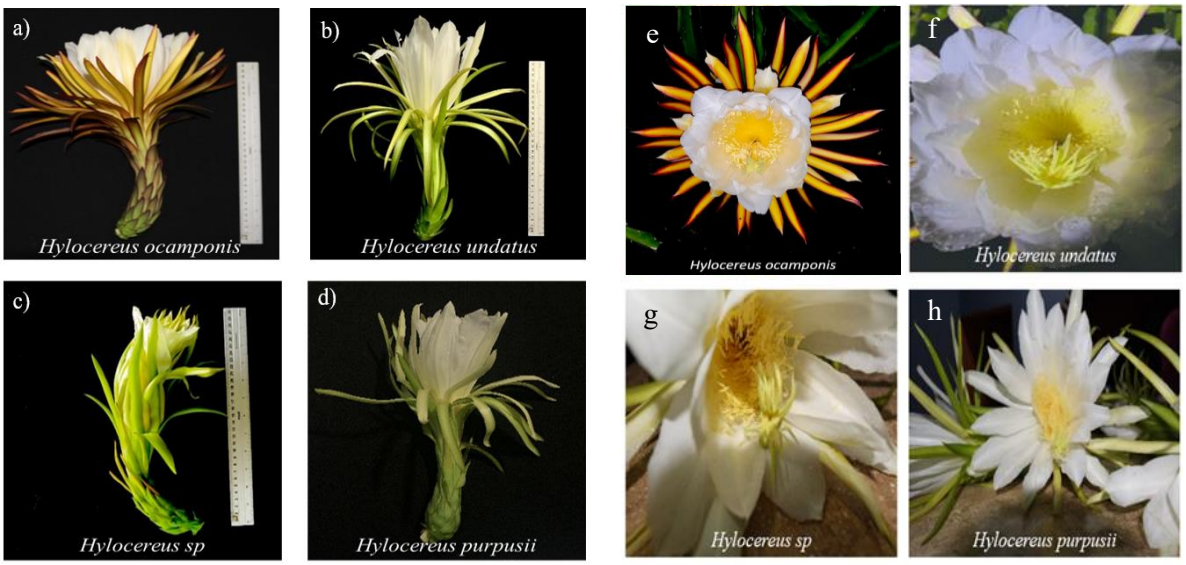


Figura 5. En la letra a-d se observa de manera lateral la flor de la pitahaya. Las letras e-h se observa de manera frontal la flor de las cuatro especies de pitahaya encontradas en los cultivares de Molcaxac, Puebla, Méx.
Figure 5. Letters a-d show the pitahaya flower from the side. Letters e-h show the flowers of the four pitahaya species found in cultivars from Molcaxac, Puebla, Mexico, from the front.

La caracterización morfológica de pitahaya en los cultivos de la parcela "Hermanos Solís" ubicada en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México, permitió diferenciar y determinar la naturaleza de cada especie de pitahaya (Gómez-Hinostrosa *et al.*, 2014). Así como identificar características deseables basados en criterios morfológicos relevantes y estimar el grado de variación dentro de una población de pitahaya para un mejor manejo de producción en las siguientes siembras, como se ha reportado en otros cultivos (Betancur G. *et al.*, 2020; Sudarjat Leovika *et al.*, 2018;Tel-Zur *et al.*, 2011).

Asimismo, permitió sistematizar el trabajo de toma de datos en campo, evaluación y poder difundir la información entre productores (Lachenaud *et al.*, 1999). Debido que, en ocasiones, la amplia variación morfológica que pueden ser observadas en las estructuras vegetativas, podría llevar a la confusión para identificar cada especie, con falta de consenso (Gómez-Hinostrosa *et al.*, 2014). Además, estudios sobre especies de cactus domesticadas (Aparecida de Andrade *et al.*, 2008) han demostrado variaciones en las características morfológicas de la fruta, flores (Ramírez Ortiz, 2017; Silva *et al.*, 2011); y raíces (Verona-Ruiz *et al.*, 2020), están relacionadas con el proceso de domesticación, resultando en una falta de base de datos taxonómicos (Jalgaonkar *et al.*, 2022).

En este estudio, se consideró descriptores claros cualitativos, con una expresión continua en términos positivos acorde a los atributos morfológicos que poseen las variedades de pitahaya (Quevedo Guerrero *et al.*, 2020). Asimismo, con los hallazgos obtenidos en este estudio, se da a conocer la variabilidad global de una previa siembra de pitahaya de la parcela, la cual permitirá en un futuro, homogeneizar las accesiones de acuerdo con sus morfotipos de primer momento y establecer la caracterización morfológica de cuatro especies de pitahayas, que a su vez los descriptores morfológicos puedan ser utilizados en la caracterización fenotípica visual de las especies *Hylocereus ocamponis, Hylocereus undatus, Hylocereus sp* y *Hylocereus purpusii*, para los futuros programas de mejoramiento productivo de los cultivos de pitahaya en la parcela "Hermanos Solís" ubicada en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México. Esta caracterización se pudo discriminar fácilmente entre fenotipos de pitahaya similar a otras investigaciones previas con fines de conservación y mejoramiento genético de las especies; por ejemplo, un estudio evaluó las caracterizaciones morfológicas, bioquímicas y moleculares de cuatro genotipos de fruta del dragón (*Hylocereus* spp.) cultivados en Andaman y en la isla de Nicobar y reveló la presencia de una cantidad considerable de variaciones genéticas que podrían usarse como caracteres clave para distinguir tres especies diferentes. Por lo que la heterogeneidad morfológica y genética en muchas características del fruto, como la dulzura, el tamaño, la forma, el color y el número de brácteas, resultante de la hibridación intra e interespecífica, dificulta aumentar los estándares de calidad para el mercado de exportación, planteando serios problemas al determinar el rendimiento en el manejo y la vida útil de las pitahayas (Abirami *et al.*, 2021). A pesar de que existe muchas contradicciones con respecto a la clasificación botánica de *Hylocereus* que dificultan la caracterización, así como el rendimiento y calidad de fruto en los cultivares de pitahaya (Goenaga *et al.*, 2020); los descriptores morfológicos para este estudio permitió diferenciar y determinar principalmente la longitud primaria de la raíz y raíces adventicias, longitud del tallo y rama; así como la longitud de la flor y la distancia de hercogamia entre las especies de pitahaya y bajo las mismas condiciones ambientales dentro de la parcela, el cual sería una herramienta útil de crecimiento y reactivación agrícola en los cultivos de pitahaya de la parcela "Hermanos Solís" ubicada en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México.

CONCLUSIÓN

En la parcela de "Hermanos Solís" ubicada en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México, se encontraron cuatro especies de plantas de pitahaya. Las raíces tuvieron una marcada variación en la longitud de la raíz primaria entre las cuatro especies evaluadas, *Hylocereus ocamponis, Hylocereus undatus, Hylocereus* sp y *Hylocereus purpusii*. Asimismo, se encontró variación en la longitud de la rama entre las cuatro especies. Por otro lado, en la flor, se encontró la presencia de márgenes muy marcados de coloración verde y rojizo en las brácteas, los sépalos, petaloides y tépalos externos en la morfología de la flor, únicamente en la especie *Hylocereus ocamponis*. Los descriptores usados para este estudio permitieron caracterizar a las plantas de pitahayas cultivadas en una parcela, el cual fue fácil de medir, registrar, evaluar y hacer referencia a la forma y estructura del cultivo de pitahaya. Por lo tanto, se sugiere utilizar descriptores discriminatorios como una guía preliminar de los cultivares de pitahayas en la parcela de "Hermanos Solís" ubicada en el municipio de Molcaxac, estado de Puebla, México, para contribuir en la selección de las especies y que sean de mayor interés productivo.

LITERATURA CITADA

Abirami, K., Swain, S., Baskaran, V., Venkatesan, K., Sakthivel, K., & Bommayasamy, N. (2021). Distinguishing three Dragon fruit (*Hylocereus* spp.) species grown in Andaman and

Nicobar Islands of India using morphological, biochemical and molecular traits. *Scientific Reports*, *11*(1), 2894. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81682-x

Andrés Mejía, H., Muriel Ruiz, S. B., Montoya, C. A., & Reyes Sequeda, C. (2013). *In situ* Morphological Characterization of *Hylocereus* spp. (Fam.: Cactaceae) Genotypes from Antioquia and Córdoba (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, *66*(1), 6845–6854. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179928411002

Aparecida de Andrade, R. , Vilar de Morais Oliveira, I. , Habib Silva, M. T. , & Martins, A. B. G. (2008). Germinação de pitaya em diferentes substratos. *Revista Caatinga*, *21*(1), 71–75. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=237117576010

Balliu, A., & Sallaku, G. (2021). The environment temperature affects post-germination growth and root system architecture of pea (*Pisum sativum* L) plants. *Scientia Horticulturae*, *278*, 109858. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109858

Balliu, A., Zheng, Y., Sallaku, G., Fernández, J. A., Gruda, N. S., & Tuzel, Y. (2021). Environmental and Cultivation Factors Affect the Morphology, Architecture and Performance of Root Systems in Soilless Grown Plants. *Horticulturae*, *7*(8), 243. https://doi.org/10.3390/horticulturae7080243

Bauer, R. (2003). A synopsis of the tribe Hylocereeae F.Buxb. *Cactaceae Systematics Initiatives*, *17*, 6–63.

Betancur G., J. A., Muriel R., S. B., & Gonzalez J., E. P. (2020). Morphological characterization of the red dragon fruit - *Selenicereus undatus* (Haw.) D.R. Hunt – under growing conditions in the municipality of San Jerónimo (Antioquia, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *73*(1), 9019–9027. https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n1.77735

Bravo, H., & Sánchez, H. (1978). *Las cactáceas de México.* (Vol. 1). Universidad Autónoma de México.

Carrillo Criollo, J. F., & Yumbla-Orbes, M. (2022). Caracterización morfológica y análisis de crecimiento de tres cultivares de *Helianthus annuus* L. para flor de corte. *Siembra*, *9*(1), e3323. https://doi.org/10.29166/siembra.v9i1.3323

Carrillo-Galván, G., Bye, R., Eguiarte, L. E., Cristians, S., Pérez-López, P., Vergara-Silva, F., & Luna-Cavazos, M. (2020). Domestication of aromatic medicinal plants in Mexico: Agastache (Lamiaceae)—an ethnobotanical, morpho-physiological, and phytochemical analysis. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, *16*(1), 22. https://doi.org/10.1186/s13002-020-00368-2

Castillo Martínez, M., Muñoz, L., & Guzmán, M. (2005). *Colegio de Postgraduados*.

Castillo Martínez, R., Livera Muñoz, M., & Márquez Guzmán, G. J. (2005). Caracterización morfológica y compatibilidad sexual de cinco genotipos de pitahaya (*Hylocereus undatus*). *Agrociencia*, *39*(2), 183–194. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30239206

Cevallos Macías, K. L. (2022). *Caracterización morfológica en el cultivo de pitahaya (Hylocereus* spp*) en el Ecuador* [Tesis, Universidad Técnica de Babahoyo]. https://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/11373

Cituk Chan, D., Balam Traconis, L., Pool Pech, J. A., Espadas Hernández, J. M., Pinzón López, L., & Andueza-Noh, R. H. (2024). Un vistazo al interior de la pitahaya rosa y blanca (*Selenicereus* spp.). *Centro de Investigación Científica de Yucatán*, 111–115.

de Nettancourt, D. (1977). *Incompatibility in Angiosperms* (Vol. 3). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-12051-4

Esquivel Rodríguez, P. (2013). Los frutos de las Cactáceas y su potencial como materia prima. *Agronomía Mesoamericana*, *15*(2), 215. https://doi.org/10.15517/am.v15i2.11916

Franco, T. L. ., & Hidalgo, Rigoberto. (2003). *Análisis estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos fitogenéticos*. Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos.

Garbanzo-León, G., Chavarría-Pérez, G., & Vega-Villalobos, E. V. (2019). Correlaciones alométricas en *Hylocereus costaricensis* y *H. monocanthus* (pitahaya): una herramienta para cuantificar el crecimiento. *Agronomía Mesoamericana*, 425–436. https://doi.org/10.15517/am.v30i2.33574

Goenaga, R., Marrero, A., & Pérez, D. (2020). Yield and Fruit Quality Traits of Dragon Fruit Cultivars Grown in Puerto Rico. *HortTechnology*, *30*(6), 803–808. https://doi.org/10.21273/HORTTECH04699-20

Gómez-Hinostrosa, C., Hernández, H. M., Terrazas, T., & Correa-Cano, M. E. (2014). Studies on Mexican Cactaceae. V. Taxonomic notes on *Selenicereus tricae*. *Brittonia*, *66*(1), 51–59. http://www.jstor.org/stable/24692673

González Espino, S. E., & Alvarado Ruíz, J. C. (2004). *Utilización de caracteres cualitativos y cuantitativos determinantes en la variación fenotípica de pitahaya (Hylocereus undatus Britt y Rosse), que permiten proponer una guía de descriptores* [Tesis de Ingeniería Agronómica, Universidad Nacional Agraria (UNA)]. https://repositorio.una.edu.ni/id/eprint/1872

Grimaldo-Juárez, O., Suárez-Hernández, Á. M., Ceceña-Durán, C., & González-Mendoza, D. (2018). Diversidad morfológica de semilla y fruto de diez colectas mexicanas de *Lagenaria siceraria*. *Agronomía Mesoamericana*, *29*(1), 63. https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.28205

Hamidah, Tsawab, H., & Rosmanida. (2017). *Analysis of Hylocereus spp. diversity based on phenetic method*. 020012. https://doi.org/10.1063/1.4985403

Hernández Villarreal A. E. (2013). Caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. *Revista Bio Ciencias*, *2*(3), 113–118. https://doi.org/https://doi.org/10.15741/revbio.02.03.05

INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010, Molcaxac, Puebla. In INEGI (Ed.), *Marco Geoestadístico 2010, versión 4.3., clave geoestadística 21098.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21098.pdf

Jalgaonkar, K., Mahawar, M. K., Bibwe, B., & Kannaujia, P. (2022). Postharvest Profile, Processing and Waste Utilization of Dragon Fruit (*Hylocereus* spp.): A Review. *Food Reviews International*, *38*(4), 733–759. https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1742152

Jiménez-Durán, K., & Cruz-García, F. (2011). Incompatibilidad sexual, un mecanismo genético que evita la autofecundación y contribuye a la diversidad vegetal sexual incompatibility, a genetic mechanism that prevents self-fertilization and contributes to plant diversity. In *Artículo de Revisión Rev. Fitotec. Mex* (Vol. 34, Issue 1).

Lachenaud, P., Bonnot, F., & Oliver, G. (1999). Use of floral descriptors to study variability in wild cocoa trees (*Theobroma cacao* L.) in French Guiana. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *46*(5), 491–500. https://doi.org/10.1023/A:1008763321959

Le Bellec, F., & Vaillant, F. (2011). Pitahaya (pitaya) (*Hylocereus* spp.). In *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits* (pp. 247–273e). Elsevier. https://doi.org/10.1533/9780857092618.247

Legaria Solano Juan Porfirio, María Elisa Alvarado Cano, & Ricardo Gaspar Hernández. (2005). Diversidad Genética en Pitahaya (*Hylocereus undatus* Haworth. Britton y Rose). *Revista Fitotecnia Mexicana*, *28*(3), 179–185. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/610/61028301.pdf

Lichtenzveig, J., Abbo, S., Nerd, A., Tel-Zur, N., & Mizrahi, Y. (2000). Cytology and mating systems in the climbing cacti *Hylocereus* and *Selenicereus*. *American Journal of Botany*, *87*(7), 1058–1065. https://doi.org/10.2307/2657005

López-Santiago, J., Nieto-Ángel, R., Barrientos-Priego, A. F., Rodríguez-Pérez, E., Colinas-Leon, M. T., Borys, M. W., & González-Andrés, F. (2008). Selección de variables morfológicas para la caracterización del tejocote (*Crataegus* spp.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, *14*(2), 97–111. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2008000200002&lng=es&tlng=es.

Meráz Alvarado Ma. del Refugio, Manuel Ángel Gómez Cruz, & Rita Schwentesius Rindermann. (2003). Pitahaya de México - Producción y comercialización en el contexto internacional. In C. A. Flores Valez (Ed.), *Pitayas y pitahayas. Producción, poscosecha,*

industrialización y comercialización. (Primera edición, pp. 1–175). CIESTAAM, Universidad Autónoma Chapingo.

Montesinos Cruz, J. A., Rodríguez-Larramendi, L., Ortiz-Pérez, R., Fonseca-Flores, M. de los Á., Ruíz Herrera, Giovanni., & Guevara-Hernández, Francisco. (2015). Pitahaya (*Hylocereus* spp.) un recurso fitogenético con historia y futuro para el trópico seco mexicano. *Cultivos Tropicales, 36*(1), 67–76. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362015000500007&lng=es&tlng=es.

Morillo Coronado, A. C. (2016). Morphological Characterization of *Selenicereus megalanthus* (K. Schum. ex Vaupel) Moran in the Province of Lengupá / Morphological Characterization of *Selenicereus megalanthus* (K. Schum. ex Vaupel) Moran in the Province of Lengupá. *Ciencia En Desarrollo*, *7*(2), 23–34. https://doi.org/10.19053/01217488.v7.n2.2016.4072

Morillo-Coronado, A. C., Manjarres Hernández, E. H., & Forero-Mancipe, L. (2021). Phenotypic Diversity of Morphological Characteristics of Pitahaya (*Selenicereus megalanthus* Haw.) Germplasm in Colombia. *Plants*, *10*(11), 2255. https://doi.org/10.3390/plants10112255

Ortiz-Hernández, Y. D., & Carrillo-Salazar, J. A. (2012). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): a short review. *Comunicata Scientiae*, *3*(4), 220–237. https://comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/334/151

Pedersen, O., Sauter, M., Colmer, T. D., & Nakazono, M. (2021). Regulation of root adaptive anatomical and morphological traits during low soil oxygen. *New Phytologist*, *229*(1), 42–49. https://doi.org/10.1111/nph.16375

Quevedo Guerrero, J. N., Ramírez Villalobos, M., Zhiminaicela Cabrera, J., Noles León, M. J., Quezada Hidalgo, C., & Aguilar Flores, S. (2020). Diversidad morfoagronómica: caracterización de 650 árboles de *Theobroma cacao* L. *Revista Universidad y Sociedad*, *12*(6), 14–21.

Ramírez Ortiz, M. E. (2017). *Propiedades funcionales de hoy* (M.E. Ramírez Ortiz, Ed.). Omnia Science. https://doi.org/10.3926/oms.361

Rosales-Bustamante, E. P., Luna-Morales, C. del C., & Cruz-León, A. (2009). Clasificación y selección tradicional de pitaya (*Stenocereus pruinosus* (Otto) Buxb.) en Tianguistengo, Oaxaca y variación morfológica de cultivares. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, *15*(1), 75–82.

Sánchez–Mejorada R., H. (1984). Origen, taxonomía y distribución de las pitayas en México. En Aprovechamiento del pitayo. *ITAO Oaxaca, UAM. México*, 621.

Silva, A. D. C. C. DA, Sabião, R. R., Chiamolera, F. M., Segantini, D. M., & Martins, A. B. G. (2017). Morphological traits as tool to verify genetic variability of interspecific dragon fruit hybrids. *Revista Brasileira de Fruticultura*, *39*(1). https://doi.org/10.1590/0100-29452017168

Silva, A. de C. correia da, Martins, A. B. G., & Cavallari, L. de L. (2011). Qualidade de frutos de pitaya em função da época de polinização, da fonte de pólen e da coloração da cobertura. *Revista Brasileira de Fruticultura*, *33*(4), 1162–1168. https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000400014

Sudarjat Leovika, A., Suminar, E., Isnaniawar, V., Abdilah Ha, M., Albi Fauzi, A., & Mubarok, S. (2018). Morphological Characterization and Adaptation of Four Dragon Fruit Genotypes in Pangandaran Regency of Indonesia. *Asian Journal of Plant Sciences*, *18*(1), 21–25. https://doi.org/10.3923/ajps.2019.21.25

Tel-Zur, N., Mizrahi, Y., Cisneros, A., Mouyal, J., Schneider, B., & Doyle, J. J. (2011). Phenotypic and genomic characterization of vine cactus collection (Cactaceae). *Genetic Resources and Crop Evolution*, *58*(7), 1075–1085. https://doi.org/10.1007/s10722-010-9643-8

UPOV: Internacional para la protección de las obtenciones vegetales. (2010, December 10). *S TG/DRAGON (proj.5) Proyecto pitahaya*. Chrome-Extension://Efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/Https://Www.Upov.Int/Edocs/Mdocs/Upov/Es/Tc/47/Tg_dragon_proj_5.Pdf. chrome-

Núm. 60: 61-78 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Recibido:
12/octubre/2024

Aceptado:
6/junio/2025

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.upov.int/edocs/mdocs/upov/es/tc/47/tg_dragon_proj_5.pdf

Vallester-Cruzata, R., Caridad M. Noriega-Carrera, David Zamora-Blanco, Hugo Marcelino Oliva-Díaz., Miguel Falcón-Figueroa, Yoandy Rodríguez-Castro, Martha R. Hernández-Zaldívar, Lázaro Ramos-Gourrie, & Alex Pérez-Borges. (2021). la pitahaya o fruta dragón: The pitahaya or dragon fruit. *El fruticultor, CitriFrut.*, *38*(1), 57–64.

Vargas, Y., Pico, J., Díaz, A., Sotomayor, D., Burbano, A., Caicedo, C., Paredes, N., Congo, C., Tinoco, L., Bastidas, S., Chuquimarca, J., Macas, J., & Viera, W. (2020). *Manual del Cultivo de Pitahaya para la Amazonía Ecuatoriana.* (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias., Ed.; Primera edición, Vol. 117). https://www.researchgate.net/publication/343224125_Manual_del_Cultivo_de_Pitahaya_para_la_Amazonia_Ecuatoriana#fullTextFileContent

Vegas Albino, D. P., Bracamonte Guevara, O., & Valladolid Cavero, A. (2015). Caracterización morfológica de seis variedades parentales de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) y trece cruzas obtenidas de un plan de hibridación. *Revista Peruana de Biología*, *22*(2), 175–192. https://doi.org/10.15381/rpb.v22i2.11352

Verona-Ruiz, A., Urcia-Cerna, J., & Paucar-Menacho, L. (2020). Pitahaya (*Hylocereus* spp.): Culture, physicochemical characteristics, nutritional composition, and bioactive compounds. *Scientia Agropecuaria*, *11*(3), 439–453. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.16

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE DIAFANIZACIÓN VEGETAL EN LAS ESPECIES: *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) Y UNA SPERMATOFITA *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)

STANDARDIZATION OF THE PLANT DIAPHANIZATION PROCESS; OF *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) AND ONE SPERMATOPHYTA *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)

Márquez Juárez, R.C., A. Chowell-López, D. Martínez Mata, G. Sánchez Fabila, R. Moreno Colín, P.A. Badillo-Suárez, I.E.B. Manuell Cacheux, R. Monterrubio Valdivia

ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE DIAFANIZACIÓN VEGETAL EN LAS ESPECIES: *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) Y UNA SPERMATOFITA *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae) STANDARDIZATION OF THE PLANT DIAPHANIZATION PROCESS; OF *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) AND ONE SPERMATOPHYTA *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 79-89 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.5

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Estandarización del proceso de diafanización vegetal en las especies: *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) y una spermatofita *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)

Standardization of the plant diaphanization process; of *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) and one Spermatophyta *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)

Ruth Concepción Márquez Juárez https://orcid.org/0009-0004-6818-7403
Cabecera de Botánica Facultad de Estudios Superiores Iztacala
Av. De los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, 54090, Tlalnepantla, Estado de México

Arantxa Chowell-López https://orcid.org/0009-0007-8256-2910
Diego Martínez Mata https://orcid.org/0009-0002-7947-9394
Gabriela Sánchez Fabila / gsfabila@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-0342-5402
Roberto Moreno Colín https://orcid.org/0000-0003-2155-1226
Laboratorio de Química y Fisicoquímica
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Av. De los Barrios 1
Los Reyes Iztacala, 54090, Tlalnepantla, Estado de México

Pilar Amellali Badillo-Suárez https://orcid.org/0000-0002-3933-4476
Irma Estrella Beatriz Manuell Cacheux https://orcid.org/0009-0001-3683-0888
Laboratorio de Química y Fisicoquímica Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Av. De los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, 54090 Tlalnepantla, Estado de México

Rogelio Monterrubio Valdivia https://orcid.org/0009-0005-3427-6843
Taller de Equipo para Laboratorio de Enseñanza
Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Av. De los Barrios 1
Los Reyes Iztacala, 54090, Tlalnepantla, Estado de México

RESUMEN: La diafanización de plantas es una técnica que permite distinguir los diversos tipos de arquitectura vegetal. Sin embargo, ha sido subestimada debido a las complicaciones que presentan técnicas previas, como la técnica 5-5-5 (Arambarri, 2018), como lo es el uso del hidrato cloral el cual es un componente que conduce a la sedación, deprimiendo el sistema nervioso central.

Los objetivos de este trabajo fueron: Estandarizar la técnica de diafanización 5,5,5 en las especies de *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae) y *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) y *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae) evitando el uso de hidrato cloral; así como comparar la eficacia de diferentes colorantes.

Como pruebas preliminares, se analizaron flores, hojas y tallos de siete especies diferentes, y finalmente se seleccionaron hojas de dos especies de helechos *Adiantum pedantum* L. y *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott, así como tallos y hojas de *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae). Se tomó como referencia la técnica de clarificación 5-5-5 (Arambarri, 2018), reduciendo el tiempo de exposición de la solución clarificante para optimizar la absorción de los colorantes.

Se seleccionaron siete colorantes y dos combinaciones. Mediante el uso de azul de toluidina (AT), TS, ST, azul de metileno (AM) y violeta cristal (GV), se observó tejido vascular, esporangios en las pinnas del helecho y estomas.

Se identificó que el tiempo de diafanización varía según el tejido; se diferenciaron diversas estructuras mediante el uso de los 7 colorantes, consiguiendo una reducción del

Márquez Juárez, R.C., A. Chowell-López, D. Martínez Mata, G. Sánchez Fabila, R. Moreno Colín, P.A. Badillo-Suárez, I.E. B. Manuell Cacheux, R. Monterrubio Valdivia

ESTANDARIZACIÓN DEL PROCESO DE DIAFANIZACIÓN VEGETAL EN LAS ESPECIES: *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) Y UNA SPERMATOFITA *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)

STANDARDIZATION OF THE PLANT DIAPHANIZATION PROCESS; OF *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) AND ONE SPERMATOPHYTA *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 79-89. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.5

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

77% del tiempo de realización y una disminución del 20% del costo, además al evitar el uso de hidrato cloral se reduce el costo, haciendo más accesible la técnica para la elaboración de material didáctico.
Palabras clave: Diafanización, histología, colorantes, tejidos vegetales, clarificación.

ABSTRACT: Plant diaphanization is a technique that allows to distinguish the various types of plant architecture; however, it has been underutilized due to complications associated with previous
techniques, such as the 5-5-5 method proposed by Arambarri (2018); such as the use of chloral hydrate, which is a component that leads to sedation, depressing the central nervous system.
The aims of this work were: Standardize the diaphanization technique 5,5,5, in the species *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae), *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) and *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder (Rosaceae) avoiding the use of chloral hydrate; and compare the effectiveness of different dyes.
As preliminary tests, flowers, leaves, stems of 7 different species were analyzed, and finally the leaves of ferns of the species *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott and *Adiantum pedantum* L. as well as stems, leaves of *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder were selected. The 5-5-5 clarification technique (Arambarri, 2018) was taken as a reference, reducing the exposure time of the clarifying solution material to optimize the absorption of dyes.
Seven dyes and two combinations were selected. By using toluidine blue (AT), TS, ST, methylene blue (AM) and crystal violet (GV), the vascular tissue, sporangia could be observed in the pinnae of the fern and stomata.
It was identified that the diaphanization time varies depending on the tissue, several structures were differentiated from the use of the 7 dyes; achieving a 77% reduction in completion time and a 20% reduction in cost, furthermore, by avoiding the use of chloral hydrate, the cost is reduced, making the technique more accessible for the production of didactic materials.
Key words: Diaphanization, histology, dyes, plant tissue, clarify.

INTRODUCCIÓN

Identificar las características anatómicas de las plantas resulta una herramienta básica para la investigación y la enseñanza en diferentes disciplinas de la botánica. Cada uno de los órganos de la planta (raíz, tallo, hoja y flor) está formado por diferentes tejidos, que derivan todos, por medio de la proliferación y la diferenciación celular (Apóstolo, 2021). Los tejidos pueden estar conformados por un solo tipo de células formando un tejido simple o por varios tipos celulares formando tejidos complejos (Valencia, 2014). De acuerdo con la clasificación propuesta por el botánico alemán Sachs, en el siglo XIX, los tejidos maduros se pueden agrupar en tres sistemas de acuerdo con su función y continuidad en el cuerpo vegetal: sistema fundamental, sistema de protección y sistema vascular, también se pueden usar otras clasificaciones basándose en el origen, la función o diferenciación morfológica (Megías *et al.*, 2020). Por ejemplo, los tejidos meristemáticos que pueden considerarse tejidos embrionarios que persisten en la planta durante toda su vida y son responsables del crecimiento permanente de la planta. Los tejidos meristemáticos primarios dan origen a otros tejidos y están relacionados con el crecimiento de las plantas, posibilitan el crecimiento en longitud y los meristemos secundarios permiten el crecimiento en espesor de las plantas dicotiledóneas leñosas y gimnospermas (Chuncho, 2019). Posteriormente aparecen los tejidos diferenciados o adultos, cuyas células han alcanzado diversos grados de maduración. Se incluyen aquí a la epidermis, tejidos mecánicos o de sostén, tejidos conductores, y el parénquima (Lavalle y Mengascini, 1998).
Para la determinación de caracteres anatómicos el estudio de los tejidos vegetales tiene un valor significativo en diferentes áreas por ejemplo, la industria alimentaria, la medicina , la paleontología, la industria del papel y la académica; esto comprueba que los análisis anatómicos son necesarios para realizar estudios interdisciplinarios para lo cual se han utilizado diversas

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

técnicas de estudio como: inclusiones en parafina, disociados, así como, técnicas de tinción y diafanización (Apóstolo, 2021).

La diafanización es la obtención de material transparente (clarificación) a partir de una técnica que aclara el tejido blando para equilibrar el índice de refracción de la luz en un organismo preservándolo, además de despigmentar las estructuras, dependiendo de su composición y función (Sandoval *et al.*, 2017). Esta técnica es comúnmente empleada en estudios de morfofisiología vegetal para resaltar principalmente la vascularización de las hojas y formar una imagen tridimensional del tejido.

Es importante recalcar que, la técnica de diafanización en las plantas facilita la observación de tejido vascular, células epidérmicas, y utilizando la safranina como colorante, permite observar la pared celular. Este pigmento es el más utilizado en la tinción vegetal ya que presenta afinidad por las paredes secundarias lignificadas, mientras que para teñir paredes no lignificadas (paredes celulares primarias) es común usar el cristal violeta o verde rápido.

A su vez, las plantas presentan pigmentos naturales como la clorofila, antocianinas y carotenos, los cuales facilitan la observación directa con el microscopio óptico, las paredes celulares también favorecen en la delimitación celular y la identificación de algunos tejidos con ciertas características morfológicas. De acuerdo con (Armiñana R. J. y Breijo G. F., 2006), en las técnicas de histología vegetal se pueden emplear tinciones, en las cuales la coloración se produce simplemente por inmersión en el colorante, como la tinción con Safranina, o se pueden utilizar colorantes metacromáticos, como el Violeta de Cresilo el cual tiñe de manera diferencial distintas estructuras, por ejemplo, tiñe color rojo violáceo paredes primarias no lignificadas y de color verde azulado las paredes secundarias lignificadas. Además, se puede recurrir a las combinaciones de colorantes, de forma sucesiva o simultánea, no obstante, en ocasiones las laminillas no alcanzan la calidad o nitidez necesaria por lo que se tendrían que combinar con alguna otra técnica como la diafanización.

En el caso de la técnica de clarificación **5-5-5** (Arambarri, 2018), los reactivos utilizados son Hidróxido de sodio (NaOH) al 5%, Hipoclorito de sodio (NaClO) al 5 % y 50% e Hidrato de cloral ($C_2H_3Cl_3O_2$) al 5%, en el caso de este último reactivo debido a su condición de sustancia regulada por ser un compuesto con propiedades sedantes, hipnóticas y anticonvulsivas es difícil de obtener y con costo aproximado de $950.00 MXN por lo que, se optó por hacer una modificación a la técnica original de diafanización, reduciendo el costo y evitando el uso de hidrato cloral cuya manipulación de este reactivo puede representar un factor de riesgo para los estudiantes, en caso de que ellos preparen las muestras.

Lo anteriormente mencionado deja en evidencia la relevancia que tendría el estandarizar la técnica de diafanización en los tejidos vegetales por lo que, este estudio tuvo como objetivo estandarizar la técnica de diafanización 5,5,5 en las especies de *Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae) y *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) y *Pyracantha koidzumii Hayata Rehder* (Rosaceae) (https://tropicos.org/home).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales biológicos empleados

Se obtuvieron muestras de material fresco recolectado en el Jardín Botánico de Iztacala (JABIZ) de la FES Iztacala en el mes de marzo de 2024, considerando un total de 10 muestras por género. Aunque inicialmente se analizaron flores, hojas, tallos y frutos de siete géneros, los datos sobre las especies completas no fueron detallados en los análisis comparativos previos. En este estudio, las especies que fueron evaluadas a profundidad fueron (*Adiantum pedantum* L. (Pteridaceae) y *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) y una Spermatophyta *Pyracantha* koidzumii Hayata Rehder (Rosaceae).

Después del proceso de diafanización, las preparaciones se observaron en un Microscopio óptico compuesto binocular “Motic” en el Laboratorio de Microscopía de la FES- Iztacala.

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Tabla 1. Comparación de la técnica de clarificación 5-5-5 (Arambarri, 2018) y las modificaciones realizadas.
Table 1. Comparison and modification of the 5-5-5 clarification technique (Arambarri, 2018).

	Técnica de clarificación 5-5-5	**Modificación**
Tratamiento previo	Material en fresco se fija 15 días en etanol al 50% o en FAA	El material fresco no se fijó en etanol, se sometió de inmediato al tratamiento clarificante.
Aclaramiento	Material en solución 1:1 de NaOH al 5% y NaClO al 5%, conservándolo a temperatura ambiente. El tiempo de decoloración, de acuerdo al material es altamente variable desde horas a 15 días, siendo el promedio 4 a 5 días.	Material en solución 1:1 de NaOH al 5% y NaClO al 5%. Tiempo de decoloración de 2-7 días.
	Retirar y lavar en cajas petri con agua corriente o agua destilada.	-Retirar y lavar con agua corriente 30 segundos. -Colocar las muestras en etanol [80%] durante 5 días.
	Colocar material en solución hipoclorito de sodio al 50% unos segundos o minutos.	
	Retirar y lavar con agua destilada 3-5 veces.	
	Una vez lavado el material se coloca en solución de hidrato cloral al 5% mínimo 24 horas.	
	En caso de obtener una total decoloración en la mezcla inicial de NaOH (5%) + NaClO (5%), se saltará el paso de la decoloración con hipoclorito de sodio (50%) y continuará con el lavado y sumersión en hidrato de cloral ($C_2H_3Cl_3O_2$) al 5%, para su clarificación. El material puede permanecer varios días (nunca menos de un día).	
Tiempo total	25- 30 días dependiendo de la especie	7 días

Se tomó como referencia la técnica de clarificación 5-5-5 (Arambarri, 2018) misma que consiste en la diafanización de tejido vegetal usando [NaClO 5%], [NaOH 5%] y ($C_2H_3Cl_3O_2$) al 5%, con un promedio de decoloración de 5 días en dicha solución.
La estandarización consistió en someter de inmediato el material vegetal a las soluciones clarificantes sin utilizar el hipoclorito de sodio al 50% y el hidrato cloral.

Tinción y montaje
En la técnica de clarificación 5,5,5, se utiliza Safranina al 1%, Safranina a saturación en alcohol 80% y Fucsina básica 0,5%. Para este estudio se optó por utilizar como colorante control la solución de safranina (S) y se probó con otros colorantes acuosos que suelen ser utilizados en diferentes técnicas histológicas como, azul de toluidina (AT), azul de metileno (AM), gelatina cristal-violeta (GV) o solo violeta de genciana (V), también se hicieron las combinaciones de azul de toluidina y violeta de genciana (TV) y Azul de Toluidina-gelatina safranina (ST). Como pruebas adicionales se utilizó la Fucsina básica (F) y la tinta china (TC).

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Para el montaje de las muestras se utilizó gelatina-glicerina y se le agregaron los colorantes safranina y cristal violeta, las gelatinas se colocaron en baño María durante 10 minutos hasta que estuvieran en estado líquido, posteriormente se tomó cada una de las muestras y se colocó sobre el portaobjetos nuevo y limpio, adicionando una gota de la gelatina y finalmente se colocó el cubreobjetos limpio y seco en ángulo de 45° y se dejó caer suavemente.

Tabla 2. Procedimiento de tinción y montaje de las hojas diafanizadas.
Table 2. Staining and assembly procedure of the diaphanized leaves.

Colorantes	**Técnica de clarificación 5,5,5**	**Modificación**
-Safranina al 1% -Azul de Toluidina -Azul de Metileno -Cristal violeta 0.5% -Fucsina básica 0,5% -Tinta china -Gelatina cristal-violeta -Azul de Toluidina-violeta de genciana -Azul de Toluidina-gelatina safranina	Para la coloración con safranina se puede seguir la técnica indicada por Dizeo de Strittmatter (1973), el material se somete a etanol al 70% por 10 minutos, posteriormente se sumerge el material en solución saturada de safranina en etanol al 80%. Montaje en directo en gelatina-safranina y gelatina-fucsina	La mitad de las muestras se sometieron directamente a los colorantes, y la otra mitad se colocó en etanol por 5 días y posteriormente se enjuagaron en agua corriente durante 30 segundos después de realizar el proceso de tinción.

RESULTADOS

Con el método anteriormente descrito se logró una buena diafanización en las hojas de *Adiantum pedantum*, *Nephrolepis exaltata* y *Pyracantha koidzumii.* En el proceso de diafanización las muestras fueron colocadas en una solución de [NaClO 5%] e [NaOH 5%] por 5 días tal como se menciona en la técnica original omitiendo el paso de colocar el material en hidrato de cloral al 5%. Considerando los tiempos propuestos por Arambarri en el 2018 la técnica de diafanización podría completarse en un tiempo de 25 a 30 días dependiendo la especie. Sin embargo, como se observa en la Tabla 1, con las modificaciones sugeridas la diafanización podría efectuarse en un tiempo promedio de 7 días logrando una reducción al menos del 77% del tiempo y al evitar el uso de hidrato cloral se puede reducir entre 15- 20% del costo.

Dentro de las pruebas se observó que las hojas de *Adiantum pedantum*, *Nephrolepis exaltata* y *Pyracantha koidzumii,* mostraron resultados favorables ya que se observó un mejor contraste pudiendo identificar fácilmente el tejido vascular, en el caso de *Nephrolepis exaltata* se observaron los esporangios, soros y las células epidérmicas. El proceso de clarificación fue de dos a 7 días, diafanizando rápidamente las hojas de las tres especies.

Inicialmente las pinnas de *Nephrolepis exaltata* estuvieron 5 días en solución de [NaClO 5%] e [NaOH 5%], sin embargo, la manipulación no fue sencilla, por lo que fue necesario reducir el tiempo de exposición en un rango de 24 a 48 horas.

Como se mencionó anteriormente para poder realizar las tinciones, se enjuagó el material con agua corriente por 30 segundos, la mitad de las muestras se sometieron directamente a los colorantes, y la otra mitad fue colocada en etanol por 5 días y un enjuague de 30 segundos para después realizar el proceso de tinción.

Como primeros resultados se notó que la fucsina no se impregnó en las muestras, la fucsina básica se utiliza como colorante de contraste y corresponde al reactivo denominado Violeta Ácido ($C_{20}N_3H_{17}O_9S_3Na_2$), la función específica de contraste se explica por la presencia tanto de los anillos como del grupo NH_2 es un colorante básico que se utiliza en histología vegetal para resaltar ciertas estructuras y componentes con cargas negativas,

Por otro lado, el AM, así como el AT resultaron efectivos con tiempos de 10, 20 y 30 minutos, las mejores tinciones fueron las que se sumergieron en los colorantes 30 minutos después de estar en etanol [80%] por 5 días. La S y la tinta china sobresaturó el tejido de todas las muestras dejando

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

residuos en la preparación al momento del montaje e impidiendo la observación de estructuras vegetales nítidas, por lo que se descartaron. El uso de gelatina-glicerina, cristal violeta y safranina (GV, GS), ya sea solas o en las combinaciones de azul de toluidina-violeta de genciana y azul de toluidina - gelatina-glicerina- safranina (TV o TS) tuvieron resultados favorables, ya que, se lograron observar diferentes estructuras celulares.

De todas las preparaciones que se realizaron en ensayos previos no se lograron buenos resultados con flores y tallos. Sin embargo, los resultados fueron satisfactorios para las hojas de *Adiantum pedantum*, *Nephrolepis exaltata* y *Pyracantha koidzumii teñidas* con AT, AM, GS, GV, TV y TS, descartando los colorantes que no se impregnaron o dejaron residuos en las muestras, ya que impedían la identificación de estructuras vegetales.

Al usar el AT, TS, AM y GV en las pinnas del helecho se pudo observar el tejido vascular y los soros, tal como se observa en la Figura 1.

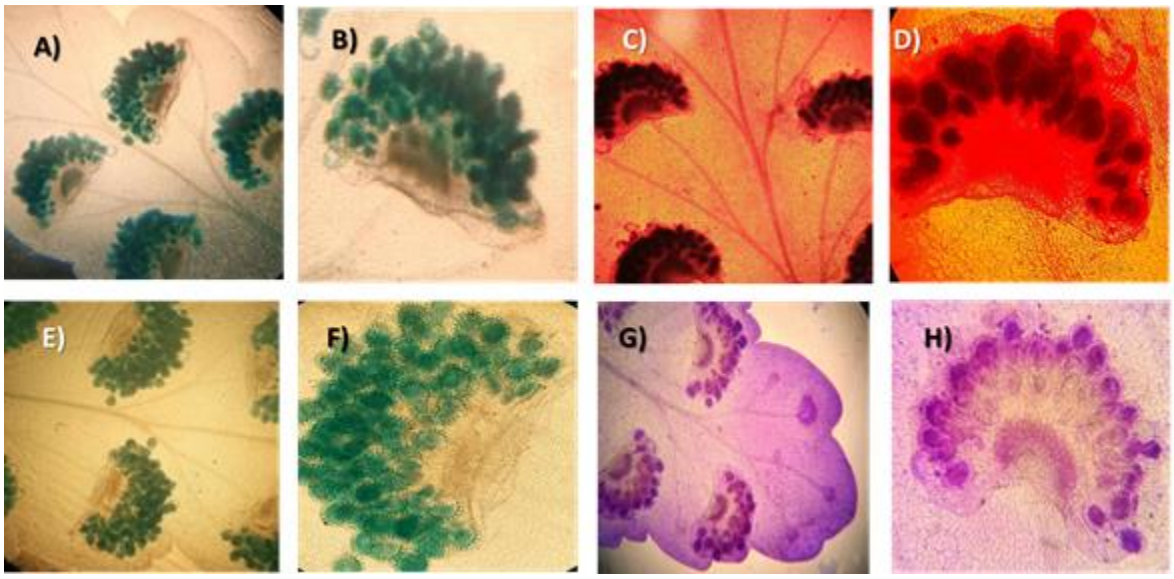


Figura 1. Pinna de *Nephrolepis exaltata* (L.), se aprecia la pinna con esporangios a diferentes aumentos 4x (A, C, E, G) y (10x (B, D, F, H), resaltando la venación y los soros. A) Soros AT (30 min), B) Soros AT (30 min), C) Soros ST (30 min), D) Soros ST (30 min), E) Soros AM (30 min), F) Soros, AM (30 min), G) Pinna, GV (0 min), H) Soro GV (30 min).

Figure 1. Pinna de *Nephrolepis* exaltata (L.), the pinna with sporangia can be seen at different magnifications 4x (A, C, E, G) and (10x (B, D, F, H)., highlighting the venation and sori. A) Soros AT (30 min), B) Soros AT (30 min), C) Soros ST (30 min), D) Soros ST (30 min), E) Soros AM (30 min), F) Soros, AM (30 min), G) Pinna, GV (0 min), H) Soro GV (30 min).

En las preparaciones de AT, GV y TV se potencia el contraste de estructuras pues permite diferenciar el tejido vascular y los soros con más claridad. Sin embargo, al usar TS se pierde la claridad en la diferenciación de las estructuras.

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

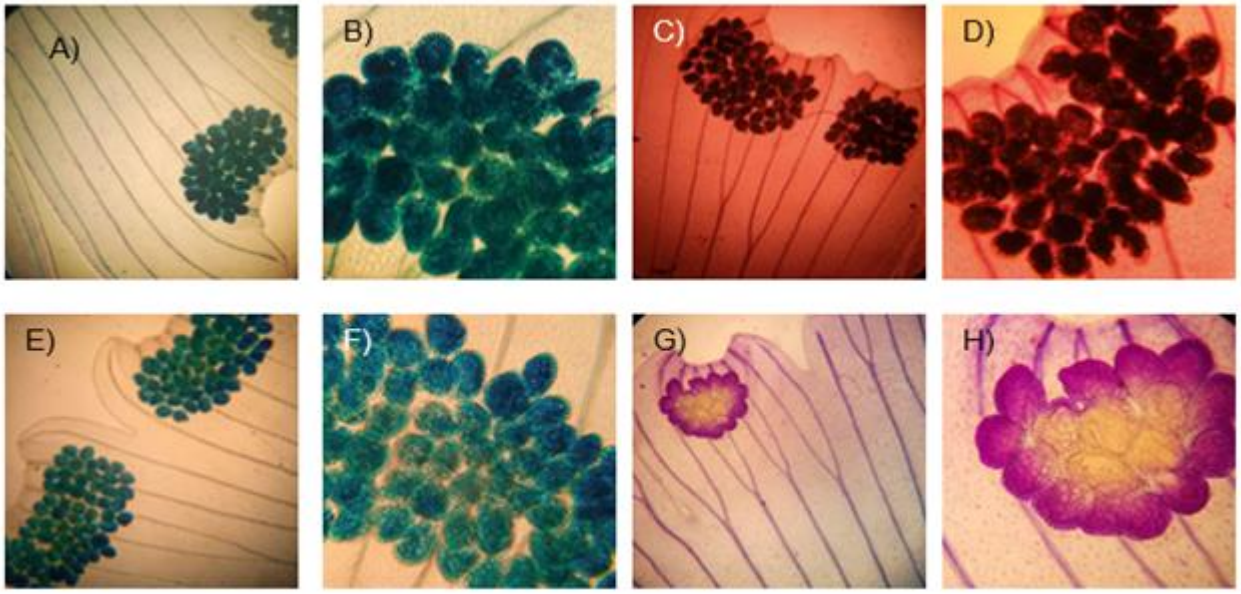


Figura 2. Pinna de *Adiantum pedantum* L. se aprecia la pinna con esporangios marginales en diferentes aumentos 4x (A, C, E, G) y (10x (B, D, F, H). A) Soros AT (30 min), B) Esporangio, AT (30 min), C) Soros ST (30 min) D) Esporangio ST (30 min) E) Soros AM (30min), F) Esporangio AM (30min), G) Pinna GV, H) Esporangio, GV.
Figure 2. Pinna de *Adiantum pedantum* L. The pinna with marginal sporangia can be seen at different magnifications 4x (A, C, E, G) and (10x (B, D, F, H). A) Soros AT (30 min), B) Sporangium AT (30 min), C) Soros ST (30 min) D) Sporangium ST (30 min) E) Soros AM (30min), F) Sporangium AM (30min), G) Pinna GV, H) Sporangium GV.

Cuando se utiliza únicamente GV se tiñen con mayor intensidad las paredes celulares, pero se pierden detalles de la pinna del helecho, en el caso de ST se tiñen bien las paredes celulares, sin embargo, el color rojo se impregna de tal forma que impide ver con claridad la diafanización del tejido tanto en los helechos como en *Pyracantha koidzumii.*

En la figura 3 la tinción con AM en *Pyracantha koidzumii* presenta una coloración más clara en comparación con AT y TV, el AM tiñó con claridad las venaciones de la hoja, sin embargo, 30 minutos no fue suficiente para que se impregnará el colorante por lo que no se observaron con nitidez las paredes celulares.

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

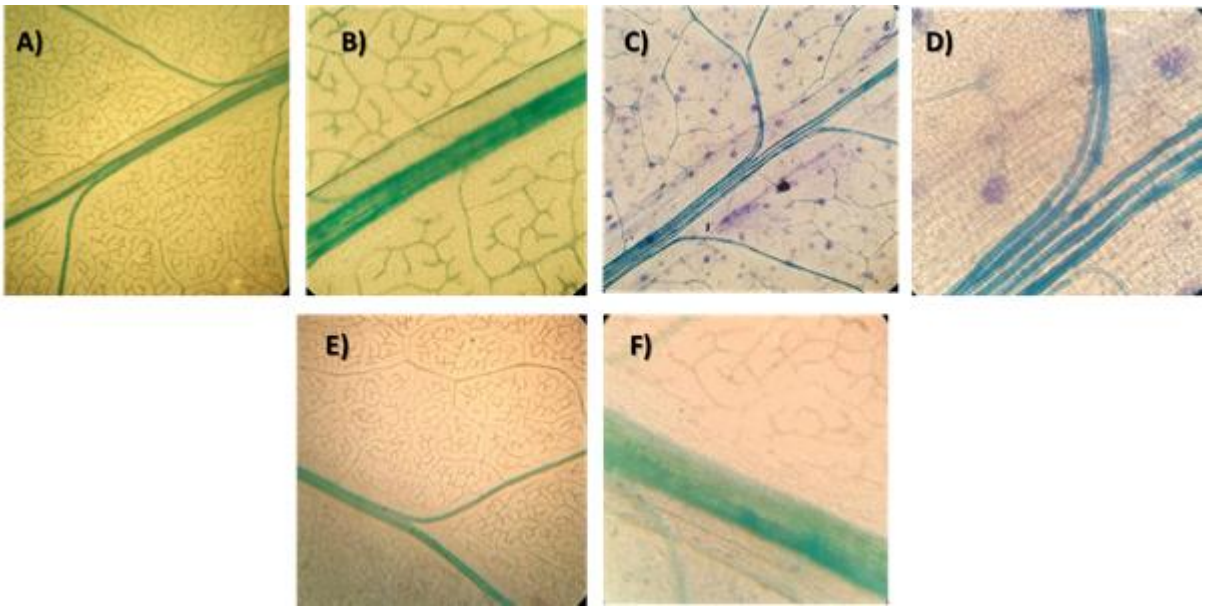


Figura 3. Hoja de *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder se aprecia las venas y el tejido epidérmico en diferentes aumentos 4x (A, C, E, G) y (10x (B, D, F, H). A) AT (30min) B) Hoja AT (30min)10 C) Hoja TV (30min) D) Hoja TV (30min) E) Hoja AM (30min) F) Hoja AM (30min).
Figure 3. Leaf of *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder the veins and epidermal tissue can be seen at different magnifications 4x (A, C, E, G) and (10x (B, D, F, H). A) AT (30min) B) Hoja AT (30min)10 C) Hoja TV (30min) D) Hoja TV (30min) E) Hoja AM (30min) F) Hoja AM (30min).

DISCUSIÓN

El método de Arambarri (2018) describe cuatro etapas, que son el tratamiento previo, la clarificación, la tinción y el montaje. El método propuesto en este artículo consta de cinco procesos en dos etapas omitiendo la fijación en alcohol y comenzando el proceso de aclaración vegetal en las soluciones clarificantes NaOH al 5% y NaClO al 5% (1:1), se excluyeron las fases de introducir el material en hipoclorito de sodio al 50%, retirar y lavar de 3 a 5 veces, y colocar el material en solución de hidrato cloral al 5%.

Arambarri indica que el tratamiento previo es importante, considerando que el trabajo con material fresco generalmente es más difícil que hacerlo con material herborizado, sin embargo, depende del órgano y su composición química. En la técnica original se menciona que debe de permanecer el material fresco por lo menos 15 días en etanol [50%] antes de comenzar la clarificación. En la modificación que se realizó, los materiales fueron colocados de inmediato en la solución clarificante con un tiempo menor a los 5 días indicados por Arambarri para posteriormente ser fijados en etanol [80%] por 5 días.

En la técnica 5-5-5 Arambarri (2018) utiliza safranina líquida al 1% con agua destilada y etanol al 80%, este método se aplicó en las muestras, pero en cuanto se sumergieron en la safranina el tejido se sobresaturó, por lo que se optó por utilizar gelatina-safranina para montar y teñir, sin embargo, se perdió la transparencia y nitidez de las estructuras vegetales.

Se usó fucsina básica como una alternativa más en las tinciones, pero al someter las muestras en esta solución no se tiñó la muestra, contrario a lo realizado por Arambarri, quién utilizó gelatina con fucsina básica, el cual es un colorante catiónico, esta característica le confiere afinidad por las estructuras celulares y los componentes ácidos de los tejidos. Por lo tanto, se utiliza ampliamente en técnicas de tinción para resaltar y visualizar estructuras como los núcleos celulares, considerando que permite una tinción selectiva de ciertos componentes celulares, las muestras vertidas en este colorante no se pigmentaron por lo que también fue descartado.

Núm. 60: 79-89 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Se observó que las pinnas de helechos pueden ser un modelo adecuado para la diafanización por su resistencia a la solución clarificante, un fácil manejo a la tinción y montaje, además al teñirlas con AM y AT, solos o con una doble tinción genera un contraste de color lo que permite ver con claridad el tejido vascular, estomas y soros. Estas observaciones concuerdan con las de Tejero, et al., 2010, quién por medio de la diafanización de las hojas pudo identificar patrones de venación en *Polypodium plesiosorum sensu Moran* (Polypodiaceae) junto con la posición de los soros usando hidróxido de sodio al 2% en lugar de l%, con la modificación propuestas en este trabajo la estructura de los esporangios y esporas se observan más nítidamente, lo que implica una buena alternativa para la identificación taxonómica de dichas estructuras.

Los métodos de aclaración en en las hojas son utilizados principalmente para observar la arquitectura foliar y caracteres específicos que ayudan a diferenciar los taxones, tal como lo reportan Rodríguez y Romero en 2007 en donde observaron los patrones de venación, areolas y estomas en hojas de diez especies de encinos, en esta investigación seleccionaron hojas que sometieron a un proceso de aclaramiento, para lo cual se sumergieron en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a 5% y se dejaron hervir durante 10 minutos, después se lavaron en agua corriente y se colocaron en una solución caliente de hipoclorito de sodio (NaClO) a 30% hasta que quedaron blancas, enseguida se lavaron con agua corriente. Para realizar la tinción, las hojas aclaradas se colocaron en safranina alcohólica a 1% durante 45 minutos. Después se hicieron cambios graduales de alcohol, a 60%, 70%, 80% y 96%, de 15 minutos cada uno; posteriormente se colocaron en xilol hasta lograr su aclaramiento.

Por otro lado, Hernández y colaboradores en 2021, estudiaron las hojas de diez especies de *Gouania* (Rhamnaceae) para México con el propósito de identificar aspectos morfológicos y anatómicos foliares que pudieran permitir la diferenciación de los taxones. Las hojas completas de cada una de las especies fueron diafanizadas por separado mediante la técnica de Aguirre-Claverán y Arreguín-Sánchez (1988, p. 11). Las láminas aclaradas permanecieron en cajas de Petri con agua y se tomaron fotografías de este material. Posteriormente una parte de las hojas, fueron teñidas con dos gotas de azul de metileno comercial fish care por un minuto y después se pasaron a otra caja con agua. A la otra parte de las láminas foliares se les añadió dos gotas de safranina por dos minutos y se colocaron en cajas de Petri con agua, como medio de montaje se utilizó una solución de miel de maíz con agua 1:1 y trazas de fenol, para posteriormente tomar fotografías de este material.

Cabe mencionar que en los métodos de montaje se deben de considerar el objetivo del estudio, el origen y características de la muestra, por ejemplo, se pueden obtener preparados frescos en donde el medio de montaje es agua o glicerina-agua y los preparados se descartan posterior a su visualización, en los preparados semipermanentes, como medio de montaje se utiliza glicerina-agua o gelatina-glicerina. Los bordes del cubreobjeto se sellan sobre el portaobjeto con esmalte o un adhesivo, para reducir la deshidratación y el ingreso de contaminantes. Este tipo de preparados duran varios meses o años, dependiendo del cuidado durante la manipulación de la muestra, montaje y sellado y finalmente los preparados permanentes, generalmente la secuencia se organiza como conservación, fijación, deshidratación, inclusión, cortado, pegado, coloración, montaje y observación. El resultado es un preparado que puede utilizarse por décadas (Suárez *et. al.*, 2022).

Es importante destacar que en la FES Iztacala contamos con materiales limitados para la preparación de muestras sobre todo para la enseñanza, por lo cual se utilizaron los materiales con los que se disponía en el laboratorio.

CONCLUSIONES

Se redujeron costos ya que se utilizó para el lavado agua corriente en lugar de agua destilada y se omitió el uso de hipoclorito de sodio al 50% e hidrato cloral.

Las mejores tinciones fueron las que se sumergieron en los colorantes 30 minutos después de estar en etanol [80%] por 5 días.

En hojas diafanizadas de *Adiantum pedantum* L., *Nephrolepis exaltata* (L.) Schott (Nephrolepidaceae) y *Pyracantha koidzumii* Hayata Rehder, se compararon siete tinciones con colorantes simples y dos combinaciones, considerando que los de mayor efectividad fueron cristal violeta, azul de toluidina, azul de metileno, gelatina cristal violeta, azul de toluidina, y la combinación de azul de toluidina-violeta de genciana.

Finalmente es importante destacar que los estudios anatómicos e histológicos del tejido vegetal se relacionan con diferentes intereses científicos, tecnológicos y educativos, por ello la técnica propuesta puede ser útil y de bajo costo para generar colecciones para la docencia e investigación.

LITERATURA CITADA

Aguirre Claverán, R., & Arreguín Sánchez, M. (1988). *Claves de Familias, géneros, especies y variedades de Pteridofitas de Nuevo León*. 29–41.

Apóstolo, M. Nancy. (2021). *Atlas de Anatomía Vegetal* (1a ed.). Editorial Universidad Nacional de Lujan.

Chuncho, V. Guillermo A., Chuncho M. Carlos G., & Aguirre M. Zhofre H. (2019). *Anatomía y Morfología Vegetal* (1a ed.). EDILOJA Cia. Ltda.

Hernández-Peñaloza, K., Fernández-Nava, R., & Arreguín-Sánchez, M. L. (2021). Arquitectura foliar y anatomía epidérmica de las especies mexicanas del género *Gouania* (Rhamnaceae). *Polibotánica*, *0*(52), 151–174. https://doi.org/10.18387/polibotanica.52.11

Lavalle, M. M. A. (1998). *Manual de Temas Botanicos* (2a ed.). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.

Suarez, A. S., Albana Di Palma, M., Cardozo, G. P., & Travaglia N. C. (2022). *Técnicas de Histología Vegetal. Un Abordaje para su Utilización en Microscopía Óptica* (1a ed.). UniRío.

Arambarri, A. M. (2018). La "técnica de clarificación 5-5-5", un método natural para el tratamiento de material vegetal. *Boletín de La Sociedad Argentina de Botánica*, *53*(4), 1–10. https://doi.org/10.31055/1851.2372.V53.N4.21980

Armiñana, R. J., & Breijo G. F. (2006). *Técnicas de histología vegetal* (Vol. 16). Jardín Botánico de Valencia.

Megías, M., Molist, P., & A. Pombal, M. (2020). *Tejidos vegetales vasculares* (Departamento de Biología Funcional y Ciencias de la Salud., Ed.; Vol. 5). Facultad de Biología. Universidad de Vigo. https://mmegias.webs.uvigo.es/descargas/v-conduccion.pdf

Rodríguez, R. I. S., & Romero R. S. (2007). *Arquitectura foliar de diez especies de encino (Quercus, Fagaceae) de México*. Acta Botánica Mexicana. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-71512007000400002&script=sci_abstract&tlng=es

Sandoval, D., Tellez, J., Rivera, G., Moreno, S., & Moreno, F. (2017). Técnica de diafanización para describir el desarrollo embrionario del sistema óseo. Revisión de la literatura. *Universitas Médica*, *57*(4), 488–501. https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.UMED57-4.TDDD

Tejero, D. J. D., Aguilar R. S., Terrazas, T., & Pacheco, L. (2010). Arquitectura y anatomía foliar del complejo *Polypodium plesiosorum* sensu Moran (Polypodiaceae). *Revista de Biología Tropical*, *58*(3), 955–976. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442010000300012&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Valencia, A. S. (2014). *Introducción a las embriofitas*. Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial UNAM. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=1wqnDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA6&dq=introduccion+a+las+embriofitas&ots=XF6ei5dbwq&sig=orn7dMRnVWRAE_odCu2DYc92nQM#v=onepage&q=introduccion%20a%20las%20embriofitas&f=false

Tropicos.org. Missouri Botanical Garden. 18 May 2025 <https://tropicos.org>

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE UN BOSQUE EN UNA REGIÓN DEL SUROESTE DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF A FOREST IN A SOUTHWESTERN REGION OF THE STATE OF DURANGO, MEXICO

Díaz-Vásquez; M. A.; P.A. Domínguez-Calleros, N. Domínguez-Amaya, H.M. Loera-Gallegos, J.A. Soto-Cervantes

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE UN BOSQUE EN UNA REGIÓN DEL SUROESTE DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF A FOREST IN A SOUTHWESTERN REGION OF THE STATE OF DURANGO, MÉXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 91-105 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.6

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Núm. 60: 91-105 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Análisis de la estructura de un bosque en una región del suroeste del estado de Durango, México

Analysis of the structure of a forest in a southwestern region of the state of Durango, México

Díaz-Vásquez; M. A.;
P.A. Domínguez-Calleros,
N. Domínguez-Amaya,
H.M. Loera-Gallegos
y J.A. Soto-Cervantes

ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE UN BOSQUE EN UNA REGIÓN DEL SUROESTE DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

ANALYSIS OF THE STRUCTURE OF A FOREST IN A SOUTHWESTERN REGION OF THE STATE OF DURANGO, MÉXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 91-105. Julio 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.60.6

Manuel Antonio Díaz-Vásquez
Pedro Antonio Domínguez-Calleros / pedroantonio.domínguez@ujed.mx
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del estado de Durango, Durango, México

Norberto Domínguez-Amaya
Silviculture and Forest Ecology of the Temperate Zones
University of Goettingen Germany

Héctor Manuel Loera-Gallegos
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del estado de Durango, Durango, México

Jesús Alejandro Soto-Cervantes
Tecnologico nacional de México, Instituto Tecnológico de El Salto
Durango México

RESUMEN: La conservación de la estructura de los bosques permite el cumplimiento de las funciones ecológicas y de producción, según sea el caso. En este sentido, se deben realizar evaluaciones periódicas con el propósito de conocer la respuesta de los bosques a perturbaciones naturales y/o antropogénicas. En el presente trabajo se calcularon los índices de Margalef, índice de Shannon, índice de diferenciación diamétrica, índice de diferenciación de altura e índice de dominancia referentes a la diversidad vegetal en un bosque localizado en la Sierra Madre Occidental en el suroeste del estado de Durango. El estudio se realizó con datos de dos inventarios registrados en 14 parcelas permanentes de investigación. En general, los valores de los índices calculados permanecen estables o son mayores en el segundo inventario; los bajos valores de importancia ecológica estimados indican que se trata de un bosque de pocas especies, sin embargo, se recomienda conservar la estructura del bosque promoviendo la permanencia de las especies de importancia ecológica en beneficio del eventual aprovechamiento de las especies comerciales.
Palabras clave: Estructura del bosque, indicadores ecológicos, bosques mixtos.

ABSTRACT: Conserving forest structure is essential for maintaining ecological and production functions. Periodic evaluations are necessary to understand the response of forests to natural and anthropogenic disturbances. In this study, we calculated the Margalef index, Shannon index, diameter differentiation index, height differentiation index, and dominance index for a forest in the Sierra Madre Occidental, located in the southwestern part of Durango. Data were obtained from two inventories conducted in 14 permanent research plots. Overall, the values of the calculated indices remained stable or increased in the second inventory. The low values of ecological importance indicate that the forest has few species. Nevertheless, it is recommended to conserve the forest structure by promoting the permanence of ecologically important species, as this will support the eventual use of commercial species.
Key words: Forest structure, ecological indicators, mixed forests.

Núm. 60: 91-105 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existen investigaciones recientes útiles para la mejorar el monitoreo de ecosistemas forestales (González, 2018). Sus principales propósitos son incidir en la planeación para optimizar a los ecosistemas en sus capacidades (Suárez *et al*., 2022) y a la vez dar cumplimiento a la legislación correspondiente (SEMARNAT, 2018), así como generar información científica de vanguardia para fortalecer proyectos intercontinentales (Aguirre-Calderón, 2015). En México se han emprendido diversos esfuerzos con apoyo del gobierno (Corral-Rivas *et al.,* 2013) aunque las limitaciones en recursos han incidido en su seguimiento (Sosa-Rodríguez, 2015). El monitoreo es necesario para conocer los cambios que suceden en los componentes bióticos y abióticos del bosque como respuesta a las operaciones de manejo forestal, esto es posible a través de indicadores. Cuando no se cuenta con un sistema de monitoreo, se pierde la oportunidad de realizar posibles modificaciones al programa de manejo en curso, tampoco es posible demostrar y estar conscientes del nivel de impacto de las prácticas de manejo y realizar revisiones periódicas al programa de manejo (Solís Moreno *et al.,* 2006).
Los indicadores a seleccionar dependen de los niveles y escalas del análisis del ecosistema a monitorear, y de la definición misma del desarrollo sostenible (Corral-Rivas *et al.*, 2013; Díaz Vásquez *et al.,* 2018). En este sentido es importante contar con sitios de monitoreo permanente que ofrezcan la posibilidad de censar y remedir en varias ocasiones la masa forestal (Condit *et al*., 2014). Gracias a esto es posible prevenir los procesos de deforestación, degradación de suelos y de biodiversidad; obteniendo, además, beneficios económicos que mejoren los niveles de vida de los pobladores de las comunidades forestales (Mongabay, 2020).

Dado el limitado conocimiento sobre las especies indicadoras y su estructura, Lindenmayer *et al.* (2000), proponen cuatro estrategias para incrementar la conservación de la biodiversidad de los bosques, las cuales intentan proveer información reciente a los encargados del manejo forestal y mejorar la efectividad de las actuales estrategias de manejo: (1) establecer áreas de prioridad para la biodiversidad; (2) dentro de bosques productivos, aplicar indicadores basados en estructura incluyendo la complejidad, la conectividad y la heterogeneidad; (3) dispersar el riesgo en bosques de producción maderera, utilizando estrategias múltiples de conservación; y (4) adoptar una estrategia de manejo para probar la validez de los índices de diversidad biológica basados en la estructura, al tratar a las prácticas de manejo como experimentos.

Para entender el funcionamiento de los ecosistemas es importante la caracterización estructural, lo cual puede aportar elementos de decisión para contribuir al manejo adecuado de los bosques (Aguirre *et al*., 2003; (Castellanos-Bolaños *et al*., 2008). Existen algunos de los trabajos que relacionan la complejidad estructural y la diversidad arbórea, con la productividad de los ecosistemas forestales templados, estos se basan en índices estructurales y variables dasométricas (Aguirre *et al*., 2003). En México se han realizado diversos estudios sobre la diversidad de especies arbóreas en clima templado (Návar-Cháidez & González-Elizondo, 2009; Leyva–López *et al*., 2010; Díaz Vásquez *et al*., 2018). Uno de los indicadores más utilizados para evaluar la diversidad de especies, es el Índice de Shannon (1948), el cual aumenta con el número de especies y toma mayores valores cuando las proporciones de las distintas especies son similares. Otro indicador es el de Margalef, el cual evalúa la riqueza de especies y se basa en el número de especies presentes y el número total de individuos.

El ejido “El Brillante” Municipio de Pueblo Nuevo, Durango es uno de los más prósperos y representativos del suroeste del Estado de Durango, donde la actividad de mayor importancia es la maderable en sus distintas etapas de aprovechamiento y transformación forestal (Figueroa-González *et al*., 2013). Destaca también por la diversidad de especies vegetales correspondiente a bosque de coníferas, mezclado algunas veces con latifoliadas, las cuales son de gran importancia económica y ecológica, principalmente las del género *Pinus y Quercus,* dada su gran abundancia y su buena calidad de madera a (Cruz–Cobos *et al*., 2008; Pompa-García *et al*., 2013; Díaz-Vásquez *et al*., 2018). Tradicionalmente el aprovechamiento forestal se ha realizado mediante la aplicación de tratamientos silvícolas bajo un plan de manejo derivado de los

métodos de desarrollo silvícola (MDS) y de ordenación de bosques irregulares (MOBI). La presente investigación tiene como principal objetivo describir la estructura del bosque en función de indicadores estructurales para los ecosistemas forestales del ejido. Partiendo de la hipótesis que los bosques intervenidos a través del tiempo tienen efectos positivos en cuanto a sus componentes estructurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en los ecosistemas forestales del ejido el Brillante, el cual se ubica en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, en la Sierra Madre Occidental (Figura 1), entre las coordenadas 23° 40' 04" y 23° 47' 54" de latitud norte y 105° 21' 31" y 105° 29' 52" de longitud Oeste (Figueroa-González *et al*., 2013). La altitud oscila entre 2,200 y 2,800 msnm.

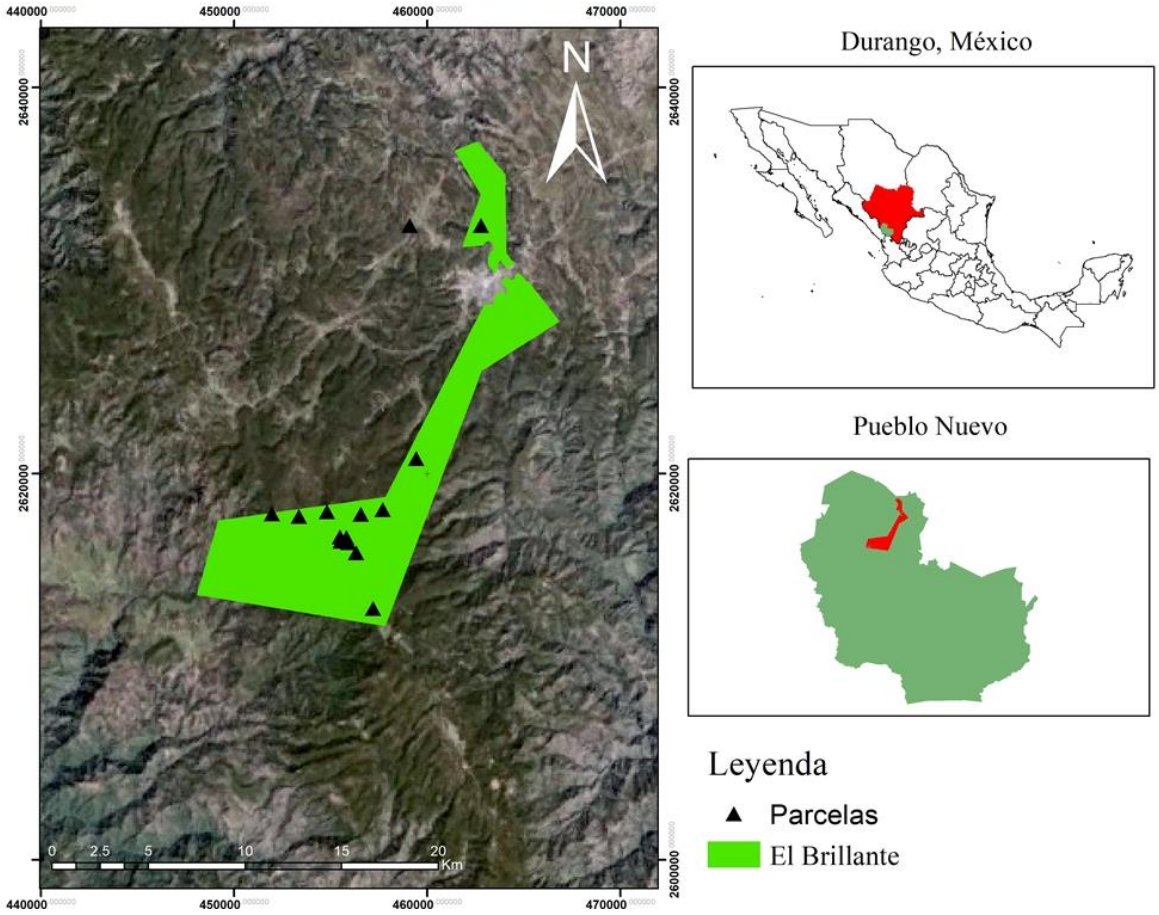


Figura 1. Ubicación de las parcelas de muestreo permanente en el ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango.
Figure 1. Location of the permanent research plots in the Ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango.

En el área se reconocen 2 tipos de clima, el primero es C (E)(m); correspondiendo a semifrío húmedo con lluvias en verano y es C (w), lo que significa templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI, 2015). Las temperaturas oscilan entre 10 y 18°C; la precipitación registrada promedio entre 700 y 1300 mm (Figueroa-González *et al*., 2013). El ejido abarca una superficie

total de 9,516 ha, donde predominan los suelos de tipos Luvisol y Regosol (INEGI, 2015). La vegetación la componen bosques mezclados, cuyas especies predominantes son: *Pinus cooperi* C. E. Blanco, *Quercus sideroxyla* Humb. & Bonpl y *Pinus durangensis* Martínez. En menor escala, en sitios más húmedos se encuentran individuos aislados del género *Cupresus* (Díaz-Vásquez *et al*., 2018).

Obtención de datos

Se utilizó información proveniente de 14 parcelas permanentes de investigación silvícola, instaladas estratégicamente en el año 2007 dentro de la superficie forestal del ejido, bajo un muestreo dirigido. Cabe mencionar que en todas las parcelas se han aplicado tratamientos silvícolas bajo el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MOBI), además previamente se han realizado trabajos de investigación similares al que aquí se presenta. En este caso se pretende realizar un estudio complementario que proporcione más información sobre la estructura de los ecosistemas forestales. Se tomaron datos de dos inventarios, el primero en 2009 y el segundo durante el año 2014. Las parcelas se establecieron siguiendo el procedimiento propuesto por Corral-Rivas *et al*. (2013). Cada parcela consta de una superficie de 2,500 m^2 (50x50 m) divididas en cuatro cuadrantes numerados en el orden del sentido de las manecillas del reloj. Una vez definidos los cuadrantes, se obtuvieron para todos los árboles con un diámetro normal ≥ a 7.5 cm (árboles inventariables) las siguientes variables: especie, diámetro normal (cm), altura total (m), su clase social Según (Kraft, 1984) referente a la dominancia en función de la altura de un árbol con respecto a los árboles vecinos, la ubicación espacial mediante el uso de coordenadas geográfica (X, Y) y distancia desde el centro de la parcela. A partir de los datos anteriores se obtuvo para cada parcela los siguientes datos: número de árboles ha^{-1}, altura, diámetro medio (cm), y área basal (m^2), requeridos para calcular los indicadores estructurales (Assmann, 2013).

Obtención de los indicadores estructurales

Gran parte de este trabajo se basa en la metodología utilizada por (Corral-Rivas *et al*., 2005) para evaluar la diversidad estructural de una masa forestal; algunos de los componentes considerados, se describen a través de índices utilizados para la caracterización de la estructura de un rodal o unidad de manejo, y se estiman tomando en cuenta la información del total de árboles, mientras que otros se obtienen mediante un método de muestreo conocido como grupo estructural de los cinco árboles (Gadow *et al*., 2007; Corral-Rivas *et al*., 2013). La metodología de cálculo se describe a continuación.

1. Número de árboles por parcela

Se tomaron en cuenta el número de árboles existentes en cada parcela y se relacionó con los tratamientos silvícolas aplicados en cada una.

2. Diversidad de especies

a) Número de especies por parcela. Se determinaron todas las especies arbóreas existentes y se clasificaron en función de cada parcela.

b) Índice de Margalef. Utilizado para determinar la riqueza de especies (Ecuación 4) en cada parcela de investigación.

$$D_{Mg} = \frac{(S-1)}{ln(N)} * 100 \quad (1)$$

Donde: S es el número de especies presentes, N es el número total de individuos y ln es el logaritmo natural.

c) Índice de Shannon. Usado para definir la diversidad de especies, se estimó a partir de la siguiente expresión:

$$H_i' = -\sum p_i \, ln \, p_i \quad (2)$$

Donde: p_i es la abundancia proporcional de la i-ésima especie y ln es el logaritmo natural.

3. Diferenciación dimensional. Otra de las principales características que definen la estructura arbórea de un ecosistema forestal, es la variación existente entre los tamaños de los árboles que lo constituyen. Para evaluar este componente estructural se estimaron los siguientes parámetros:

a) Índices de diferenciación diamétrica (*TDi*) y de altura (*THi*) de acuerdo con Corral-Rivas *et al*. (20013), con los cuales se obtienen índices de relaciones de vecindad entre los árboles de las parcelas (Ecuaciones 3 y 4).

b)

$$TD_i = \frac{desviación\ estándar\ del\ diámetro}{diámetro\ medio} \quad (3)$$

$$TH_i = \frac{desviación\ estándar\ de\ la\ altura}{altura\ media} \quad (4)$$

Para hacer compatibles estas variables con el resto de los índices estructurales, en este trabajo se definieron cinco grupos de diferenciación dimensional de acuerdo al trabajo de (Hui & Gadow, 2002), a partir del cual la diferenciación puede ser: i) Escasa $Ti = 0.00$: $CV = 0.05$; ii) Moderada $Ti = 0.25$: $0.05 < CV < 0.15$; iii) Media $Ti = 0.50$: $0.15 \leq CV < 0.30$; iv) Alta $Ti = 0.75$: $0.30 \leq CV < 0.60$; o v) Muy alta $Ti=1$: $CV \geq 0.60$.

c) Índice de dominancia. La dominancia de un árbol de referencia *i* (*Ui*) se define como la proporción de los cuatro vecinos que son más grandes que dicho árbol (Hui & Gadow, 2002) y se estiman mediante un método de muestreo conocido como grupo estructural de los cinco árboles (Gadow *et al*., 2007; Corral-Rivas *et al*., 2013).

$$U_i = \frac{1}{4}\sum_{j=1}^{4} v_j \quad (5)$$

Al igual que en la mayoría de los índices, los de Ui van de 0 a 1, y se definen de la siguiente manera: $Ui = 0.00$ si los cuatro vecinos son más grandes que el árbol de referencia i (suprimido); $Ui = 0.25$ si tres de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia i (intermedio); $Ui = 0.50$ si dos de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia *i* (codominante); $Ui = 0.75$ si uno de los cuatro vecinos es más grande que el árbol de referencia *i* (dominante) y $Ui = 1$ si ninguno de los cuatro vecinos es más grande que el árbol de referencia *i* (muy dominante).

Comparación de los resultados de las dos mediciones

Una vez obtenidos los valores de los indicadores para las dos mediciones, se realizó una comparación de los mismos para detectar los cambios ocurridos durante el periodo transcurrido entre las remediciones; para lo cual se calcularon los valores máximos, mínimos, promedios y desviaciones estándar utilizando el paquete de Microsoft Excel ® para su procesamiento y análisis. El análisis comparativo se realizó en función de los resultados obtenidos en las 14 parcelas de investigación, esto se logró a través de una prueba de F con un nivel de significancia (α=0.05).

RESULTADOS

En la tabla 1 se muestran los tratamientos que fueron aplicados y el número de árboles observados en las parcelas en los dos inventarios realizados. Respecto al número de árboles registrados en el segundo inventario, se destacan las parcelas 9 y 10, las cuales mostraron los mayores valores a pesar que la intervención silvícola fue diferente MOBI y MDS, respectivamente. En las parcelas donde no se aplicó ninguna intervención, el número de árboles permaneció prácticamente estable, excepto en la parcela 13 donde se registró un leve incremento. El número de árboles entre los dos inventarios y las condiciones ecológicas de las parcelas fueron quizá la base que se tomó en cuenta para la utilización del MOBI en todas las parcelas a partir del segundo inventario.

Tabla 1. Tratamientos silvícolas aplicados y número de árboles por parcela, estimados el ejido el Brillante.
Table 1. Silvicultural treatments applied and number of trees per plot estimated in the Ejido El Brillante.

	Tratamiento aplicado		Número de árboles		
Parcela	2009	2014	2009	2014	Diferencia
1	A	A	91	101	10
2	A	A	159	169	10
3	B	A	174	179	5
4	A	A	197	205	8
5	B	A	107	117	10
6	A	A	188	214	26
7	B	A	245	269	24
8	C	A	184	190	6
9	A	A	84	157	73
10	B	A	149	218	69
11	C	A	139	139	0
12	C	A	174	187	13
13	C	A	165	168	3
14	B	A	249	294	45
Total			**2305**	**2607**	**302**

A=Método de ordenación de bosques irregulares; B=Método de Desarrollo Silvícola; C= sin tratamiento

En la tabla 2 se muestran las especies registradas en las parcelas en los dos inventarios. En total se observaron 25 especies de árboles pertenecientes a 10 géneros. Las especies más abundantes fueron *Quercus sideroxyla., Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana,* ya que se registraron en 12 parcelas, sobresaliendo la 2, 1 y 11 con el mayor número de especies, mientras que las parcelas 7, 10 y 14 registraron el menor número de especies. La inclusión de especies en las parcelas, obedece quizá a que los árboles alcanzaron mayores dimensiones que permitieron ser tomados en cuenta en el segundo inventario.

Tabla 2. Especies presentes en cada parcela en el ejido el Brillante, P.N., Durango.
Table 2. Presence of species in each plot in the Ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango.

Especies	**Parcelas**														**2009**	**2014**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**		
Abies durangensis Martínez		=						=			=	=	=		5	5
Alnus jorullensis Kunth		=	=						+						2	**3**
Arbutus arizonica A.Gray	=														1	1
Arbutus bicolor S. González		=	=	=	=	+			=						5	**6**
Arbutus madrensis S. González					=										1	1
Arbutus tessellata Sorensen	=														1	1
Arbutus xalapensis Kunth		=	=												2	2
Cupressus lusitánica Mill								=			=	=	=		4	4
Juniperus deppeana Steud	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			=	=	12	12
Picea chihuahuana Martínez								=			=	=	=		4	4

Pinus cooperi C.E. Blanco	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=			=	=	12	12
Pinus durangensis Martínez		=	=	=	=	=		=	=	=			=		9	9
Pinus engelmannii Carr	=														1	1
Pinus leiophylla Schiede ex Schltdl. & Cham	=														1	1
Pinus strobiformis Engelmann		=	=	=	=	=	=		=	=	=	=	=		11	11
Pinus teocote Schiede ex Schltdl. & Cham	=	=	=	=	=			=					=	=	7	7
Prunus serótina Bark											=	=			3	3
Pseudotsuga menziesii Mirb. Franco		+						=			=	=	=	=	5	**6**
Quercus candicans Née											=	=			1	1
Quercus crassifolia Bonpl.												=			1	1
Quercus eduardii Trelease	=														1	1
Quercus laeta Liemb	=														1	1
Quercus obtusata Bonp		=													1	1
Quercus rugosa Née				=					+			=			2	**3**
Quercus sideroxyla Bonp	=	=	=	=	=	=	=	=	=		=	=	=		12	12
Número de especies 2009	**10**	**11**	**9**	**8**	**8**	**5**	**4**	**9**	**6**	**4**	**8**	**10**	**9**	**4**	**25**	**25**
Número de especies 20014	**10**	**12**	**9**	**8**	**8**	**6**	**4**	**9**	**8**	**4**	**8**	**10**	**9**	**4**	**25**	**25**

(=) permanece sin cambio; (+) especie agregada

A simple vista se puede observar que los valores del índice de Margalef en las parcelas 2 y 9 mostraron un incremento de un inventario a otro (Figura 2). Sin embargo, los valores obtenidos con la prueba de F indican que estadísticamente estos cambios no son diferentes. Como puede observarse en esta figura, las parcelas con los valores más altos para este índice (*Mg*) fueron la 2, 1 y 12, lo cual indica una mayor riqueza de especies. Mientras que los valores más bajos corresponden a las parcelas 7, 14 y 10. El resto de las parcelas son consideradas con una diversidad y una riqueza intermedia de especies.

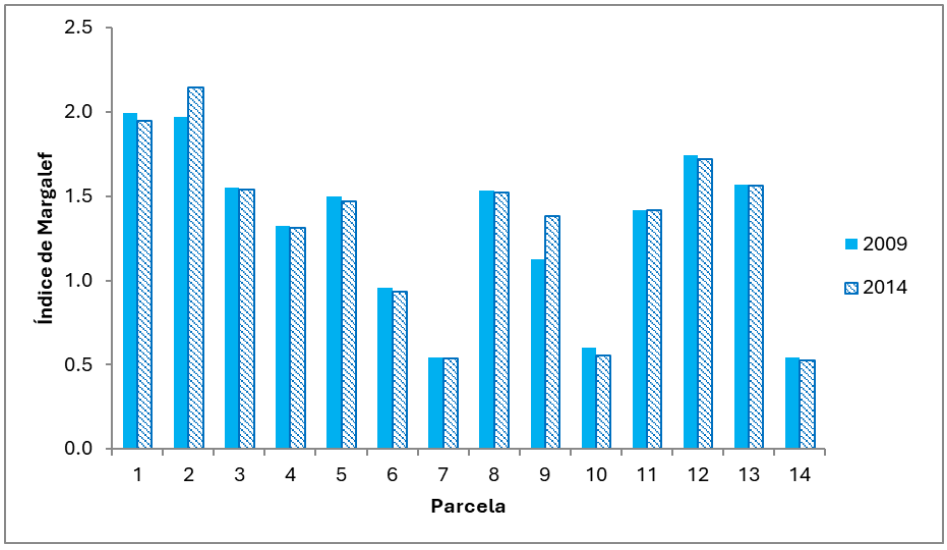


Figura 2. Índice de Margalef, estimado en el ejido el Brillante, registrado en dos inventarios (2009 y 2014).
Figure 2. Margalef index estimated in the Ejido El Brillante, recorded in two inventories (2009 and 2014).

Los resultados del índice de Shannon (Figura 3) indican que las parcelas con mayor diversidad de especies son la 13, 1 y 2, y las de menor diversidad la 7, 14 y 10. En las parcelas 2, 3, 5, 6 y 7 se registró un incremento en el valor de este índice, en el resto de las parcelas se observa que el índice de Shannon se mantuvo estable o presentó una ligera disminución durante el periodo evaluado. siendo esta disminución, no significativa estadísticamente.

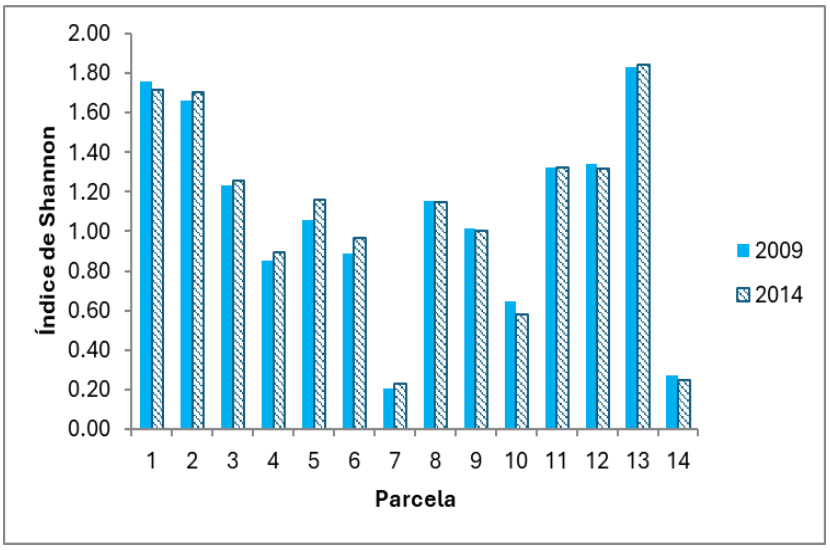


Figura 3. Índice de Shannon, estimado en el bosque del ejido el Brillante, registrado en dos inventarios (2009 y 2014).
Figure 3. Shannon index estimated in the Ejido El Brillante, recorded in two inventories (2009 and 2014).

Los parámetros (TD, TH y Ui) de la tabla 3 corresponden a los cambios en la diferenciación dimensional vertical y horizontal de las parcelas. Como puede notarse los promedios del diámetro y altura es el mismo. Sin embargo, estos valores al ser analizados a través de una prueba de F con un nivel de significancia (α=0.05), mostraron no ser diferentes estadísticamente. Lo anterior indica que la intervención silvícola no afecto las dimensiones de los árboles de un inventario a otro. Por otra parte, de acuerdo con los valores obtenidos para la dominancia (*Ui*) existe poca variación entre las parcelas. Lo que indica que, por lo general, dos de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia *i* y en este caso los árboles "codominantes" son los que más abundan en el bosque del ejido el Brillante. Al analizar los cambios de *Ui* en los dos inventarios, según los valores de F los valores no son significativos.

Tabla 3. Índices de diferenciación diamétrica, de altura, e índice de dominancia en el ejido el Brillante.
Table 3. Indices of diametric differentiation, height differentiation, and dominance in the Ejido El Brillante

Parcela	TDi (2009)	TDi (2014)	THi (2009)	THi (2014)	Ui1 (2009)	Ui2(2014)
1	0.62	0.65	0.56	0.54	0.53	0.54
2	0.71	0.71	0.64	0.66	0.50	0.51
3	0.69	0.69	0.54	0.60	0.51	0.54
4	0.67	0.66	0.62	0.61	0.52	0.51
5	0.79	0.78	0.76	0.76	0.45	0.53
6	0.68	0.70	0.62	0.61	0.54	0.53
7	0.55	0.57	0.48	0.45	0.51	0.52
8	0.83	0.82	0.75	0.72	0.50	0.51
9	0.78	0.68	0.71	0.67	0.51	0.50

10	0.54	0.55	0.39	0.39	0.49	0.50
11	0.85	0.84	0.69	0.74	0.51	0.51
12	0.90	0.89	0.78	0.76	0.51	0.53
13	0.80	0.80	0.77	0.79	0.51	0.53
14	0.49	0.52	0.34	0.33	0.48	0.51
Promedio	**0.71**	**0.71**	**0.62**	**0.62**	**0.50**	**0.52**
F		**0.69433106**		**0.94401274**		**0.11605916**

TDi=Índice de diferenciación diamétrica, *THi*=Índice de diferenciación de altura, *Ui*=Índice de dominancia.

Comparación de los resultados de las dos remediciones

Los indicadores estructurales que se encuentran en la tabla 4 mostraron, en términos generales, ligeros cambios en sus promedios. La dominancia (*Ui*) calculada para los dos inventarios reflejó el mayor valor. Los otros indicadores tuvieron cambios ligeros, algunos de ellos con valores positivos (incremento) y otros negativos (caída).

Al hacer la comparación mediante una prueba de F con un nivel de significancia (α=0.05) y tomando en cuenta los valores promedio de cada indicador, se concluye que los cambios ocurridos no son estadísticamente significativos. Lo que indica que los tratamientos silvícolas aplicados no tuvieron mucha influencia en la composición y estructura del bosque.

Tabla 4. Tasa de cambio de los indicadores ecológicos en el ejido el Brillante.
Table 4. Ecological indicators for inventory 1 and 2 (2009 and 2014 respectively).

Año	Parámetro	Dmg	Hi	TDi	THi	Ui
2009	Máximo	1.995	1.834	0.903	0.78	0.537
	Mínimo	0.544	0.202	0.488	0.34	0.453
	Media	1.313	1.088	0.707	0.62	0.504
	STD	0.493	0.499	0.126	0.14	0.021
2014	Máximo	2.144	1.843	0.888	0.789	0.544
	Mínimo	0.528	0.230	0.524	0.330	0.502
	Media	1.327	1.099	0.705	0.615	0.520
	STD	0.511	0.500	0.112	0.145	0.013
Tasa de cambio (%)		**1.12**	**1.02**	**-0.23**	**-0.46**	**3.13**
	F	0.88970631	0.9921273	0.99586297	0.99066367	0.92776529

Dmg=Índice de Margalef, Hi= Índice de Shannon, TDi=Índice de diferenciación diamétrica, THi=Índice de diferenciación de altura, Ui=Índice de dominancia.

DISCUSIÓN

Uno de los cambios más significativos al analizar los datos de los dos inventarios, se tuvo con respecto a las especies, los cuales muestran un ligero incremento en la diversidad, resultados que son semejantes a lo observado por Solís-Moreno *et al.,* (2006) quienes reportan un cambio favorable en este aspecto para bosques de pino-encino en la Sierra de la Candela, Tepehuanes, Durango. Por otra parte, resulta opuesto a lo que observaron Corral-Rivas *et al*. (2005) en un estudio realizado en un bosque mesófilo de montaña en Tamaulipas, donde indican que los aprovechamientos disminuyeron la diversidad de especies y esto se puede atribuir al aprovechamiento forestal tal como lo señalan (Návar-Cháidez & González-Elizondo, 2009;

(Hernández-Salas *et al*., 2013), quienes también argumentan que el aprovechamiento forestal modifica la diversidad y composición del estrato arbóreo.

Los resultados muestran que las especies con más presencia en las 14 parcelas fueron *P. durangensis, P. strobiformis, P. cooperi, Juniperus deppeana y Quercus sideroxyla;* de estas especies, solo *P.s durangensis* coincide con lo reportado por Silva *et al*. (2021), quienes encontraron que las especies dominantes en una comunidad vegetal de un bosque templado del estado de Durango fueron *P. durangensis, P. douglasiana, P. oocarpa, P. herrerae y Q. crassifolia*. Los resultados de este estudio son consistentes con los reportados por otros autores, quienes han señalado que *P. cooperi* es la más abundante en la mayoría de los bosques templados de coníferas del estado de Durango (Valenzuela-Nuñez & Granados-Sánchez, 2009; (Domínguez-Calleros *et al*., 2014; (Graciano-Ávila *et al*., 2017b; Díaz-Vásquez *et al*., 2018). Así mismo, López-Serrano *et al*. (2022), señalan que el género *Pinus* presenta la mayor riqueza de especies y una de ellas es *P. cooperi* que presentó los valores más altos de densidad (32.15%) y dominancia (37.77%), en la vegetación arbórea en el Parque El Tecuán, Durango, México.

Referente al índice de Margalef que se obtuvo un valor (Dmg=1.32), este valor es inferior al registrado por Graciano-Ávila *et al*. (2017a), quienes registraron un valor de (Dmg=1.53); sin embargo, es superior al reportado por Hernández-Salas *et al*. (2013), (Dmg=1.04) lo que indica que el área de estudio presenta una diversidad de especies promedio, si se compara con áreas de la misma región, pero resulta bajo si se compara con otros ecosistemas (Juárez-Agis *et al*., 2016; Alanís-Rodríguez *et al*., 2020; Canizales-Velázquez *et al*., 2021). Silva *et al*. (2021) reportan un índice de Margalef de 3.78 en un bosque templado del municipio de Pueblo Nuevo, Durango, así mismo estos autores reportan una riqueza específica de 29 especies y señalan que la mayor dominancia se observa entre las familias *Pinaceae* y *Fagaceae* y definen el área como de alta diversidad arbórea.

Respecto al índice de Shannon el valor obtenido fue de 1.09, lo que representa una diversidad baja según la clasificación que presenta Margalef (1972), quien especifica que los valores menores de 2 corresponden a una diversidad baja, de 2 a 3.5 diversidad media, y mayores de 3.5 a 5 como diversidad alta. Sin embargo, el valor resultante en este estudio se considera dentro de los valores promedio de la región, ya que es similar al registrado por Graciano-Ávila *et al*. (2017a) con un valor de 1.74 en los bosques templados del estado de Durango. Así mismo es similar al reportado por López-Serrano *et al*. (2022), con un valor de 1.89 en la vegetación arbórea del Parque El Tecuán, Durango, México.

Méndez Osorio *et al*. (2018), presentan un valor con un índice de 0.78 para un bosque del mismo tipo en la Sierra Madre del Sur, así mismo, Morales-Nieto *et al*. (2022), presenta aún un valor de índice Shannon = 0.37 en poblaciones de *P. arizonica* y *P. durangensis* de la sierra de Chihuahua. Otro caso diferente con diversidad media lo muestra García-García *et al.* (2019), con un valor de 2.77 para un bosque de pino-encino de Guadalupe y Calvo Chihuahua.

Rubio-Camacho *et al*. (2017), en una investigación realizada al sureste del municipio de Iturbide, Nuevo León, reportan un índice de diferenciación diamétrica (TDi) que va de moderada a clara, similar a la obtenida en este trabajo reportada como media a alta, con valores que van de 0.49 a 0.90. Respecto al índice de diferenciación en altura (THi) presentan resultados similares a lo encontrado en la diferenciación diamétrica, con una fuerte inclinación por la categoría moderada, distinto a lo que se tiene en el presente estudio con valores que fluctúan entre 0.33 y 0.79, lo cual representa una variación en altura entre moderada, media y alta.

En relación al índice de dominancia (*Ui*) existe poca variación con valores cercanos a 0.50 lo que muestra en este caso que los árboles “codominantes” son más abundantes en los bosques del ejido El Brillante, lo que resulta muy parecido a lo observado por Gadow *et al.* (2007),

Graciano-Ávila *et al.* (2020) y Silva-González *et al.* (2022), quienes encontraron en un bosque del municipio de Pueblo Nuevo, Durango, valores de índice de dominancia cercanos a 0.5, argumentando que la vegetación es heterogénea y que estos valores son característicos de bosques manejados mediante métodos de selección, así mismo, Solís-Moreno *et al*. (2006), registran valores de índice de dominancia = 0.44 en una parcela intervenida mediante el método de selección.

CONCLUSIONES

La estructura de los rodales puede definirse en función de los indicadores estructurales, cuyos resultados muestran algunos cambios en el periodo evaluado, sin embargo, no son estadísticamente significativos.

Al analizar el número de árboles, es notorio un incremento de un inventario a otro, donde destacan la parcela 9 tratada con el MOBI, la 10 y 14 tratadas con el MDS, lo que pone en evidencia una respuesta positiva a los tratamientos silvícolas aplicados.

Se encontró que las especies de mayor abundancia en el ejido son *Pinus cooperi, Quercus sideroxyla*, *Pinus durangensis, Juniperus deppeana* y *Pinus strobiformis*, y son a las que se les debe dar un manejo forestal más apropiado con fines de aprovechamiento.

Se observó que existen especies como *Quercus obtusata* Humboldt & Bonpland, *Pinus engelmannii* Carr y *Arbutus arizonica* con menor presencia, sin embargo, estas especies son de menor interés desde el punto de vista comercial.

El número de especies permaneció casi invariable durante el tiempo de cinco años que implicó la evaluación en todas las parcelas, excepto en tres de ellas, en las cuales hubo un ligero aumento.

De acuerdo al índice de Shannon, se aprecia que es variable entre parcelas mostrando un rango de diversidad de especies que va de baja a mediana diversidad. Se observa además que este índice presenta ligeros cambios en todas las parcelas estudiadas.

Los indicadores ecológicos propuestos en este trabajo nos dan una idea clara de la diversidad de especies que se encuentran dentro del ejido y determina cuales son las más importantes, y representan una base fundamental para el manejo forestal, tomando en cuenta la protección y conservación de las especies forestales.
Se recomienda conservar la estructura del bosque promoviendo la permanencia de las especies de importancia económica y ecológica en beneficio del eventual aprovechamiento de las especies comerciales.

Puede observarse también que se tienen sitios representativos para la variedad estructural de los bosques del ejido y se espera que la estimación de los indicadores en nuevos inventarios, proporcione más bases científicas para la conservación de la diversidad de especies forestales y un manejo sustentable en los bosques del ejido El Brillante.

LITERATURA CITADA

Aguirre, O., Hui, G., Gadow, K. v., & Jiménez, J. (2003). An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management, 183*(1-3), 137-145. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00102-6

Aguirre-Calderón, O. A. (2015). Manejo Forestal en el Siglo XXI. *Madera y Bosques, 21*, 17-28.

Alanís-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E. A., Canizales-Velázquez, P. A., Mora-Olivo, A., Pequeño-Ledezma, M. Á., & Buendía Rodríguez, E. (2020). Estructura y diversidad de un bosque de galería en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 11*(58), 134-153. https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.591

Assmann, E. (2013). *The principles of forest yield study: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands.* University of Munich: Pergamon Press.

Canizales-Velázquez, P. A., Alanís-Rodríguez, E., García-García, S. A., Holguín-Estrada, V. A., & Collantes-Chávez-Costa, A. (2021). Estructura y diversidad arbórea de un bosque de galería urbano en el río Camachito, Noreste de México. *Polibotánica, 51*, 91-105. https://doi.org/10.18387/polibotanica.51.6

Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M., & López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques, 14*(2), 51-63.

Condit, R., Lao, S., Singh, A., Esufali, S., & Dolins, S. (2014). Data and database standards for permanent forest plots in a global network. *Forest Ecology and Management, 316*, 21-31. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.011

Corral-Rivas, J. J., Aguirre Calderón, O. A., Jiménez Pérez, J., & Corral Rivas, S. (2005). Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el bosque mesófilo de montaña «El Cielo», Tamaulipas, México. *Investigaciones Agrarias, Sistemas y Recursos Forestales, 14*(2), 217-228.

Corral-Rivas, J. J., Vargas-Larreta, B., Wehenkel, C., Aguirre-Calderón, O. A., & Crecente-Campo, F. (2013). *Guía para el establecimiento, seguimiento y evaluación de sitios permanentes de monitoreo en paisajes productivos forestales.* México: FONDO SECTORIAL PARA LA INVESTIGACIÓN, EL DESARROLLO Y LA INNOVACIÓN TECNOLÓGICA FORESTAL (CONACYT-CONAFOR).

Cruz–Cobos, F., De los Santos–Posadas, H. M., & Valdez–Lazalde, J. R. (2008). Sistema compatible de ahusamiento–volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia, 42*(4), 473-485.

Díaz-Vásquez, M. A., Bretado-Velázquez, J. L., Torres-Herrera, S. I., & Dominguez-Calleros, P. A. (2018). Indicadores Ecológicos en el ejido El Brillante, Pueblo Nuevo Durango. *Foresta Veracruzana, 20*(2), 1-7.

Díaz-Vásquez, M. A., Rodríguez-Ortiz, G., & López, C. L. (2018). Estimación del índice de sitio para *Pinus cooperi* en el ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Agroecosistemas, 5*(1), 34-42.

Domínguez-Calleros, P. A., Chávez-Flores, G. A., Rodríguez-Téllez, E., Corral-Rivas, J. J., Goche Telles, J. R., & Díaz-Vásquez, M. A. (2014). Caracterización silvícola de *Pseudotsuga menziesii* en la reserva de la biosfera" La Michilía". *Madera y Bosques, 20*(2), 23-31.

Figueroa-González, E. G., Arrieta Díaz, D., Moreno Loera, H., González Herrera, M. B., & Monsisvais Bretado, M. G. (2013). La Percepción Del Clima Organizacional En El Personal De Producción De Un Ejido Forestal En México. *Revista Global de Negocios, 1*(2), 81-89. Obtenido de https://ssrn.com/abstract=2327258

Gadow, K. v., Sánchez Orois, S., & Álvarez González, J. G. (2007). *Estructura y Crecimiento del Bosque* (Vol. 12). Göttingen, Alemania: IUFRO World Series.

García-García, S. A., Narváez Flores, R., Olivas García, J. M., & Hernández Salas, J. (2019). Diversidad y estructura vertical del bosque de pino-encino en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 10*(53), 41-63. https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i53.173

González, J. H. (2018). Una lectura de REDD plus a partir de la evolución de sus elementos. *Anuario en Relaciones Internacionales*, 1-17. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/98878/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., & Lujan-Soto, J. E. (2017a). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque

templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 4*(12), 535-542. https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1114

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, Ó. A., González-Tagle, M. A., Treviño Garza, E. J., & Mora-Olivo, A. (2017b). Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México. *Madera y Bosques, 23*(3), 137-146. https://doi.org/10.21829/myb.2017.2331480

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E. A., Valdecantos-Dema, A., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., . . . Mora-Olivo, A. (2020). Composición y estructura espacial de cinco asociaciones de bosques de Pinus durangensis. *Madera y Bosques, 26*(2), 1-20. https://doi.org/10.21829/myb.2020.2621933

Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., . . . Domínguez-Pereda, E. J. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 19*(2), 189-200. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2012.08.052

Hui, G., & Gadow, K. (2002). Das Winkelmass. Herteilung des Optimalen Standarwinkels. *Allgemeine Forst u Jagdzeitung, 10*, 173-177.

INEGI. (01 de Enero de 2015). *Anuario estadístico y geográfico de Durango.* Obtenido de Instituto Nacional de Estadistica y Geografia: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2015/702825076160.pdf

Juárez-Agis, A., Herrera Castro, N. D., Martínez, J. L., & Reyes Umaña, M. (2016). Diversidad y estructura de la selva mediana subperennifolia de Acapulco, Gro., México. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 5*(10), 1-20.

Kraft, G. (1984). *Beiträge zur lehre von den durchforstungen, schlagstellungen und lichtungshieben.* Klindworth.

Leyva–López, C., Velázquez–Martínez, A., & Ángeles–Pérez, G. (2010). Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pinos. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 16*(2), 227-239. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.038

Lindenmayer, D. B., Margules, C. R., & Botkin, D. B. (2000). Indicators of Biodiversity for Ecologically Sustainable Forest Management. *Conservation biology, 14*(4), 941-950. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.98533.x

López-Serrano, P. M., Vega Nieva, D. J., Corral Rivas, J. J., Briseño Reyes, J., & Antúnez, P. (2022). Diversidad e importancia ecológica de la vegetación arbórea en el Parque El Tecuán, Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 13*(74), 34-53. https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1273

Margalef, R. (1972). Homage to Evelyn Hutchinson, or why there is an upper limit to diversity. *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences, 44*, 211-235. http://hdl.handle.net/10261/166281

Méndez-Osorio, C., Mora Donjuán, C. A., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., & Pequeño Ledezma, M. Á. (2018). Fitodiversidad y estructura de un bosque de pino-encino en la Sierra Madre del Sur, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9*(50), 35-53. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.236

Mongabay, L. (2020). *La ruta histórica de la silvicultura comunitaria en México.* México: MONGABAY. Obtenido de https://es.mongabay.com/2020/10/la-ruta-historica-del-manejo-forestal-en-mexico-cuando-empezo/

Morales-Nieto, C. R., Siqueiros-Candia, M., Álvarez-Holguín, A., Gil-Vega, K. d., Corrales-Lerma, R., & Martínez-Salvador, M. (2022). Diversidad, estructura genética e hibridación en poblaciones de Pinus arizonica y P. durangensis. *Madera y Bosques, 24*(2), 1-14. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722170

Návar-Cháidez, J. J., & González-Elizondo, S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica, 27*, 71-87.

Recibido:
16/febrero/2024

Aceptado:
4/junio/2025

Pompa-García, M., Cerano-Paredes, J., & Fulé, P. Z. (2013). Variation in radial growth of *Pinus cooperi* in response to climatic signals across an elevational gradient. *Dendrochronologia, 31*(3), 198-204. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2013.05.003

Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Himmelsbach, W., Ávila-Flores, D. Y., Alanís-Rodríguez, E., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad, 88*(1), 113-121. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.01.015

SEMARNAT. (17 de Abril de 2018). *Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable.* Obtenido de Gobierno de México: https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/ley-de-desarrollo-forestal-sustentable

Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *in The Bell System Technical Journal, 27*(3), 379-423. https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x

Silva, J. E., Aguirre Calderon, O. A., Alanís Rodríguez, E., Jurado Ybarra, E., Jiménez Pérez, J., & Vargas Larreta, B. (2021). Estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Polibotánica, 52*, 89-102. https://doi.org/10.18387/polibotanica.52.7

Silva-González, E., Aguirre Calderón, O. A., Alanís Rodríguez, E., González Tagle, M. A., Treviño Garza, E. J., & Corral Rivas, J. J. (2022). Evaluación del aprovechamiento forestal en la diversidad y estructura de un bosque templado en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 13*(71), 103-132. https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1017

Solís-Moreno, R., Aguirre Calderón, Ó. A., Javier, T. G., Jiménez Pérez, J., Jurado Ybarra, E., & Corral-Rivas, J. (2006). Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México. *Madera y Bosques, 12*(2), 49-64.

Sosa-Rodríguez, F. S. (2015). Política del cambio climático en México: avances, obstáculos y retos. *Revista Internacional de Estadística y Geografía, 6*(2), 4-23.

Suárez, M. N., Alamilla, A. I., Montero, I. M., & Montero, C. M. (2022). Aplicación de algoritmos de optimización espacial para la selección de áreas de conservación de ecosistemas. *Universidad y Sociedad, 14*(2), 180-187.

Valenzuela-Nuñez, L. M., & Granados Sánchez, D. (2009). Caracterización fisonómica y ordenación de la vegetación en el área de influencia de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 15*(1), 29-41.

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE UNA SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA EN EL COMPLEJO ECOTURÍSTICO AGUA SELVA, TABASCO, MÉXICO

TREE STRUCTURE AND DIVERSITY OF A MEDIUM EVERGREEN FOREST IN THE AGUA SELVA ECOTOURISM COMPLEX, TABASCO, MEXICO

García León, J., J.C. Gerónimo Torres, M. de la Cruz, F. Sánchez Gutiérrez, M.A. Magaña Alejandro, A. de la Cruz Pérez

ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE UNA SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA EN EL COMPLEJO ECOTURÍSTICO AGUA SELVA, TABASCO, MÉXICO

TREE STRUCTURE AND DIVERSITY OF A MEDIUM EVERGREEN FOREST IN THE AGUA SELVA ECOTOURISM COMPLEX, TABASCO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 107-122 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.7

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Estructura y diversidad arbórea de una selva mediana perennifolia en el complejo ecoturístico Agua Selva, Tabasco, México

Tree structure and diversity of a medium evergreen forest in the Agua Selva ecotourism complex, Tabasco, Mexico

García León, J.,
J.C. Gerónimo Torres,
M. de la Cruz,
F. Sánchez Gutiérrez,
M.A. Magaña Alejandro,
A. de la Cruz Pérez

ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA DE UNA SELVA MEDIANA PERENNIFOLIA EN EL COMPLEJO ECOTURÍSTICO AGUA SELVA, TABASCO, MÉXICO

TREE STRUCTURE AND DIVERSITY OF A MEDIUM EVERGREEN FOREST IN THE AGUA SELVA ECOTOURISM COMPLEX, TABASCO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 107-122. Julio 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.60.7

Josué García-León https://orcid.org/0009-0000-6714-4146
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
División Académica de Ciencias Biológicas

José del Carmen Gerónimo Torres https://orcid.org/0000-0001-9546-3339
Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Huimanguillo.

Manuel Pérez de la Cruz / manuel.perezc@ujat.mx
https://orcid.org/0000-0002-0886-3025
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
División Académica de Ciencias Biológicas

Facundo Sánchez Gutiérrez https://orcid.org/0000-0001-8992-6376
Universidad Autónoma de Chiapas. Escuela Maya de Estudios Agropecuarios

Miguel Alberto Magaña Alejandro https://orcid.org/0000-0001-5024-1580
Aracely de la Cruz Pérez https://orcid.org/0000-0002-6901-7965
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
División Académica de Ciencias Biológicas

RESUMEN: Las selvas tropicales son ecosistemas que presentan una alta diversidad biológica. En México, estas selvas cubren aproximadamente el 16.3% del territorio nacional, entre las que destacan las selvas medianas en Tabasco por su particularidad en el hábitat y vegetación. En Tabasco se encuentra una selva mediana perennifolia ubicada en el ejido Villa de Guadalupe, Huimanguillo, que, a pesar de su relevancia ecológica, ha sido poco estudiada en cuanto a su estructura y diversidad arbórea. En el sitio se establecieron cinco unidades de muestreo (UM) de 600 m² (20 x 30 m) de manera aleatoria. Cada UM se subdividió en seis subunidades de muestreo (SUM) de 100 m² (10 x 10 m) para facilitar el inventario de las especies arbóreas. En cada UM, se midió el diámetro normal (DN) y la altura total (Ht) de todos los individuos arbóreos con DN ≥ 2.5 cm. Para la diversidad se calcularon los índices de orden 1 (^{1}D) y orden 2 (^{2}D), y se evaluó la equidad con el índice de Pielou (J'). La jerarquización de las especies se realizó mediante el cálculo del Índice de Valor de Importancia (IVI) y el Índice de Valor Forestal (IVF). En este estudio se identificaron 59 especies de árboles en cinco unidades de muestreo, con una notable abundancia de *Astrocaryum mexicanum* y *Brosimum alicastrum*. La diversidad arbórea, medida a través del índice de diversidad verdadera ^{1}D y ^{2}D y la equidad de Pielou (J'), mostraron variaciones entre las unidades, de las cuales la UM 4 fue la más diversa y la UM 5 la que presentó mayor equidad. El estimador Bootstrap indicó una eficiencia de muestreo del 84.51%. Los índices de Valor de Importancia (IVI) y Valor Forestal (IVF) destacaron a *Oecopetalum mexicanum* y *B. alicastrum* como las especies más relevantes en términos de dominancia y cobertura. La riqueza y la abundancia de especies arbóreas en esta selva mediana aún conservada reflejan la complejidad de las interacciones ecológicas y la influencia de factores microambientales, que favorecen a algunas especies como *B. alicastrum* que es conocida por permitir la regeneración del ecosistema y facilitar la coexistencia de la biodiversidad arbórea.

Palabras clave: Riqueza, composición, selva mediana, IVI, IVF.

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

ABSTRACT: Tropical rainforests are ecosystems that exhibit high biological diversity. In Mexico, these forests cover approximately 16.3% of the national territory, with the medium rainforests in Tabasco standing out for their unique habitat and vegetation. In Tabasco there is a medium-sized evergreen forest located in the ejido Villa de Guadalupe, Huimanguillo, which, despite its ecological relevance, has been little studied in terms of its structure and arboreal diversity. At the site, five sampling units (UM) of 600 m^2 (20 x 30 m) were randomly established at the site. Each UM was subdivided into six sampling subunits (SUM) of 100 m^2 (10 x 10 m) to facilitate the inventory of tree species. In each UM, the normal diameter (DN) and total height (Ht) of all tree individuals with DN ≥ 2.5 cm were measured. For diversity, order 1 (^{1}D) and order 2 (^{2}D) indices were calculated, and equity was evaluated with the Pielou index (J'). Species were ranked by calculating the Importance Value Index (IVI) and the Forest Value Index (IVF). In this study, 59 tree species were identified in five sampling units, with a notable abundance of *Astrocaryum mexicanum* and *Brosimum alicastrum*. Tree diversity, measured through the true diversity index ^{1}D and ^{2}D, and Pielou's (J') equity, showed variations among the units, with UM 4 being the most diverse and UM 5 the most equitable. The Bootstrap estimator indicated sample efficiency of 84.51%. The Importance Value Index (IVI) and Forest Value Index (IVF) highlighted *Oecopetalum mexicanum* and *B. alicastrum* as the most relevant species in terms of dominance and cover. The richness and abundance of tree species in this still-conserved medium-sized forest reflect the complexity of ecological interactions and the influence of microenvironmental factors, which favor some species such as *B. alicastrum*, which is known to allow the ecosystem to regenerate and facilitate the coexistence of tree biodiversity.
Key words: Richness, composition, medium rainforest, IVI, IVF.

INTRODUCCIÓN

Las selvas tropicales son formaciones naturales con diferentes tamaños, parches, formas y etapas de regeneración (Leigh, 1999; Hubbell, 2001; Basáñez *et al*., 2008). Estos ecosistemas representan la vegetación más exuberante del planeta, donde a menudo se encuentran cientos de especies de plantas por hectárea (Challenger y Soberón, 2008), compuestas por vegetación densa, enredaderas y epifitas. Esta composición, diversidad y distribución de las especies vegetales está relacionada con factores como las variaciones en los gradientes altitudinales, el relieve, la temperatura y la precipitación (Grubb, 1977; Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2021).

En México, las selvas ocupan alrededor del 16.3 % de la superficie total del territorio, lo que equivale aproximadamente a 22 793 822.2 ha (INEGI, 2021). De éstas, 10 532 938.03 ha están ocupadas por selvas medianas y en Tabasco están reportadas 60 119.33 ha (SNMF, 2020), las cuales se caracterizan por la dominancia de árboles por debajo de los 25 m de altura, donde abundan los líquenes, musgos y helechos (Pennington y Sarukhán, 2005). Estas selvas han sido tradicionalmente una fuente de extracción de materias primas como la madera, leña, plantas y animales necesarios para la subsistencia de las comunidades rurales. Además, en estos ecosistemas se llevan a cabo procesos vitales como el ciclo del agua y los nutrientes, la formación y el mantenimiento del suelo, la regulación del clima, la erosión y la conservación de la biodiversidad (Challenger y Dirzo, 2009). En Tabasco, las selvas se distribuyen en la región sierra de los municipios de Teapa, Tacotalpa, Macuspana, Tenosique y Huimanguillo, (Maldonado-Sánchez y Maldonado-Mares, 2010; Vázquez-Negrín *et al.*, 2011). En este último podemos encontrar algunos relictos de selvas mejor conservados de Tabasco (Moguel-Ordóñez *et al.*, 2022), donde se desarrollan diferentes actividades ecoturísticas.

Este entorno natural y conservado propició el establecimiento del complejo ecoturístico "Agua Selva", el cual está conformado por ocho comunidades rurales, entre ellas se localiza el Ejido Villa de Guadalupe, en el municipio de Huimanguillo (Rodríguez Ocaña y Banda Izeta, 2016). En los últimos años en la selva cercana a esta localidad se han reportado ocho nuevos registros de herpetofauna para el estado de Tabasco, entre los cuales se encuentra a *Quilticohyla zoque*, una especie endémica de México que está asociada a sitios conservados (Canseco-Márquez *et al.*, 2017; Ríos-Rodas *et al.*, 2020). En cuanto a la riqueza florística de este sitio, se han reportado 28 especies de helechos con amplia distribución en el país, pero que no habían sido mencionadas

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

para el estado (Carvajal-Hernández *et al.*, 2018), así como la descripción de una nueva especie de la familia Lentibulariaceae, *Pinguicula olmeca* (Burelo-Ramos *et al.*, 2018).
La selva mediana perennifolia que alberga esta localidad representa un ecosistema con una alta riqueza biológica, a pesar de la relevancia ecológica del sitio, han sido pocos los estudios de investigación sobre su vegetación realizados hasta el momento. Por lo cual el objetivo de esta investigación fue determinar la estructura y diversidad arbórea de la selva mediana perennifolia en el complejo ecoturístico Agua Selva, Tabasco, México.

MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en un área de selva mediana perennifolia que se localiza en el ejido Villa de Guadalupe (17°21’38.23’’ N y 93°36’30.97’’ O), dentro del Complejo Ecoturístico “Agua Selva” en el municipio de Huimanguillo, Tabasco, México. El sitio se encuentra en la región fisiográfica conocida como Sierra Norte de Chiapas, con elevaciones que van desde los 200 a 1000 msnm (Ríos-Rodas et al., 2020). El clima predominante es de tipo cálido húmedo con lluvias todo el año (Af), con precipitación media anual de 3 638 mm y temperatura media anual de 20.6 °C (Carvajal-Hernández *et al.*, 2018; Ríos-Rodas *et al.*, 2020).

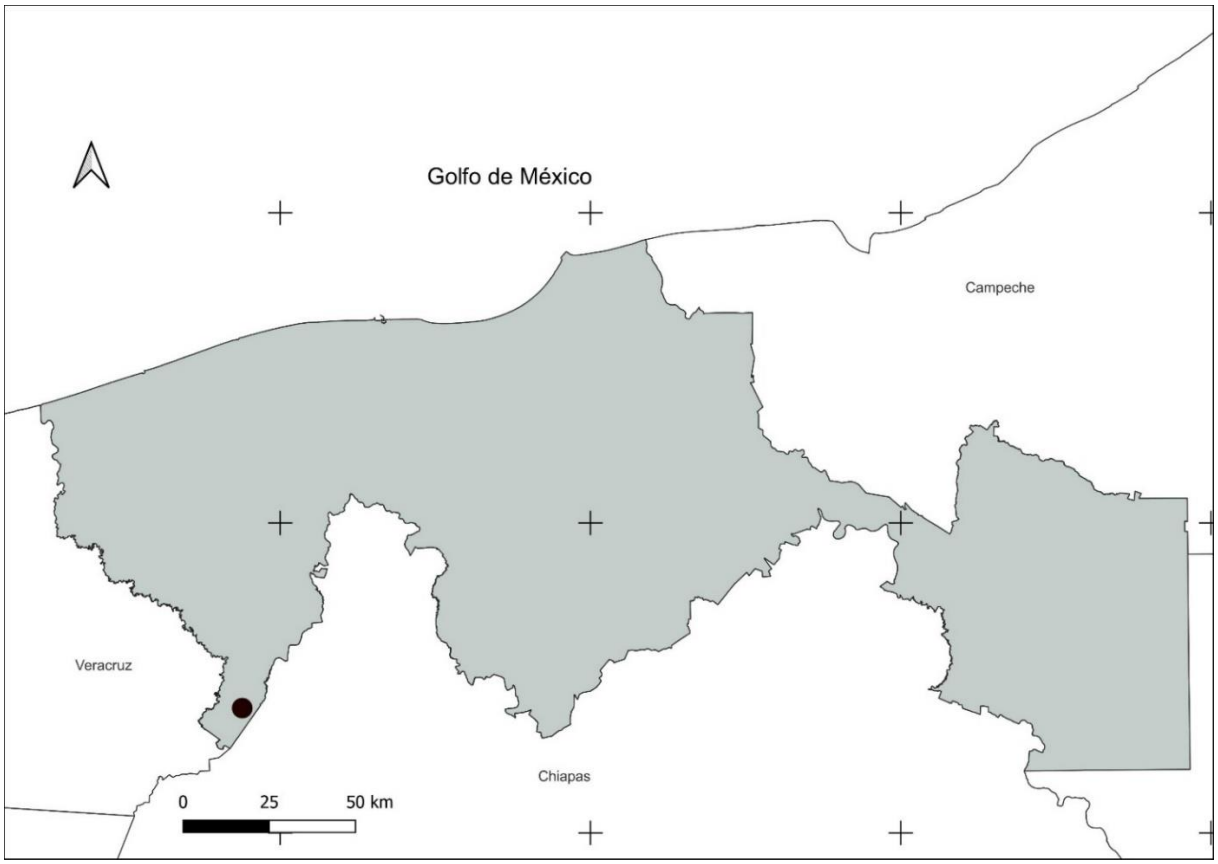


Figura 1. Mapa de ubicación del sitio de muestreo de una selva mediana, dentro del Complejo Ecoturístico “Agua Selva”, Huimanguillo, Tab. Méx.
Figure 1. Location map of the sampling site of a medium evergreen forest, within the “Agua Selva” Ecotourism Complex, Huimanguillo, Tab. Méx.

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

En el sitio podemos encontrar dos tipos de vegetación: Primaria, es una selva alta perennifolia, donde predominan árboles de hasta 45 m de altura tales como caoba (*Swietenia macrophylla* King), ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz), ceiba (*Ceiba pentandra* Gaertn), jobo (*Spondias mombin* L), zopo (*Guatteria anomala* R. E. Fr.) y palo mulato (*Bursera simaruba* L). La vegetación secundaria está representada por herbáceas de hasta 5 m de altura, arbustos entre 5 y 10 m y árboles de 10 y 30 m como guarumo (*Cecropia obtusifolia* Bertol), guácimo (*Guazuma ulmifolia* LAM), jonote (*Heliocarpus donnellsmithii* Rose), ciruelillo (*Trichilia havanensis* Jacq) y naranjillo (*Bernardia interrupta* Sessé) (Palma-López *et al.*, 2011; Rodríguez Ocaña y Banda Izeta, 2016; INEGI, 2017; Ríos-Rodas *et al.*, 2020).
De acuerdo con la clasificación de vegetación propuesta por Pennington y Sarukhán (2005), el área donde se establecieron las unidades de muestreo corresponde a selva alta perennifolia. Este tipo de ecosistema se caracteriza por su gran biodiversidad y la presencia de especies arbóreas de gran porte. Entre las especies representativas se encuentran *Swietenia macrophylla* King (caoba), *Brosimum alicastrum* Swartz (ramón), *Ceiba pentandra* Gaertn (ceiba), *Calophyllum brasiliense* (bari) y *Guatteria anomala* R. E. Fr. (zopo), las cuales alcanzan alturas de hasta 45 metros.

Muestreo de la vegetación
Mediante recorridos de campo se establecieron aleatoriamente cinco unidades de muestreo (UM) de 20 x 30 m (600 m^2). Cada UM fue dividida en 6 subunidades de muestreo (SUM) de 10 x 10 m (100 m^2) para facilitar el inventario de las especies arbóreas (Vázquez-Negrín *et al.*, 2011; López-Toledo *et al*., 2012; Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2021). En cada unidad de muestreo (UM) se registraron todos los individuos arbóreos con un diámetro normal (DN) de 1.3 m del suelo >2.5 cm. El diámetro normal (DN) se midió con una cinta métrica, la altura total (Ht) con un altímetro (Pistola marca Hagan, modelo SKU 43890, Alemania) y el diámetro de copa, tanto menor como mayor, siguiendo el protocolo de Sánchez-Gutiérrez *et al.* (2021). Además, cada UM fue descrita y comparada entre sí, con el objetivo de conocer y detallar las características de composición y estructura de cada unidad, lo que permitió una comprensión más precisa de la variabilidad y características particulares de cada sitio de muestreo.

Identificación taxonómica y evaluación del estado de conservación
La identificación y clasificación taxonómica de las especies se realizó utilizando manuales y guías de campo (Pennington y Sarukhán, 2005; Ochoa-Gaona *et al.*, 2012). Adicionalmente, se emplearon claves botánicas y comparaciones con especímenes de herbario, siguiendo los métodos descritos por Gentry (1993). La verificación de los nombres científicos y sus sinonimias se efectuó mediante la consulta de bases de datos internacionales reconocidas, como Trópicos (Missouri Botanical Garden, 2025) y Plants of the World Online (POWO) (Royal Botanic Gardens, 2023).
En los casos donde no fue posible identificar los individuos en campo, se recolectó material botánico (incluyendo corteza, frutos, semillas, ramas y flores) para su determinación posterior en el laboratorio. Cada especie identificada fue evaluada con respecto a su inclusión en: La Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), a través de su plataforma oficial (UICN, 2023). La NOM-059-SEMARNAT-2019, para determinar su estatus de conservación en México (DOF, 2019).

Análisis de datos
Diversidad arbórea. La diversidad se calculó mediante el índice de diversidad verdadera de orden 1 (^1D), donde todas las especies son consideradas en el valor de diversidad, ponderadas proporcionalmente según su abundancia en la comunidad; y la medida de diversidad de orden 2 (^2D), en el cual se toman en cuenta las especies más comunes (Jost, 2006, 2007; Tuomisto, 2010; Moreno *et al.*, 2011), con ayuda del programa EstimateS v9.1.0.
La equidad de la comunidad se analizó utilizando el índice de Pielou (J') con el programa Past v3.14, el cual mide la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada, con valores que van de 0 a 1, donde 1 nos dice que las especies presentan la misma abundancia dentro de la comunidad.
Curvas de rango-abundancia. Se realizaron curvas de rango-abundancia para representar de manera gráfica la abundancia de las especies. Ésta calcula la proporción de individuos respecto

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

al tamaño de la muestra, ordenando las especies de mayor a menor abundancia, a través de la expresión: pi= ni/N, donde "pi" es la abundancia proporcional de la especie i, "ni" es el número de individuos de la especie i y "N" es el número total de individuos, posteriormente se calculó el logaritmo base 10 para cada valor de pi (Feinsinger, 2004).

Estimador no paramétrico Bootstrap. La cobertura de la muestra se estimó a través de Bootstrap obtenido por Smith y van Belle (1984), el cual se basa en la proporción de cuadrantes que contienen cada especie y, por lo tanto, solo requiere datos de incidencia (presencia/ausencia) mediante intervalos de confianza al 95% obtenidos a través de técnicas de remuestreo (Chazdon *et al.*, 1998; Badii *et al.*, 2007).

Estructura arbórea. Para la jerarquización de la dominancia de cada especie en rodales mezclados se calculó el Índice de Valor de Importancia (IVI) (López-Toledo et al., 2012; Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2017) a través de la siguiente ecuación: *IVI= Dr + Abr + Fr*; donde: "Dr" se refiere a la densidad relativa; "Abr" = Dominancia relativa (empleando área basal); "Fr" = Frecuencia relativa; y se calcularon con las siguientes ecuaciones: *Dr= (Número de individuos de una especie/Número de total de individuos de todas las especies) *100*; *Abr= (Área basal de una especie/área basal de todas las especies) *100*. El área basal (AB) de los árboles se obtendrá con la siguiente ecuación: $AB= \pi/4 *DN^2$; *Fr= (Número de parcelas en que se representa una especie/Número de parcelas donde aparecen todas las especies) *100* (Corral-Rivas et al., 2002; Basáñez *et al.*, 2008).

El Índice de Valor Forestal (IVF), a diferencia del IVI, que sólo involucra variables horizontales, incluye la variable vertical de altura (Corella Justavino *et al.*, 2001; López-Toledo *et al.*, 2012; Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2017) y se determinó mediante la ecuación: *IVF= DNr + Hr + Cr*, donde: "DNr" = Diámetro normal relativo, "Hr" = Altura total relativa, "Cr" = Cobertura de copa relativa; se obtuvieron con las siguientes ecuaciones: *DNr= (Diámetro absoluto de cada especie/Diámetro absoluto de todas las especies) *100*; donde: *Diámetro absoluto= Diámetro de una especie/área muestreada*. *Hr= (Altura absoluta de cada especie/Altura de todas las especies) *100*; donde: *Altura absoluta= Altura de una especie/área muestreada*. *Cr= (Cobertura absoluta de cada especie/Cobertura absoluta de todas las especies) *100*; donde: *Cobertura absoluta= Cobertura de una especie/Área muestreada*. La cobertura se estimó con la ecuación para el área de una elipse: $A= \pi \cdot r_1 \cdot r_2$; donde: $\pi= 3.1416$, $r_1=$ Radio uno, $r_2=$ Radio dos. Esta ecuación supone que las copas de los árboles tienen una forma elíptica regular y varían significativamente en función de diversos factores, como la especie, la competencia por la luz y las condiciones ambientales.

RESULTADOS

En las cinco unidades de muestreo se registró un total de 400 individuos, se identificaron 59 especies de árboles agrupados en 52 géneros y 29 familias. Las familias con mayor riqueza fueron: Rubiaceae (con siete especies), Malvaceae (seis), Fabaceae (cinco), Moraceae (cinco), Meliaceae (cuatro) y Lauraceae (tres), las familias restantes estuvieron representadas por una o dos especies. La mayoría de los géneros (88%) se registraron con una especie. Sin embargo, del género *Guarea* se registraron tres especies; en cuanto a *Ficus*, *Nectandra*, *Pouteria*, *Pseudolmedia* y *Psychotria* fueron dos para cada uno. Las especies con mayor número de individuos fueron *Astrocaryum mexicanum* con 88, *Brosimum alicastrum* (37), *Oecopetalum mexicanum* (35), *Dendropanax arboreus* (21), *Calophyllum brasiliense* (16), *Nectandra angustifolia* (14), *Alibertia edulis* (11), *Sterculia mexicana* (11), *Rinorea guatemalensis* (11) y *Urera caracasana* (11), estas especies representan el 63.75% del total de las especies con mayor abundancia en las cinco UM (Tabla 1).

En cuanto al análisis de cada una de las unidades, en la UM 1 se registró un total de 58 individuos de 23 especies, pertenecientes a 23 géneros de 15 familias. La familia con mayor número de especies fue Rubiaceae con cuatro especies, las familias Anacardiaceae, Araliaceae, Fabaceae, Malvaceae y Meliaceae con dos especies cada una, las familias restantes estuvieron representadas por una. En la UM 2 se registraron 80 individuos de 27 especies, pertenecientes a 25 géneros de 19 familias. Las familias más representativas fueron Meliaceae con cuatro especies y Rubiaceae

con tres, las familias Fabaceae, Malvaceae y Moraceae con dos cada una, y las demás familias con una especie respectivamente. En la UM 3 se encontró un total de 83 individuos de 24 especies, pertenecientes a 24 géneros de 15 familias. Las familias con más riqueza fueron Malvaceae con cuatro especies y Moraceae con tres. En la UM 4 se registraron 109 individuos de 39 especies, pertenecientes a 36 géneros de 24 familias. Las familias Malvaceae y Meliaceae estuvieron representadas por cuatro especies cada una, seguidas de Fabaceae, Lauraceae y Rubiaceae con tres especies, Arecaceae, Clusiaceae y Moraceae con dos y las familias restantes por una especie. Los géneros mejor representados fueron *Guarea* con tres especies y *Nectandra* con dos. En la UM 5 se registraron un total de 70 individuos de 26 especies, pertenecientes a 24 géneros de 18 familias. Las familias con mayor riqueza fueron: Lauraceae, Malvaceae y Maliaceae con tres especies cada una, seguidas de Moraceae con dos especies, las familias restantes estuvieron representadas con una. Los géneros *Guarea* y *Nectandra* estuvieron presentes con dos especies cada una, los géneros restantes se registraron con una especie cada uno (Tabla1).

Tabla 1. Listado de especies arbóreas registradas en una selva mediana perennifolia en el complejo ecoturístico Agua Selva, Tabasco, México.

Table 1. List of tree species recorded in a medium evergreen forest in the Agua Selva ecotourism complex, Tabasco, Mexico.

Familia/Especie	Abrev.	UM1	UM 2	UM 3	UM 4	UM 5	IUCN	NOM-059
Anacardiaceae								
Astronium graveolens Jacq.	agr	1	0	0	0	0	LC	A
Spondias mombin L.	smo	3	3	0	0	0	LC	-
Annonaceae								
Annona cherimola Mill	ach	0	1	0	1	0	LC	-
Guatteria anomala R. E. Fr	gan	1	0	0	0	0	-	A
Apocynaceae								
Tabernaemontana donnell-smithii Rose ex J. D. Sm.	tdo	0	0	0	2	1	LC	-
Araliaceae								
Dendropanax arboreus (L.) Decne. & Planch.	dar	2	1	2	7	9	LC	-
Oreopanax capitatus (Jacq.) Decne. & Planch.	oca	1	0	2	0	0	LC	-
Arecaceae								
Astrocaryum mexicanum Liebm. ex Mart	ame	20	19	21	18	10	LC	-
Thrinax radiata Lodd. ex J.A. & J.H. Schult.	tra	0	0	0	1	0	LC	A
Boraginaceae								
Cordia alliodora (Ruiz y Pav.) Oken	cal	1	1	0	1	1	LC	-
Burseraceae								
Bursera simaruba (L.) Sarg.	bsi	0	0	1	0	0	LC	-
Chrysobalanaceae								
Hirtella racemosa Lam.	hra	0	1	0	0	0	LC	-
Clusiaceae								
Calophyllum brasiliense Cambess	cbr	0	2	0	8	6	LC	A
Clusia guatemalensis Hemsl.	cgu	0	0	0	1	0	LC	-
Combretaceae								
Terminalia amazonia (J. F. Gmel.) Excell	tam	0	2	0	0	0	LC	-
Ebenaceae								
Diospyros digyna Jacq.	ddi	0	0	0	1	0	LC	-
Euphorbiacea								
Acalypha skutchii I. M. Johnst	ask	0	4	3	0	0	LC	-
Fabaceae								
Ebenopsis ebano (Berland.) Barneby & J. W. Grimes	eeb	0	0	0	6	0	LC	-
Erythrina caribaea Krukoff & Barneby	eca	1	0	0	0	0	VU	-
Inga sp.	isp	1	0	0	1	0	-	-
Lonchocarpus guatemalensis Benth.	lgu	0	2	1	3	3	LC	-
Pterocarpus rohrii Vahl	pro	0	1	2	0	0	LC	-

Familia/Especie	Abrev.	UM1	UM 2	UM 3	UM 4	UM 5	IUCN	NOM-059
Icacinaceae								
Oecopetalum mexicanum Grenm. & C. H. Thomps	ome	7	7	14	4	3	LC	-
Lauraceae								
Licaria capitata (Cham. & Schltdl.) Kosterm.	lca	0	0	0	3	2	LC	-
Nectandra ambigens (S. F. Blake) C. K. Allen	nam	0	0	0	2	2	LC	-
Nectandra angustifolia (Schrad.) Nees & Mart.	nan	1	3	2	5	3	-	-
Malvaceae								
Hibiscus elatus S. W.	hel	0	0	2	2	1	-	-
Ochroma pyramidale (Cav. ex Lam.) Urb.	opy	0	1	1	0	0	LC	-
Pseudobombax ellipticum (Kunth) Dugand	pel	0	0	0	5	3	LC	-
Quararibea funebris (La llave) Vischer	qfu	1	0	1	0	0	-	-
Sterculia mexicana R. Br.	sme	2	2	4	2	1	-	-
Theobroma bicolor Humb. & Bonpl.	tbi	0	0	0	1	0	-	-
Melastomataceae								
Miconia sp	msp	0	0	0	1	0	-	-
Meliaceae								
Guarea donnell-smithii C. DC.	gdo	0	1	0	1	0	-	-
Guarea glabra Vahl	ggl	0	1	0	1	1	VU	-
Guarea grandifolia A. DC.	ggr	1	1	2	3	2	-	-
Trichilia japurensis C. DC.	tja	2	1	2	1	2	-	-
Moraceae								
Brosimum alicastrum Sw.	bal	0	16	9	7	5	LC	-
Ficus maxima Mill.	fma	0	0	0	1	1	LC	-
Ficus padifolia Kunth	fpa	0	1	2	0	0	LC	-
Pseudolmedia glabrata (Liebm.) C. C. Berg	pgl	0	0	1	0	0	LC	-
Pseudolmedia oxiphyllaria Donn. Sm.	pox	1	0	0	0	0	LC	-
Myrtaceae								
Eugenia acapulcensis Steud.	eac	0	0	0	1	0	LC	-
Polygonaceae								
Coccoloba barbadensis Jacq.	cba	0	0	1	1	1	LC	-
Primulaceae								
Ardisia fimbrillifera Lundell	afi	0	1	0	2	2	LC	-
Rubiaceae								
Alibertia edulis (Rich.) A. Rich. ex DC.	aed	2	1	1	4	3	LC	-
Blepharidium mexicanum Standl	bme	0	0	0	1	0	LC	-
Faramea occidentalis (L.) A. Rich.	foc	3	2	0	0	1	LC	-
Genipa americana L.	gam	0	0	0	1	0	LC	-
Posoqueria sp.	psp	1	0	0	0	0	-	-
Psychotria chiapanensis Standl.	pch	2	0	0	0	0	LC	-
Psychotria elata (Sw.) Hammel	pse	0	1	1	0	0	LC	-
Sapindaceae								
Cupania dentata Moc. & Sessé ex DC	cde	2	0	0	1	0	LC	-
Sapotaceae							-	-
Pouteria campechiana (Kunth) Baehmi	pca	1	0	0	0	0	LC	-
Pouteria multiflora (A. DC.) Eyma	pmu	0	1	1	1	1	-	-
Siparunaceae								
Siparuna andina (Tul.) A. DC.	san	0	0	0	1	1	LC	-
Tiliaceae								
Trichospermum mexicanum (DC.) Baill.	tme	0	0	0	1	0	LC	-
Urticaceae								
Urera caracasana (Jacq.) Gaudich. ex Griseb.	uca	0	3	6	1	1	LC	-
Violaceae								
Rinorea guatemalensis (S. Watson) Bartlett	rgu	1	0	1	5	4	LC	-
Totales (individuos)		**58**	**80**	**83**	**109**	**70**		

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

La especie más abundante en las cinco UM fue *A. mexicanum* con el 22% del total de los individuos registrados. En la UM 1, la segunda especie más abundante fue *O. mexicanum* con un 8.75%. En las UM 2, 3 y 5 *B. alicastrum* representó el 9.25%, *D. arboreus* con un 5.25% en la UM 5, y en las UM 4 y 5 *C. brasiliense* con el 4%. De acuerdo con el estado de conservación de la IUCN, de las 59 especies, *Erythrina caribaea* y *G. glabra* se encuentran listadas como Vulnerable (VU) y 44 en Preocupación Menor (LU). En la NOM-059-SEMARNAT-2010 las especies *A. graveolens*, *G. anómala*, *T. radiata* y *C. brasiliense* con categoría de Amenazada (A), las restantes no tienen una categoría asignada.

De acuerdo con el estimador no paramétrico de Bootstrap se estimó una riqueza de especies similar a lo observado en las cinco UM, con una completitud del muestreo de hasta el 84.51% (Tabla 2). En la UM 4 se observaron los valores más altos de diversidad de acuerdo con el índice de diversidad verdadera de orden 1 (^{1}D) y 2 (^{2}D) con 24.28 y 16.47 respectivamente, a diferencia de la UM 1 donde se observaron los más bajos con 12.62 y 6.67. Con respecto al índice de Pielou, las cinco UM mostraron una distribución equitativa de las especies, el valor más alto se registró en la UM 5 con J'=0.90 y el más bajo en la UM 1 con J'=0.80. Al calcular el índice de similitud entre las cinco UM, se determinó que los sitios que comparten un mayor número de especies fueron la UM 4 y la UM 5 al compartir una riqueza de 25 especies con un valor de similitud del 76%, en cambio la UM 1 y la UM 4 fueron las menos similares al compartir una riqueza de 12 especies con un valor de similitud del 38% (Tabla 3).

Tabla 2. Índices de diversidad verdadera de Orden 1 (^{1}D) y de Orden 2 (^{2}D), estimador de Bootstrap.
Table 2. True diversity indices of Order 1 (^{1}D) and Order 2 (^{2}D), Bootstrap estimator.

Cuadrante	Riqueza	^{1}D	^{2}D	Equidad	Bootstrap	Completitud
UM 1	23.00	12.62	6.67	0.80	28.49	80.73
UM 2	27.00	14.56	8.60	0.81	32.81	82.29
UM 3	24.00	13.40	8.39	0.81	28.40	84.51
UM 4	37.00	24.28	16.47	0.88	44.92	82.37
UM 5	26.00	19.20	14.67	0.90	30.91	84.12
TOTAL	59.00	25.62	12.9	0.80	67.34	87.61

Tabla 3. Valores de similitud en las cinco Unidades Muestrales (UM).
Table 3. Similarity values in the five Sampling Units (UM).

	UM 1	UM 2	UM 3	UM 4	UM 5
UM 1	-	0.44	0.46	0.38	0.44
UM 2	11	-	0.66	0.54	0.64
UM 3	11	17	-	0.47	0.60
UM 4	12	18	15	-	0.76
UM 5	11	17	15	25	-

En la UM 1 la curva de rango abundancia muestra que *A. mexicanum* es la especie dominante en el sitio, lo que representa el 30.48% del total. En la UM 2 las especies más dominantes fueron *A. mexicanum* con el 23.75% y *B. alicastrum* con el 20%, representaron el 43.75% del total de la abundancia. En la UM 3 *A. mexicanum* con el 25.30% y *Oecopetalum mexicanum* con 16.86%, sumando el 42.16%. En la UM 4 y la UM 5 la especie *A. mexicanum* fue la más dominante con el 16.51% y 14.28%, respectivamente (Figura 1).

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

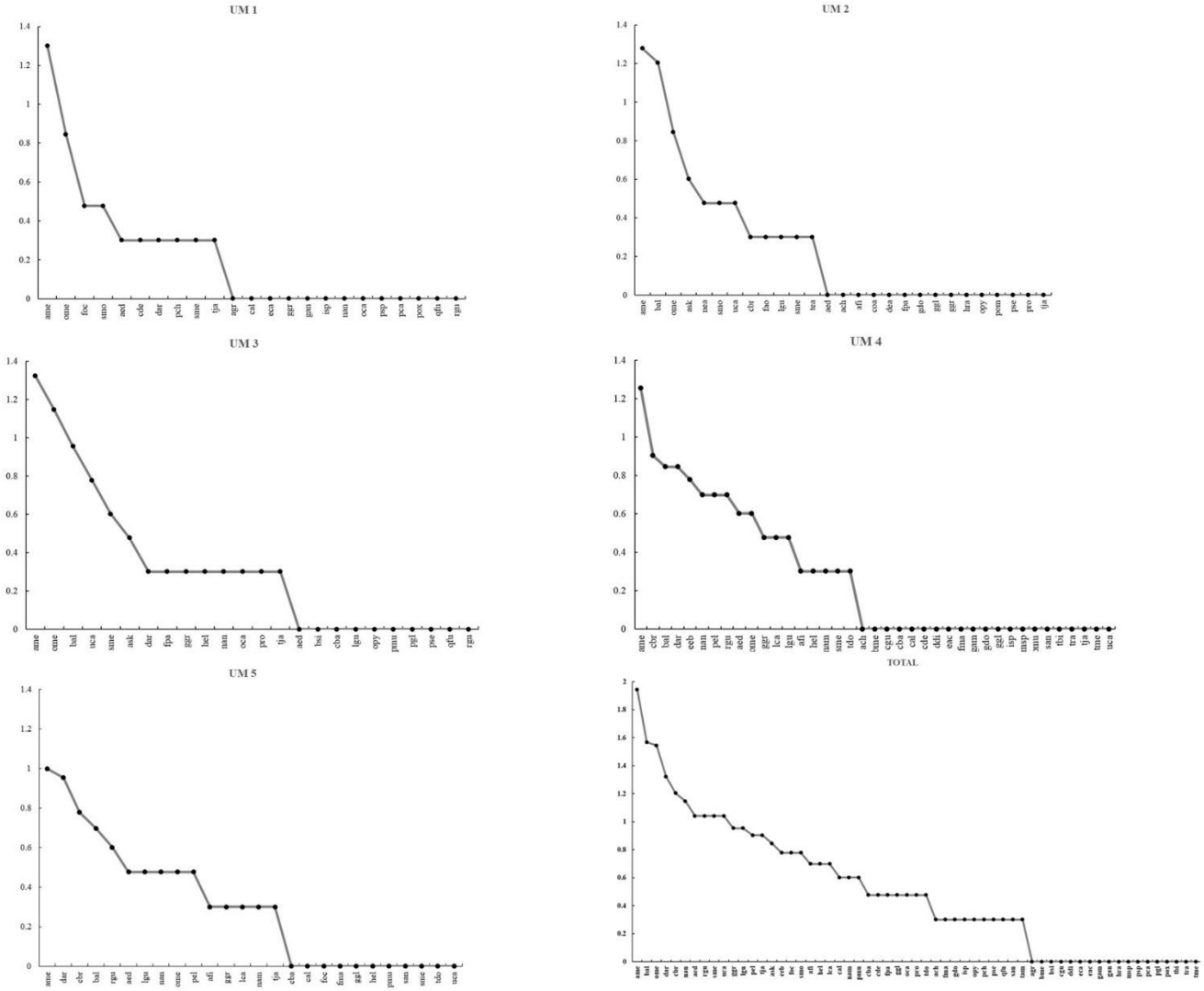


Figura 2. Curva de rango-abundancia para las especies arbóreas.
Figure 2. Range-abundance curve for tree species.

Las especies *Terminalia amazonia* y *A. mexicanum* presentaron los mayores valores de IVI con 31.55% y 27.16%, respectivamente. Por su parte, la especie *O. mexicanum* presentó el IVF más alto con 29.69%, seguida de *B. alicastrum* y *A. mexicanum* con 28.25% y 26.80% respectivamente. En el cálculo del IVF se tomaron en cuenta los valores relativos del diámetro, altura y cobertura de las especies. El mayor diámetro fue para *O. mexicanum* con 9.08%, seguido de *Brosimum alicastrum*, *Astrocaryum mexicanum*, *Dendropanax arboreus* con 9.41%, 8.93% y 8.83% respectivamente. La mayor altura la presentó *A. mexicanum* con 10.64%, seguida de *B. alicastrum* y *O. mexicanum* con 9.96% y 9.80%, respectivamente. Las especies con mayor cobertura de copa fueron *O. mexicanum*, *B. alicastrum* y *Sterculia mexicana* ocupando un 28.86% del área del sitio (Tabla 4).

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Tabla 4. Parámetros estructurales estimados para las especies registradas en el sitio de muestreo.
Table 4. Estimated structural parameters for the species recorded at the sampling site.

Especie	Diámetro (%)	Altura (%)	Cobertura (%)	IVF	Abundancia relativa (%)	Dominancia relativa (%)	Frecuencia relativa (%)	IVI
Oecopetalum mexicanum Grenm. & C. H. Thomps	9.08	9.80	10.81	29.69	8.75	4.33	3.92	17.00
Brosimum alicastrum Sw.	9.41	9.96	8.89	28.25	9.25	5.40	3.92	18.57
Astrocaryum mexicanum Liebm. ex Mart	8.93	10.64	7.23	26.80	22	1.24	3.92	27.16
Dendropanax arboreus (L.) Decne. & Planch.	8.83	7.79	7.30	23.92	5.25	10.03	3.27	18.55
Sterculia mexicana R. Br.	6.05	5.23	9.17	20.44	2.75	9.78	2.61	15.15
Calophyllum brasiliense Cambess	4.32	4.40	5.94	14.66	4	5.25	3.92	13.17
Terminalia amazonia (J. F. Gmel.) Excell	4.81	1.43	3.89	10.13	0.5	29.74	1.31	31.55
Alibertia edulis (Rich.) A. Rich. ex DC.	3.57	2.99	2.99	9.55	2.75	2.27	3.92	8.95
Spondias mombin L.	2.98	2.74	3.23	8.95	1.5	3.79	1.96	7.25
Guarea grandifolia A. DC.	3.21	3.15	2.52	8.88	2.25	2.58	3.27	8.09

IVF= Índice de Valor Forestal. IVI= Índice de Valor de Importancia. Las especies están ordenadas en orden descendente según su IVF.

DISCUSIÓN

La composición de especies arbóreas en el área de estudio se agrupó mayormente en las familias Rubiaceae, Malvaceae, Fabaceae y Moraceae, dichas familias son frecuentemente reportadas en las selvas medianas perennifolias y subperennifolias debido a que están ampliamente distribuidas en la región tropical (Bremer, 2009; Juárez-Fragoso *et al.*, 2017; Alarcón-Alarcón *et al.*, 2019; Moreno-Jiménez *et al.*, 2019; Gómez Velázquez *et al.*, 2020; García-Cox *et al.*, 2023). Este hallazgo es consistente con estudios previos en selvas tropicales, donde se ha observado que ciertas especies dominan en términos de abundancia debido a su adaptabilidad a las condiciones locales (Hubbell, 2001; Challenger y Soberón, 2008), a su plasticidad ecológica y estrategias adaptativas. En particular Fabaceae, es una familia conocida por su capacidad de fijación de nitrógeno, lo que mejora los suelos escasos en nutrientes y le da ventaja para adaptarse, en cambio hay especies de Moraceae que suelen estar asociados con interacciones mutualistas con fauna dispersora, favoreciendo su establecimiento y regeneración (Domínguez-Domínguez *et al.*, 2006; Díaz-Prieto *et al.*, 2017). Además, la dominancia de estas familias podría estar influenciada por factores ambientales locales, como la disponibilidad de agua y luz y la competencia interespecífica, también habría que tomar en cuenta la historia de perturbaciones en la zona. De acuerdo con Chazdon (2017), ciertas especies en ecosistemas perturbados, tienden a establecerse con mayor éxito debido a su regeneración rápida o tolerancia a condiciones de estrés.

La riqueza y la abundancia que se registró en nuestro estudio fue similar a lo reportado por Maldonado-Sánchez y Maldonado-Mares (2010) con 51 especies y una abundancia de 549 individuos en una selva tropical de Tacotalpa, Tabasco; no obstante, fueron mayores a lo registrado por Alarcón-Alarcón *et al.* (2019) quienes reportan una riqueza cinco veces menor en una selva de Veracruz; así mismo, Zamora-Crescencio *et al.* (2018, 2020) reportan una riqueza y abundancia mayor a lo registrado en nuestro estudio con 80 especies y 2 367 individuos y 79 especies con 1 528 individuos, ambos estudios en Campeche. Como se puede apreciar en los diferentes estudios el número de especies y sus abundancias puede variar notablemente, esto solo es el reflejo de la riqueza florística de las selvas mexicanas. Esto podría deberse al resultado de la combinación de factores como la interacción entre especies, la competencia por recursos, la fitofagia por parte de otros grupos taxonómicos, el tipo de suelo e incluso las restricciones fisiológicas propias de éstas. Comprender el grado y el porqué de estas diferencias es importante para interpretar los patrones de distribución de la biodiversidad, ya sea animal o vegetal.

En los muestreos realizados en el área de estudio se registró a *Astrocaryum mexicanum* como la especie más abundante. De acuerdo con Piñero *et al.* (1977), esta especie es comúnmente

Núm. 60: 107-122 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

dominante en el estrato inferior de las selvas, alcanzando alturas considerables. La densidad y cobertura de esta especie contribuyen significativamente en la composición de la comunidad vegetal, ya que pueden influir en la regulación de la luz solar que penetra desde el dosel, la humedad y la competencia por recursos. En áreas donde esta palma es menos abundante, se observa un incremento en la diversidad de especies vegetales, especialmente en el estrato inferior. Por otra parte, en áreas donde *A. mexicanum* presenta abundancias superiores al 80 % los valores de diversidad tienden a ser bajos. Estos datos coinciden con nuestros registros de *A. mexicanum*, donde se obtuvo una abundancia promedio del 22% en cada UM, con valores de diversidad medios-altos.

Al comparar las UM, se determinó que la UM 4 es más heterogénea, lo que fue corroborado con los índices de diversidad ^{1}D y ^{2}D, posiblemente por variaciones microambientales que favorecen la coexistencia de más especies (Grubb, 1977), ya que en esta UM se presenta una pendiente de aproximadamente 45 grados, está inclinación puede crear condiciones desfavorables para el crecimiento de árboles de tallas grandes debido a la estabilidad limitada, mayor erosión y menor profundidad para que las raíces logren fijarse. La ausencia de estos árboles permite mayor entrada de luz, lo que facilita que otras especies de menores tallas puedan desarrollarse. Así mismo, se identificó que la mayor equidad de las poblaciones vegetales se registró en la UM 5, debido a que las poblaciones vegetales presentan abundancias similares, con pocas poblaciones dominantes. En cuanto a la similitud, el valor más alto se registró entre la UM4 y UM5, con un valor del 76%, mientras que la menor similitud fue entre la UM1 y UM4 (38%). Esto podría deberse a diferencias en las condiciones ambientales y el manejo del uso del suelo entre las diferentes unidades (Sánchez-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Las primeras diez especies con mayor IVF e IVI nos permiten conocer los componentes más importantes de la vegetación en el sitio. Estos índices destacan los árboles que están mejor adaptados por su dominancia, codominancia, abundancia y distribución en cada UM. En este estudio las especies con mayores índices fueron *Oecopetalum mexicanum* y *Brosimum alicastrum*, esta última también fue reportada con el mayor IVI por Martínez-Sánchez (2016) y Tadeo-Noble *et al.* (2024) en selvas medianas subperennifolias en Tabasco y Quintana Roo, respectivamente. En otros estudios reportan a *Terminalia buceras* (Zamora-Crescencio *et al.*, 2017) y *Bursera simaruba* (Gómez Velázquez *et al.*, 2020) con los índices más altos. Aunque en los sitios donde se han llevado a cabo estos estudios son selvas medianas, se pueden notar las diferencias en la riqueza de especies arbóreas que se encuentran, esto se puede deber en parte a la biología y adaptabilidad que presentan para colonizar los sitios. En el caso de *T. buceras* se ha reportado como una especie donde el lugar tiene características de zonas inundables, en el caso de *B. simaruba* es una especie que se le conoce por ser una especie típica de selvas perturbadas, pero que en el sitio estudiado se registró con valores bajos de IVI e IVF, por lo que sugiere que aún es una selva conservada. En cambio, *B. alicastrum* fue la segunda con los mayores IVI e IVF, esto puede ser debido a que estos árboles llegan a adaptarse a sitios con pendientes pronunciadas y es una especie de amplia distribución por todo el Golfo de México y por el Pacífico, y es común en la selva alta y mediana perennifolia de México (Pennington y Sarukhán, 2005). También tiene un papel importante en la dinámica y estructura de las selvas, ya que se ha visto que bajo los árboles masculinos se presenta una alta diversidad de plántulas sin que llegue a dominar alguna especie en particular en las primeras etapas de desarrollo. Esto sugiere que *B. alicastrum* es una especie que favorece el repoblamiento de otras; en cambio, bajo la cobertura de los árboles femeninos se ha presentado una baja diversidad de plántulas, alrededor del 80% de esta especie. Por lo que facilita la coexistencia de diversos árboles en el dosel. Esta característica ha favorecido que se le encuentre asociado con especies como *Lonchocarpus* sp*., Spondias sp., Terminalia amazonia*, *Calophyllum brasiliense* y *Dendropanax arboreus* (Berg, 1972; Villanueva-Ávalos, 2018), mismas especies que también fueron registradas para este estudio.

CONCLUSIONES

La diversidad y composición de especies arbóreas en el sitio de estudio reflejan la riqueza que caracteriza a las selvas medianas perennifolias. Las familias Rubiaceae, Malvaceae, Fabaceae y

Moraceae fueron predominantes en esta investigación, y que coincidieron con hallazgos previos en selvas tropicales, resaltando la adaptabilidad a las condiciones locales de cada sitio muestreado. La riqueza y la abundancia muestran variaciones significativas en comparación con otros estudios realizados en el sureste, lo que resalta la influencia de los factores microambientales y la competencia por los recursos en la distribución de las poblaciones de árboles. La abundancia de *A. mexicanum* en el estrato inferior y su impacto en la diversidad de especies vegetales demuestra la complejidad de las interacciones ecológicas presentes. Además, la heterogeneidad y equidad en las UM podrían estar influenciadas por las condiciones microambientales y las variaciones del terreno, lo que posiblemente favorezca la coexistencia de diversas especies. Por último, los índices de valor de importancia resaltan las especies mejor adaptadas y su rol en la estructura y dinámica del ecosistema, evidenciando la importancia de árboles como *B. alicastrum* para favorecer el repoblamiento y coexistencia de otras especies arbóreas.

LITERATURA CITADA

Alarcón-Alarcón, D., Raya-Cruz, B. E., & Pech-Canché, J. M. (2019). Composición florística y estructura de los árboles en el ejido Solteros de Juan de Rosas, Papantla, Veracruz. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, *7*(2), 61–69.

Badii, M. H., Castillo, J., Wong, A., & Landeros, J. (2007). Precisión de los índices estadísticas: Técnicas de jacknife & bootstrap. *Innovaciones de Negocios*, *4*(1), 63–78.

Basáñez, A. J., Alanís, J. L., & Badillo, E. (2008). Composición florística y estructura arbórea de la selva mediana subperennifolia del ejido "El Remolino", Papantla, Veracruz. *Avances en Investigación Agropecuaria*, *12*(2), 03–22. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83712202

Berg, C. (1972). *Brosimum alicastrum*. *Flora Neotropica. Monograph 7*, 170–171. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/47-morac1m.pdf

Bremer, B. (2009). A review of molecular phylogenetic studies of Rubiaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, *96*(1), 4–26. https://doi.org/10.3417/2006197

Burelo-Ramos, C. M., Zamudio-Ruiz, S., & González-Aguilar, M. A. (2018). *Pinguicula olmeca* (Lentibulariaceae) una nueva especie del sur de México. *Botanical Sciences*, *96*(2), 359–365. https://doi.org/10.17129/botsci.1927

Canseco-Márquez, L., Aguilar-López, J. L., Luría-Manzano, R., Pineda, E., & Caviedes-Solís, I. W. (2017). A new species of treefrog of the genus *Ptychohyla* (Anura: Hylidae) from Southern Mexico. *Zootaxa*, *4317*(2), 279–290. https://doi.org/10.11646/zootaxa.4317.2.5

Carvajal-Hernández, C. I., Silva-Mijangos, L., Kessler, M., & Lehnert, M. (2018). Adiciones a la pteridoflora de Tabasco, México: la importancia del bosque mesófilo de montaña. *Acta Botanica Mexicana*, *124*, 7–18. https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1300

Challenger, A., & Dirzo, R. (2009). Factores de cambio y estado de la biodiversidad. En *Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio* (pp. 37–73). CONABIO.

Challenger, A., & Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. En *Capital actual de México. Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 87–108). CONABIO. https://propedeuticoecologiatropical10.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/05/los-ecosistemas-de-mexico.pdf

Chazdon, R. L. (2017). Landscape restoration, natural regeneration, and the forests of the future. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, *102*(2), 251–257. https://doi.org/10.3417/2016035

Chazdon, R. L., Colwell, R. K., Denslow, J. S., & Guariguata, M. R. (1998). Statistical methods for estimating species richness of woody regeneration in primary and secondary rain forests of NE Costa Rica. En *Forest Biodiversity research, monitoring and modeling* (Vol. 20, pp. 285–309). https://www.researchgate.net/publication/236733736

Corella Justavino, F., Valdez Hernández, J. I., Cetina Alcalá, V. M., González Cossio, F. V., Trinidad Santos, A., & Aguirre Rivera, J. R. (2001). Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del estado de Tabasco, México. *Revista Ciencia Forestal en México*, *26*(90), 73–102.

https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/914/2168

Corral-Rivas, J., Aguirre-Calderón, O., Jiménez-Pérez, J., & Návar-Cháidez, J. de J. (2002). Muestreo de diversidad y observaciones ecológicas del estrato arbóreo del bosque mesófilo de montaña el cielo, Tamaulipas, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *8*(2), 125–131. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62980206

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2019). *NOM-059-SEMARNAT-2019*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5578808&fecha=14/11/2019

Díaz-Prieto, L., Vázquez-Luna, D., Jarquín-Sánchez, A., Velázquez-Silvestre, A., & Lara-Rodríguez, D. (2017). Especies tropicales (Fabaceae): Inversión asociada al aporte rizosférico de nitrógeno y fósforo al suelo. *Agroproductividad*, *10*(2), 116–120.

Domínguez-Domínguez, L. E., Morales-Mávil, J. E., & Alba-Landa, J. (2006). Germinación de semillas de Ficus insipida (Moraceae) defecadas por tucanes (*Ramphastos sulfuratus*) y monos araña (Ateles geoffroyi). *Rev. Biol. Trop.*, *54*(2), 387–394.

Feinsinger, P. (2004). *El diseño de estudios de campo para la conservación de la biodiversidad* (C. Murcia, G. Kattan, & P. Feinsinger, Eds.). FAN.

García-Cox, W., López-Tobar, R., Herrera-Feijoo, R. J., Tapia, A., Heredia-R., M., Toulkeridis, T., & Torres, B. (2023). Floristic Composition, Structure, and Aboveground Biomass of the Moraceae Family in an Evergreen Andean Amazon Forest, Ecuador. *Forests*, *14*, 01–16. https://doi.org/10.3390/f14071406

Gentry, A. H. (1993). Tropical Forest Biodiversity and the Potential for New Medicinal Plants. En A. Kinghorn & A. Balandrin (Eds.), *Human Medicinal Agents from Plants* (pp. 13–24). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-1993-0534.ch002

Gómez Velázquez, A., Tadeo Noble, A. E., Beltrán-Rodríguez, L., Guízar Nolazco, E., Apodaca Martínez, M., & Leyva Ovalle, Á. (2020). Coeficiente de asociación entre especies de selva mediana subperennifolia en Calakmul, México. *BOSQUE*, *41*(3), 233–239. https://doi.org/10.4067/S0717-92002020000300233

Grubb, P. (1977). Control of Forest Growth and Distribution on Wet Tropical Mountains: with Special Reference to Mineral Nutrition. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *8*, 83–107. https://doi.org/10.1146/annurev.es.08.110177.000503

Hubbell, S. P. (2001). *The unified neutral theory of biodiversity and biogeography*. Princeton University Press, Princeton.

INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Tabasco*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825095123

INEGI. (2021). *Estadísticas a propósito del Día Mundial del Medio Ambiente (5 de junio)*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *Oikos*, *113*(2), 363–375. https://doi.org/10.1111/j.2006.0030-1299.14714.x

Jost, L. (2007). Partitioning diversity into independent alpha and beta components. *Ecology*, *88*(10), 2427–2439.

Juárez-Fragoso, M. A., López-Acosta, J. C., & Velázquez-Rosas, N. (2017). Contribución al conocimiento ecológico y florístico de un palmar dominado por Sabal mexicana Mart. al sur del estado de Veracruz, México. *Polibotánica*, *44*, 51–66. https://doi.org/10.18387/polibotanica.44.4

Leigh, G. E. (1999). *Tropical forest ecology: a view from Barro Colorado Island*. Oxford University Press.

López-Toledo, J. F., Valdez-Hernández, J. I., Pérez-Farrera, M. Á., & Cetina-Alcalá, V. M. (2012). Composición y estructura arbórea de un bosque tropical estacionalmente seco en la reserva de la biósfera la sepultura, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *3*(12), 43–56.

Maldonado-Sánchez, E. A., & Maldonado-Mares, F. (2010). Estructura y diversidad arbórea de una selva alta perennifolia en Tacotalpa, Tabasco, México. *Universidad y Ciencia*, *26*(3), 235–245.

Martínez-Sánchez, J. L. (2016). Comparación de la diversidad estructural de una selva alta perennifolia y una mediana subperennifolia en Tabasco, México. *Madera y Bosques*, *22*(2), 29–40.

Missouri Botanical Garden. (2025). *Missouri Botanical Garden*. https://www.missouribotanicalgarden.org/plantfinder/plantfindersearch.aspx

Moguel-Ordóñez, E. J., Jiménez-Pérez, N. del C., Luna-Ruiz, R. del C., Pacheco-Figueroa, C. J., Valdez-Leal, J. de D., Mata-Zayas, E. E., Gama-Campillo, L. M., & Rangel-Ruiz, L. J. (2022). Estado del relicto de selva del "Cerro de Las Flores", Sierra de Huimanguillo, Tabasco, México. *Kuxulkab'*, *28*(61), 05–13. https://doi.org/10.19136/kuxulkab.a28n61.4508

Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., & Pavón, N. P. (2011). Reanálisis de la diversidad alfa: alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *82*, 1249–1261.

Moreno-Jiménez, V., Gama-Campillo, L. M., Romero-García, A., Ochoa-Gaona, S., Contreras-Sánchez, W. M., Jiménez-Pérez, N. del C., & Mata-Zayas, E. E. (2019). Características del paisaje y su relación con la diversidad y estructura de la vegetación ribereña del sureste de México. *Acta Botanica Mexicana*, *126*, 1–20. https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1487

Ochoa-Gaona, S., Zamora-Cornelio, L. F., Cabrera-Pérez, S., González-Valdivia, N. A., Pérez-Hernández, I., & López-Moreno, V. (2012). *Flora leñosa útil de la Sierra de Tenosique, Tabasco, México*. El Colegio de la Frontera Sur. Departamento de Agroecología.

Palma-López, D. J., Vázquez Navarrete, C. J., Mata Zayas, E. E., López Castañeda, A., Morales Garduza, M. A., Chablé Pascual, R., Contreras Hernández, J., & Palma-Cancino, D. Y. (2011). *Zonificación de ecosistemas y agroecosistemas susceptibles de recibir pagos por servicios ambientales en la Chontalpa, Tabasco*. Colegio de Postgraduados-SERNAPAM. https://www.researchgate.net/publication/293958292_Zonificacion_de_Ecosistemas_y_Agroecosistemas_Susceptibles_de_Recibir_Pagos_por_Servicios_Ambientales_en_la_Chontalpa_Tabasco

Pennington, T. D., & Sarukhán, J. (2005). *Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies* (Tercera edición). Universidad Autónoma de México, Fondo de la Cultura Mexicana. https://books.google.com.cu/books?id=Uwm6MuLlnU0C&printsec=copyright#v=onepage&q&f=false

Piñero, D., Sarukhán, J., & González, E. (1977). Estudios demográficos en plantas. *Astrocaryum mexicanum* Liebm. 1. Estructura de las poblaciones. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, *37*, 69–118. https://doi.org/10.17129/botsci.1164

Ríos-Rodas, L., Zenteno-Ruíz, C. E., Pérez-De la Cruz, M., Arriaga-Weiss, S. L., Jiménez-Pérez, N. del C., & Bustos-Zagal, M. G. (2020). Riparian amphibians in two tropical ecosystems of southeastern Mexico. *Ecosistemas*, *29*(3), 01–07. https://doi.org/10.7818/ECOS.2098

Rodríguez Ocaña, L., & Banda Izeta, H. (2016). El ecoturismo en Agua Selva Tabasco, México: Medios de promoción. *International Journal of Scientific Managment Tourism*, *2*(3), 291–306.

Royal Botanic Gardens, K. (2023). *Plants of the World Online (POWO)*. https://checklistbuilder.science.kew.org/reportbuilder.do;jsessionid=3C8E13896F0EC62A060D178143C68C66.kpptomcat03-wcvp

Sánchez-Gutiérrez, F., Valdez-Hernández, J. I., Hernández-de la Rosa, P., Sánchez-Escudero, J., Sol-Sánchez, Á., Castillejos-Cruz, C., & Brindis-Santos, A. I. (2021). Estructura y composición arbórea en un gradiente altitudinal del Área Natural Protegida Metzabok, Chiapas, México. *Revista de Biología Tropical*, *69*(1), 12–22. https://doi.org/10.15517/RBT.V69I1.40689

Sánchez-Gutiérrez, F., Valenzuela-Gómez, A., Valdez-Hernández, J. I., & González-González, C. A. (2017). Estructura y diversidad de especies arbóreas en el sitio arqueológico "El Mirador", Selva Lacandona, Chiapas. *Polibotánica*, *44*, 79–94. https://doi.org/10.18387/polibotanica.44.6

Sistema Nacional de Monitoreo Forestal (SNMF). (2020). *Principales indicadores forestales Ciclo 2015-2020*. https://snmf.cnf.gob.mx/principaleindicadoresforestalesciclo-2015-2020/

Smith, E. P., & van Belle, G. (1984). Nonparametric Estimation of Species Richness. *Biometrics*, *40*, 119–130. https://doi.org/10.2307/2530750

Tadeo-Noble, A. E., García Moya, E., Valdez Hernández, J. I., López Mata, L., Luna Cavazos, M., De Los Santos Posadas, H. M., & Hernández Stefanoni, J. L. (2024). Patrones de

Recibido:
29/agosto/2024

Aceptado:
4/junio/2025

estructura y diversidad de selva mediana subperennifolia bajo condiciones de gestión forestal. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *15*(81), 133–159. https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1424

Tuomisto, H. (2010). A diversity of beta diversities: straightening up a concept gone awry. Part 1. Defining beta diversity as a function of alpha and gamma diversity. *Ecography*, *33*(1), 2–22. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05880.x

Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. (2023). *Lista Roja de Especies Amenazadas de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN)*. https://www.iucnredlist.org/es

Vázquez-Negrín, I., Castillo-Acosta, O., Valdez-Hernández, J. I., Zavala-Cruz, J., & Martínez-Sánchez, J. L. (2011). Estructura y composición florística de la selva alta perennifolia en el ejido Niños Héroes Tenosique, Tabasco, México. *Polibotánica*, *32*, 41–61.

Villanueva-Ávalos, J. F. (2018). *Brosimum alicastrum* Swartz. En J. M. Palma García & C. González-Rebeles Islas (Eds.), *Recursos arbóreos y arbustivos tropicales para una ganadería bovina sustentable* (pp. 17–24). Universidad de Colima. http://ww.ucol.mx/content/publicacionesenlinea/adjuntos/Recursos-arboreos-y-arbustivos-tropicales_462.pdf

Zamora-Crescencio, P., Barrientos-Medina, R. C., Plasencia-Vázquez, A. H., Villegas, P., Domínguez-Carrasco, M. D. R., Gutiérrez-Báez, C., Aguirre-Crespo, F. J., Vargas-Contreras, J. A., Uc-Ruvalcava, S., & Poot Sarmiento, I. G. (2020). Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia en Hobomó, Campeche, Campeche, México. *Madera y Bosques*, *26*(1), 1–14. https://doi.org/10.21829/myb.2020.2611899

Zamora-Crescencio, P., Rico-Gray, V., Barrientos-Medina, R. C., Puc-Garrido, E. C., Villegas, P., Domínguez-Carrasco, M. del R., & Gutiérrez-Báez, C. (2017). Estructura y composición florística de la selva mediana subperennifolia en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica*, *43*, 1–20.

Zamora-Crescencio, P., Rico-Gray, V., Ramírez-Medina, L. N. G., Barrientos-Medina, R. C., Plasencia Vázquez, A. H., Villegas, P., Domínguez-Carrasco, M. del R., & Gutiérrez-Báez, C. (2018). Composición y estructura de la vegetación secundaria en Bethania, Campeche, México. *Polibotánica*, *45*, 57–74. https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.5

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

DIVERSIDAD DEL SOTOBOSQUE: UN ATRIBUTO DE EVALUACIÓN EN LAS ESTRATEGIAS DE RESTAURACIÓN FORESTAL

UNDERSTORY DIVERSITY: AN ASSESSMENT ATTRIBUTE IN FOREST RESTORATION STRATEGIES

Plascencia Escalante, F.O., I. Herrera Ávila, M. Pérez Suárez, P. Hernández de la Rosa, G. Ángeles Pérez

DIVERSIDAD DEL SOTOBOSQUE: UN ATRIBUTO DE EVALUACIÓN EN LAS ESTRATEGIAS DE RESTAURACIÓN FORESTAL
UNDERSTORY DIVERSITY: AN ASSESSMENT ATTRIBUTE IN FOREST RESTORATION STRATEGIES

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 123-139 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.8

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Diversidad del sotobosque: un atributo de evaluación en las estrategias de restauración forestal

Understory diversity: an assessment attribute in forest restoration strategies

Isidoro Herrera- Ávila https://orcid.org/0009-0007-0746-5053
Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Edo. de México 56234

Marlín Pérez-Suárez https://orcid.org/0000-0002-7969-0061
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales (ICAR), Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 50295

Patricia Hernández-de la Rosa https://orcid.org/0000-0001-8577-1127
Gregorio Ángeles Pérez https://orcid.org/0000-0002-9550-2825
Francisca Ofelia Plascencia-Escalante / fplascen@colpos.mx
https://orcid.org/0000-0002-9475-5716
Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados Carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Edo. de México 56234

Plascencia Escalante, F.O., I. Herrera Ávila, M. Pérez Suárez, P. Hernández de la Rosa, G. Ángeles Pérez

DIVERSIDAD DEL SOTOBOSQUE: UN ATRIBUTO DE EVALUACIÓN EN LAS ESTRATEGIAS DE RESTAURACIÓN FORESTAL

UNDERSTORY DIVERSITY: AN ASSESSMENT ATTRIBUTE IN FOREST RESTORATION STRATEGIES

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 123-139. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.8

RESUMEN La diversidad y abundancia de las especies presentes en el sotobosque son atributos de un ecosistema que ayudan a conocer la integridad, y por tanto la eficiencia de las reforestaciones que son empleadas como estrategia de restauración ecológica. El objetivo fue evaluar la diversidad vegetal del sotobosque en una zona degradada (ZD), dos zonas reforestadas con *Pinus montezumae* Lamb. de 5 y 9 años de edad (ZR5, ZR9) y un bosque de referencia (BR, remanente de bosque natural con cierto grado de perturbación). En sitios circulares, de 100 m^2 y 1 m^2 dentro de cada zona, se recolectaron e identificaron las especies presentes en el sotobosque y se estimó la diversidad alfa (índices de diversidad de Margalef, Simpson y equidad) y beta (índice de similitud de Jacard), y se calculó el índice de valor de importancia relativa (IVIR). El mayor índice de riqueza y diversidad alfa se registró en ZR5 (4.26 y 0.90 respectivamente) y, esta presentó un 64% de especies compartidas con ZR9. El BR presentó un valor máximo de IVIR de 14.40, representado por *Piptochaetium virescens* (Kunth) Parod) y en las ZD, ZR5 y ZR9 por *Muhlenbergia macroura* (Kunth) Hitchc. obtuvo los valores mayores (13.34, 7.68 y 21.39, respectivamente). El estudio mostró que la composición y riqueza de especies del sotobosque está influenciado por la edad de las reforestaciones. Se evidenciaron algunas diferencias entre las zonas bajo estudio, que reestablecen la cubierta vegetal del sotobosque e inician la recuperación de las zonas degradadas.
Palabras clave: *Pinus montezumae* Lamb., riqueza, diversidad alfa y beta, sotobosque.

ABSTRACT: The species diversity and abundance present in the understory are ecosystem attributes that allow to understand its integrity and, therefore, the efficiency of reforestation strategies used as an ecological restoration strategy. The objective was to evaluate the plant diversity of the understory in a degraded area (ZD), two areas reforested with *Pinus montezumae* Lamb., 5 and 9 years old (ZD5, ZD9), and a reference forest (BR, a remnant of natural forest with some degree of disturbance). In circular plots of 100 m^2 and 1 m^2 within each area, the species present in the understory were collected and identified, and alpha diversity (Margalef, Simpson, and evenness diversity indices) and beta diversity (Jacard similarity index) were estimated, and the relative importance value index (IVIR) was calculated. The highest species richness index and alpha diversity were recorded in

ZR5 (4.26 and 0.90, respectively) and, the latter shared 64% of species with ZR9. The BR showed a maximum IVIR value of 14.4, represented by *Piptochaetium virescens* (Kunth) Parod.), and in ZD, ZR5 and ZR9 by *Muhlenbergia macroura* (Kunth) Hitchc. obtained the highest values (13.34, 7.68, and 21.39, respectively).
The study showed that the composition and species richness of the understory are influenced by the age of reforestation. Some differences were evident between the study areas, which reestablished the understory vegetation cover and initiated the recovery of degraded areas.
Key words: *Pinus montezumae* Lamb., richness, alpha and beta diversity, understory.

INTRODUCCIÓN

La restauración de los ecosistemas se ha convertido en una necesidad fundamental para los retos ambientales y socio económicos que enfrentan los ecosistemas a nivel mundial (Fremout *et al.*, 2022) debido a que una de las principales metas de la restauración es que las acciones implementadas lleven al incremento o recuperación de las funciones y servicios de estos (Derhé *et al.*, 2016; Bhutia *et al.*, 2019; Staples *et al.*, 2020). La restauración tiene impactos positivos en la biodiversidad (Huang *et al.*, 2019; Mestre *et al.*, 2017) y, por tanto, en el suministro de servicios ecosistémicos (Huang *et al.*, 2019; Deng *et al.*, 2023), ya que el número e identidad de las especies presentes influyen en una o varias de las funciones del ecosistema, como la producción y descomposición de hojarasca, almacén de carbono, retención de humedad, entre otros (Ma *et al.*, 2024; Ou *et al.*, 2020).
El sotobosque es un componente vital en los ecosistemas forestales (Su *et al.*, 2021) debido a que es un estrato de vegetación distinguible de un estrato superior -generalmente compuesto de árboles. En el sotobosque se encuentran plántulas de especies arbóreas con alturas menores a 1.5 m, además de arbustos, herbáceas líquenes y briofitas (hepáticas, antoceros y musgos), rosetas y trepadoras, entre otras. Por tanto, el sotobosque contribuye significativamente a la complejidad, estructura y función de los ecosistemas forestales restaurados (Balandier *et al.*, 2022; Deng *et al.*, 2023; Landuyt *et al.*, 2019; Mejía-Canales *et al.*, 2018). No obstante, dicha influencia requiere de un proceso de cambio continuo, de tal manera que conforme se incrementa el tiempo de la restauración, la composición y estructura vegetal cambia (Rodríguez-Calcerrada *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2024). De acuerdo con Ma *et al.* (2024) la diversidad de arbustos y herbáceas en bosques secundarios es significativamente afectada por la edad de la restauración (1, 10, 30, 60 y 90 años), donde las áreas de 10 y 90 años se registraron los mayores valores, lo cual está asociado a diversos factores tanto bióticos como abióticos de los sitios.
De acuerdo con la Sociedad de Restauración Ecológica (Gann *et al.*, 2016) existen atributos que deben tomarse en consideración para determinar si un sitio restaurado contiene suficientes recursos bióticos y abióticos para continuar su desarrollo sin la intervención del hombre. Entre dichos atributos se encuentran: 1. estructura: donde se observen las diferentes edades, especies, tamaño de los individuos que forman una la comunidad, bosque o ecosistema; 2. presencia de especies nativas hasta donde sea posible; 3. presencia de grupos funcionales; y 4. presencia de poblaciones con capacidad reproductiva. Estos atributos pueden ser evaluados en cualquier ecosistema, mediante tres características principales: 1. estructura 2. diversidad (taxonómica y funcional) y 3. procesos ecológicos (Ruiz-Jaén & Aide, 2005). Aunado a lo anterior, se encuentra el uso de un ecosistema o bosque de referencia con el que se puedan comparar los atributos de la zona restaurada que se está evaluando (Gann *et al.*, 2016). Bajo este contexto, la diversidad del sotobosque ha sido utilizada como un indicador de la integridad de los ecosistemas (Zhang *et al.*, 2021), por lo que las metas en los trabajos de restauración deben incluir también la restauración de las especies del sotobosque, particularmente con especies nativas (Chen *et al.*, 2018).
En México como en otros lugares del mundo, una de las prácticas ampliamente utilizadas para la recuperación de los ecosistemas forestales han sido las reforestaciones (Derhé *et al.*, 2016) las cuales tratan de acelerar los procesos de sucesión natural a través de la modificación del microclima, además de otros beneficios. Lo anterior ha resultado en el reconocimiento de

la importancia de las reforestaciones en la recuperación de zonas deforestadas y degradadas, por lo que la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) llevó a cabo la restauración forestal a gran escala mediante la operación del Programa Nacional Forestal (PRONAFOR) durante el periodo 2013-2018 (Méndez-Toribio *et al.*, 2018). Sin embargo, la gran mayoría de las investigaciones han estado enfocadas a evaluar el "éxito" de las reforestaciones de las especies arbóreas, mientras que la dinámica de las comunidades vegetales del sotobosque ha recibido muy poca atención (Duan *et al.*, 2019; Deng *et al.*, 2013). En México las reforestaciones se han considerado exitosas por el hecho de presentar una alta supervivencia de las especies plantadas. Sin embargo, la información es insuficiente cuando se pretende considerar que un ecosistema ha recuperado sus procesos y funciones, dado que es importante considerar la composición, riqueza, abundancia y diversidad, entre otros parámetros de las especies presentes en el sotobosque de los ecosistemas restaurados. Por tanto, la hipótesis de este trabajo fue que, a mayor edad de la reforestación, esta presentará menor diversidad vegetal en el sotobosque, dado que se asemejaría cada vez más a un Bosque de Referencia (BR). Para probar lo anterior, el objetivo del presente estudio fue comparar la riqueza, la diversidad, y composición de especies del sotobosque (arbustos y herbáceas) en dos zonas reforestadas con *Pinus montezumae* Lamb. de diferentes edades, una zona sin reforestar referida posteriormente como zona degradada y un bosque de referencia en el noreste del estado de Puebla. Lo anterior, bajo la expectativa de que este trabajo sirva para demostrar la importancia de considerar al sotobosque en los programas, evaluaciones e iniciativas de recuperación de áreas degradadas y deforestadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en el ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, municipio de Xiutetelco, al noreste del estado de Puebla (19°38'19.40" N -97°24'8.71" O y 19°45'12.72" N -97°22'3.77" O) (INEGI, 2021), con una elevación entre 2,500 y 3,000 m (Figura 1).

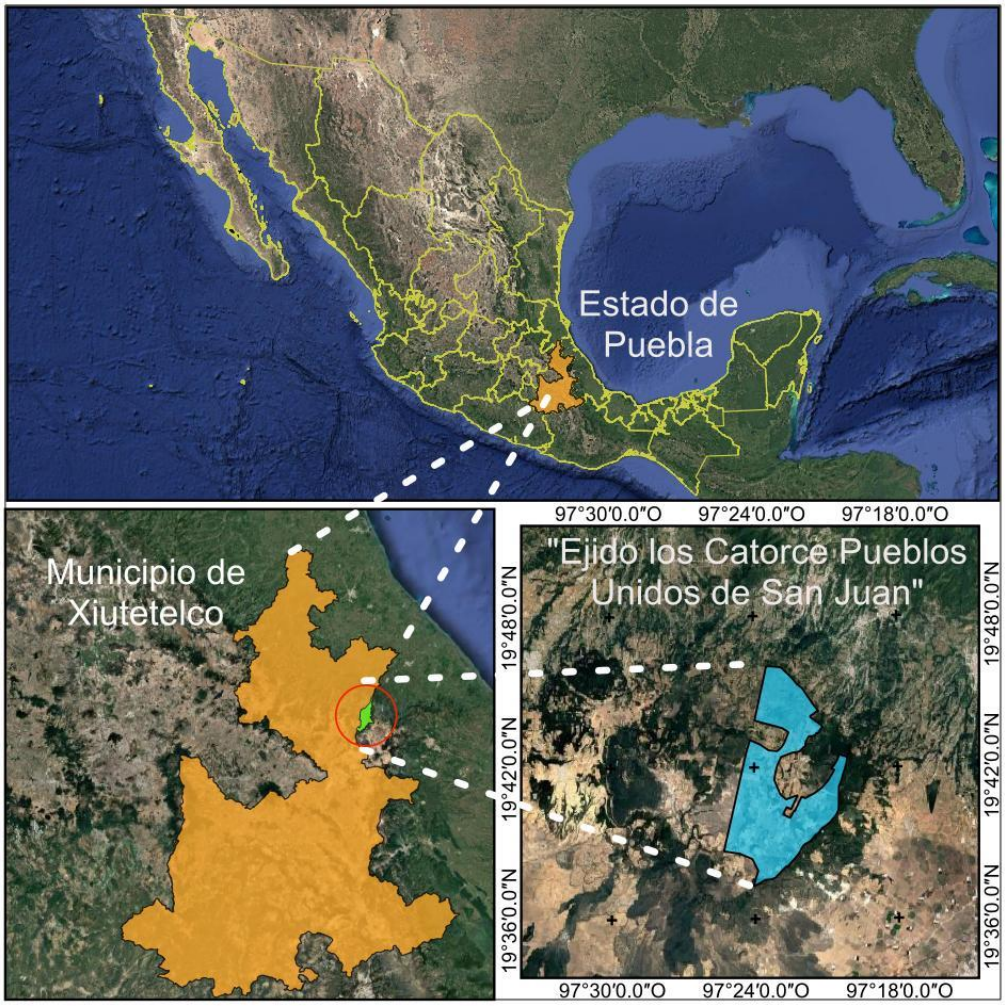


Figura 1. Ubicación geográfica del ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.
Figure 1. Geographical location of the ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.

El clima predominante es templado-subhúmedo, la temperatura media anual entre 12-18 °C y la precipitación promedio de 650-850 mm por año (García, 2004). Los suelos dominantes son Regosol éutrico y Andosol ócrico (INEGI, 2020). La vegetación original predominante es bosques mixtos de coníferas y latifoliadas, como *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl., *P. montezumae* Lamb., *P. patula* Schiede ex Schltdl. *et* Cham. y *Alnus jorullensis* Kunth.

También existen diversas zonas de transición de matorral xerófilo, con diversas especies de pastos y especies arbóreas de bajo porte, típicas de clima semiárido (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), 2023).

Para llevar a cabo este estudio, se seleccionaron cuatro zonas con condiciones abióticas y fisiográficas similares (exposición, pendiente y altitud). Dos zonas reforestadas con *P. montezumae* de 5 y 9 años (ZR5 y ZR9), un bosque de referencia de *P. montezumae* Lamb. y *P. teocote* Schiede ex Schltdl. (BR), área arbolada (remanente del bosque natural con cierto grado de perturbación) y una zona degradada (ZD), considerada como el testigo (t0), previa a la reforestación (Figura 2).

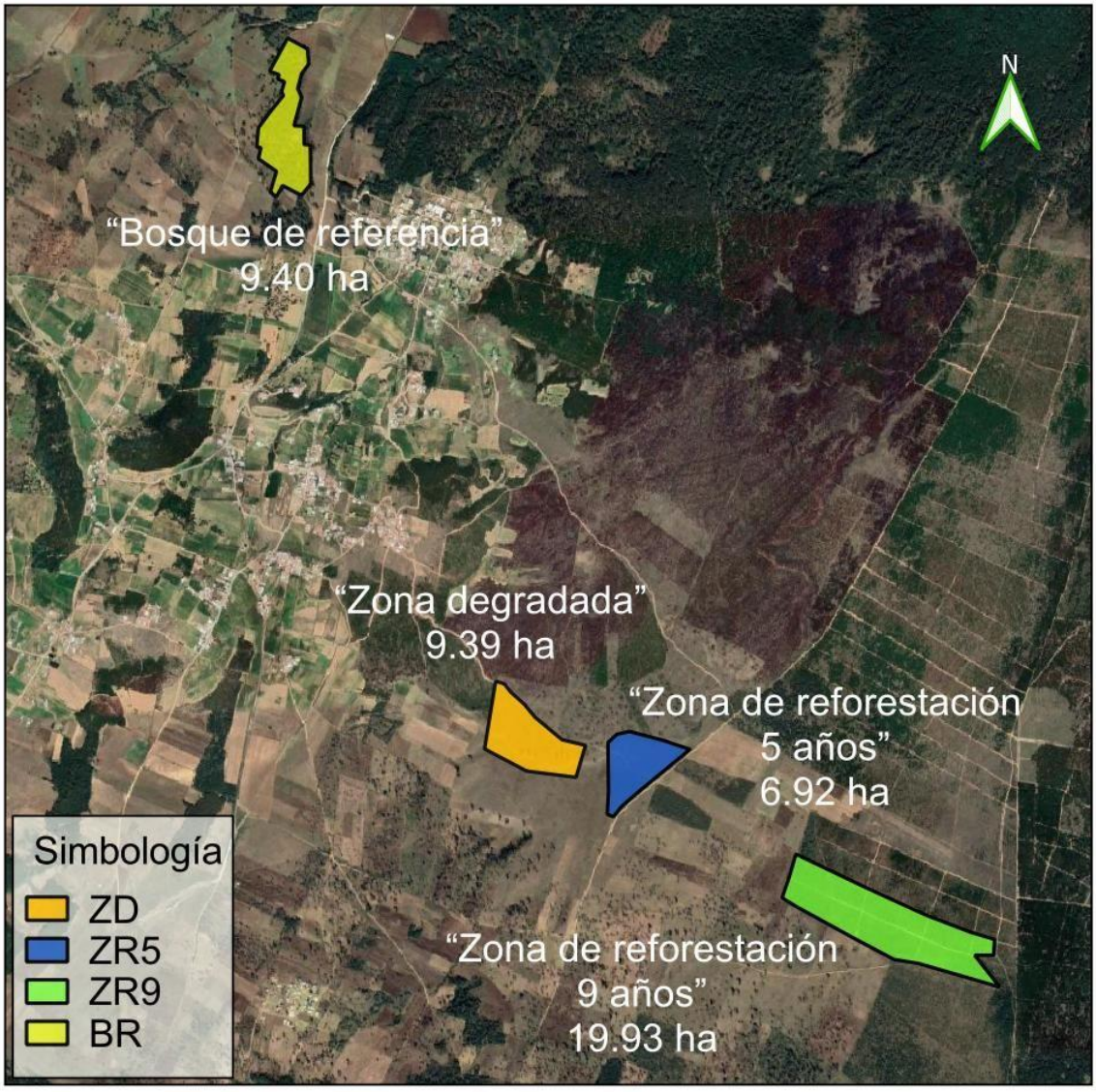


Figura 2. Ubicación de las cuatro zonas de estudio en el ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla: degradada (ZD), dos reforestaciones con *Pinus montezumae* (ZR5 y ZR9) y un bosque de referencia (BR).
Figure 2. Location of the four study areas in the ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla: degraded (ZD), two reforestations with *Pinus montezumae* (RZ5 and RZ9) and a reference forest (BR).

Diversidad del sotobosque

Mediante un muestreo aleatorio se seleccionaron cinco sitios circulares de 100 m^2 por zona (Figura 3) utilizando una malla de puntos (cada 100 m). Dentro de los sitios de 100 m^2 se establecieron cuatro sub-sitios de 1 m^2, con la finalidad de evaluar las especies herbáceas del sotobosque.

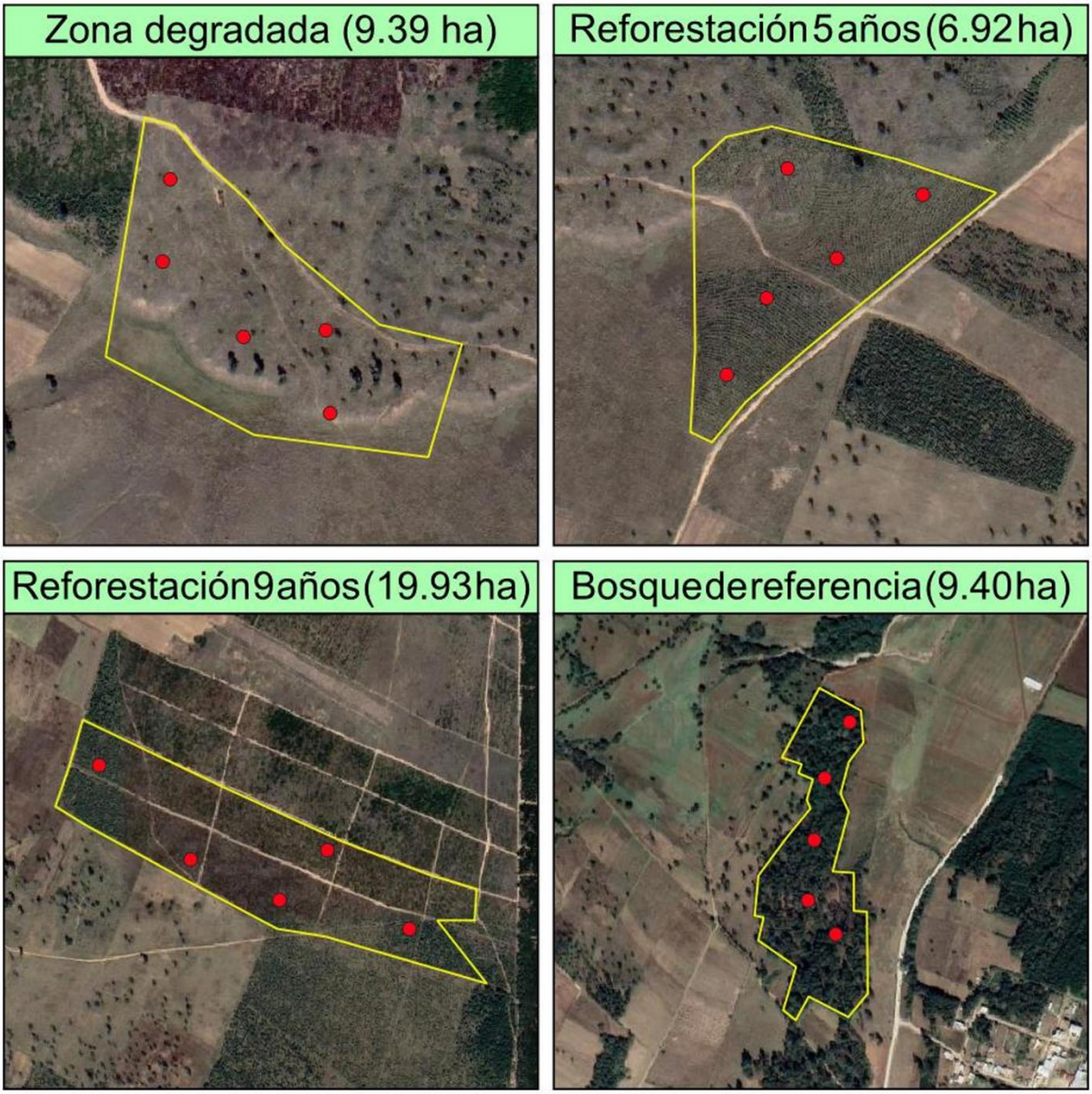


Figura 3. Distribución de los sitios de muestreo dentro de las zonas de estudio; zona degradada (ZD), dos reforestaciones con *Pinus montezumae* de 5 y 9 años (ZR5 y ZR9) y un bosque de referencia (BR), en el ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.
Figure 3. Distribution of sampling sites within study areas; degraded zone (ZD), two reforestations with *Pinus montezumae* of 5 and 9 years old (ZR5 and ZR9) and a reference forest (BR), in the ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.

En los sitios de 100 m^2 se identificaron *in situ* las especies arbustivas (plantas con crecimiento secundario leñoso y sin una definición del tallo principal) y se registró el número de individuos por especie (densidad) y diámetro de copa (cm), a partir de la cual se calculó la superficie de la copa (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008) para posteriormente transformarla en cobertura. En los cuatro subsitios de un m^2, se estimó la cobertura (%) de cada una de las especies herbáceas. Las especies no reconocidas en campo fueron llevadas al herbario

(CHAP) de la División de Ciencias Forestales, de la Universidad Autónoma Chapingo para su identificación.

Por otra parte, se generaron curvas área-especie utilizando el software EstimateS 9.1 (Moreno, 2001; Magurran, 2004; Ventura-Ríos *et al.*, 2017), para determinar la intensidad de muestreo del área total del estudio. Lo anterior indicó que en el área muestreada se capturó el 70% de la riqueza total del área de estudio. La diversidad alfa se determinó como el número de especies (riqueza total) dentro de cada zona estudiada, además de determinar la diversidad utilizando los índices de Margalef, de Simpson y el de equidad (Moreno, 2021).

Para determinar la diversidad beta (β; es decir la similitud florística entre las zonas de estudio), se utilizó el índice de Jaccard (Moreno, 2001; Koleff, 2005). Este se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$I_j = \frac{c}{a + b - c}$$

Donde:
Ij = Índice de semejanza florística de Jaccard
a = Número de especies que se encuentran en la comunidad a
b = Número de especies que se encuentran en la comunidad b
c= Número de especies presentes en ambas comunidades a y b

El Índice de Valor de Importancia Relativo (IVIR) se calculó para las especies del sotobosque (herbáceas y arbustivas) a partir de la dominancia (cobertura) y frecuencia relativa (Mostacedo & Fredericksen, 2000)(Alday *et al.*, 2012).

$$\text{IVIR} = \frac{\text{Dominancia relativa} + \text{Frecuencia relativa}}{2} * 100$$

Donde:

$$\text{Dominancia absoluta} = \frac{\text{Cobertura de una especie}}{\text{Área muestreada}}$$

$$\text{Dominancia relativa} = \frac{\text{Dominancia absoluta por especie}}{\text{Dominancia absoluta de todas las especies}} * 100$$

La *frecuencia relativa* se estimó de la siguiente manera:

$$\text{Frecuencia absoluta} = \frac{\text{Núm. de sitios donde se presenta la especie}}{\text{Número total de sitios muestreados}}$$

Donde:

$$\text{Frecuencia relativa} = \frac{\text{Frecuencia absoluta de cada especie}}{\text{Frecuencia absoluta de todas las especies}} * 100$$

Análisis estadístico

Para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre las zonas de estudio en las variables de la diversidad vegetal, se verificó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk. Dado que en todos los casos se cumplió con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor, con un nivel de confianza del 95%, seguido de una prueba de comparación de medias de Tukey (α=0.05), utilizando el software R en la plataforma R Studio (The R Core Team, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Riqueza y composición vegetal.

La riqueza específica total en el área muestreada arrojó 41 especies en el sotobosque entre arbustos y herbáceas, las cuales se distribuyeron en 17 familias. El 80% de las especies encontradas (33) fueron nativas y un 20% (8) exóticas (CONABIO, 2023) (Apéndice 1). Respecto a la riqueza total dentro de las zonas de estudio, se presentó el siguiente orden decreciente: ZR5>ZD>ZR9>BR (Tabla 1). No obstante, entre ZR5 y ZD la riqueza total no fue significativamente diferente), pero sí de estas al compararlas con ZR9 y BR ($\alpha \leq 0.05$) (Tabla 1), así como entre estas dos últimas.

Tabla 1. Número de especies y comparación de medias (entre paréntesis) por forma de vida entre las cuatro zonas de estudio: una zona degradada (ZD), en dos reforestaciones (ZR5 y ZR9) y un bosque de referencia (BR), en el ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.

Table 1. Number of species and comparison of means (in parentheses) by life form between the four study areas: a degraded zone (ZD), in two reforestations (ZR5 and ZR9) and a reference forest (BR), in the ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla

Forma de vida	ZD		ZR5		ZR9		BR	
Herbáceas	32	$(21.8)^a$	31	$(22.0)^a$	24	$(14.4)^b$	17	$(9.0)^c$
Arbustos	0	$(0)^b$	2	$(2.0)^a$	2	$(2.0)^a$	2	$(2.0)^a$
Riqueza Total	32	$(21.8)^a$	33	$(24)^a$	26	$(16.4)^b$	19	$(11.0)^c$

ZD: zona degradada, ZR5: zona con 5 años de haber sido reforestada, ZR9: zona con 9 año de haber sido reforestada, y BR: bosque de referencia. Comparación entre zonas de estudio para una misma forma de vida. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre zonas para cada forma de vida ($\alpha = 0.05$).

ZD: degraded zone, RZ5: zone that has been reforested for 5 years, RZ9: zone that has been reforested for 9 years, and BR: reference forest. Comparison between study zones for the same life form. Different letters indicate significant statistical differences ($\alpha \leq 0.05$), between zones for the life form.

En el sotobosque las especies herbáceas fueron las más abundantes en todas las zonas estudiadas (Tabla 1), con un mayor número de especies. No obstante, destaca que el BR fue el que presentó una menor riqueza total de especies herbáceas (17 especies). Respecto a los arbustos, estos presentaron 0 especies en la ZD, significativamente menor a ZR5=ZR9=BR. Si bien no hay un patrón en cuanto al incremento de la riqueza de especies conforme se incrementa la edad de los rodales analizados en este estudio, resalta el hecho de que ZD y ZR5 no presentan diferencias estadísticas significativas en riqueza, mientras que ZR9 se diferencia de dichas zonas, así como de BR.

De acuerdo con Ma *et al.* (2024) la disponibilidad de luz afecta directamente a las especies herbáceas, particularmente a las perennes, por lo que tanto la diversidad de arbustos perennes y herbáceas fue significativamente afectada por la edad de la restauración. Dichos autores señalaron que los valores mayores en diversidad específica se presentaron en las áreas de 10 y 90 años, comparado con los menores valores encontrados a los 60 años. Así en nuestro estudio, el BR como se esperaba, presentó la menor riqueza de especies en el sotobosque, posiblemente por la entrada menor de luz por efecto de la cobertura del dosel arbóreo. En varios estudios se ha demostrado que el dosel superior tiene un efecto sobre la composición del sotobosque (Chen *et al.*, 2018), debido a que este modifica el ambiente lumínico en el interior del bosque por la reducción en la trasmisión de hacia la parte baja. Este se considerada una de las principales fuerzas que determinan la abundancia de especies en el sotobosque, ya que la menor entrada de luz modifica las condiciones ambientales, disminuye la temperatura y aumenta la humedad en el piso forestal, lo que a su vez modifica la química del matillo y suelo superficial (Ou *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2020).

La similitud entre ZR5 y ZD en cuanto a la mayor riqueza de especies herbáceas es apoyado por los resultados de Poudel *et al.* (2019), quienes encontraron que en los rodales más jóvenes se presenta una mayor diversidad de especies herbáceas y que la edad del rodal tiene un efecto en la composición, la diversidad y la abundancia de las especies en el sotobosque. Por otro lado, la presión antrópica (e.g., fuego, pastoreo, tala no regulada) puede modificar drásticamente la compleja relación entre los factores abióticos y bióticos. Por ejemplo, el microclima se ve modificado al aumentar la radiación solar y disminuir la disponibilidad de agua en el suelo (Kutnar *et al.*, 2019; Ou *et al.*, 2020; Shen *et al.*, 2020) lo que se puede observar en ZD y ZR5. Bajo estas condiciones las especies pioneras contribuyen al aumento de la riqueza específica (Gotelli, 2008; Ares *et al.*, 2010), aunque estas especies no persisten de manera indefinida. La presencia de las especies pioneras tiene efectos positivos tanto en la estabilización del suelo (e.g., gramíneas amacolladas) como en la aportación de sombra. Adicionalmente, cuando estas especies mueren y se incorporan al mantillo, durante el proceso de descomposición aportan nutrimentos al suelo a una mayor velocidad que otro tipo de especies, favoreciendo la presencia de nuevas especies en el proceso de sucesión. Las especies pioneras son remplazadas por especies tolerantes a la sombra a medida que el dosel superior se va cerrando (Poudel *et al.*, 2019). Bajo este contexto, en el área de estudio, la perturbación por actividades humanas (principalmente pastoreo) de poblados aledaños puede explicar parcialmente la menor riqueza encontrada en el BR (Kutnar *et al.*, 2019; Granados-Victorino *et al.*, 2015; Luna-Bautista *et al.*, 2015).

La riqueza y diversidad del sotobosque, son los componentes más importantes de la diversidad vegetal en los estratos de un bosque, contribuyendo a diferentes funciones en el ecosistema (Quijada *et al.*, 2020; Mejía-Canales *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2018). A pesar de que las especies herbáceas representan únicamente el 1% de la biomasa de los bosques, estas contribuyen en más de un 20% al matillo foliar del piso forestal, el cual destaca por su importancia en la incorporación de nutrimentos que puede ser mucho más alta que la que proporcionan los árboles (Gillam, 2007). En este estudio, ZD y ZR5 presentan condiciones y características similares en relación con la cantidad de luz, suelos pobres en nutrimentos y poca humedad, pudiendo generar ambientes que promueven la dominancia de especies pioneras (Cabrera-Luna & Gómez-Sánchez, 2005).

En cuanto a las familias registradas en todo el sotobosque se encontró que las de mayor número de especies fueron la Asteraceae (13), Poaceae (5), Fabaceae (3) y Lamiaceae (3), las cuales son características de regiones montañosas, áridas y semiáridas de México, concordando con lo reportado por Pompa-Castillo *et al.* (2021), en una zona montañosa similar a la del presente estudio. Por tanto, conocer con mayor detalle las interacciones entre los diferentes factores bióticos y abióticos de un sitio, permitirá tomar mejores decisiones para su recuperación.

Diversidad alfa y beta del sotobosque

El índice de diversidad de Margalef mostró diferencias estadísticas significativas ($\alpha = 0.05$) entre las zonas de estudio, donde el valor mayor se encontró en ZD (4.67) y ZR5 (4.26), es decir en la zona degradada y la plantación más joven y, el menor valor en el BR (2.42) (Tabla 2). La diversidad calculada con el índice de Simpson mostró diferencias estadísticas entre condiciones evaluadas, observándose mayor diversidad en ZR5 (0.90) y ZD (0.88) que coincide con el resultado observado con el índice de Margalef. La zona del BR (0.80) presentó un valor intermedio y ZR9, la condición que presentó la menor diversidad (0.78 (Tabla 2). Por tanto, se observó un patrón de disminución de la diversidad con el aumento de la edad del rodal. Al respecto, Morales-Salazar et al. (2012) sostienen que el aumento en la diversidad de especies está en función de la edad del bosque y de su estadio sucesional, además que la diversidad del sotobosque presenta una variación significativa a lo largo de gradientes bióticos y abióticos (Deng et al., 2023). Lo anterior, puede explicar parcialmente. lo observado en el presente estudio, donde el BR mostró la menor riqueza y diversidad de especies en el sotobosque (Tabla 1, 2).

Tabla 2. Índice de Margalef, índice de Simpson y equidad del sotobosque en las cuatro zonas de estudio en el ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.
Table 2. Margalef richness index, Simpson index, and understory equity, in the four study zones in the ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.

Zonas	Índice de Margalef	Índice de Simpson (1-*D*)	Equidad (1/D)/S
ZD	4.67 a	0.88 ab	0.39 ab
ZR5	4.26 a	0.90 a	0.45 ab
ZR9	3.16 b	0.78 c	0.30 b
BR	2.42 b	0.80 bc	0.47 a

Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas entre zonas para los índices de Margalef y Simpson y la equidad (α≤ 0.05). ZD: zona degradada, ZR5: zona reforestada de 5 años, ZR9: zona reforestada de 9años y BR: bosque de referencia.
Different letters indicate statistically significant differences between zones for the Margalef and Simpson indices and equity (α≤ 0.05). ZD: degraded area, RZ5: 5-year reforested area, RZ9: 9-year reforested area and RF: reference forest.

El índice de Simpson está influenciado por la abundancia de las especies dominantes (Magurran, 2004), lo cual es evidente en RZ9 por los valores de diversidad y equidad, atribuido principalmente a la especie dominante *Muhlenbergia macroura* (Kunth) Hitchc. (Tabla 2). La presencia, abundancia y dominancia de dicha especie en el área de estudio es destacable, y puede verse favorecida por los incendios, tala no regulada y pastoreo que se registran ahí. Sus atributos de ser una gramínea perenne y pionera que forma grandes macollos, además de su raíz fibrosa, le confieren resistencia y capacidad para permanecer en sitios expuestos a perturbaciones tanto naturales como antrópicas (Mejía-Saules, 1993). *Baccharis conferta* Kunth y *Senecio salignus* D.C. también registradas en la zona de estudio, son especies pioneras que aparecen y se desarrollan después de una perturbación (incendio, agricultura, tala no regulada y pastoreo) por lo que estas especies son importantes en la incorporación de materia orgánica al suelo y reciclaje de nutrimentos, así como provisión de refugios y alimento para fauna (Rendón-Pérez *et al.*, 2021).
En cuanto a la diversidad beta, ZR5 y ZR9 compartieron un 64% de especies y SD-ZR5 un 63%. Por el contrario, el BR presentó el menor porcentaje de especies compartidas con las demás zonas (Tabla 3). Chust *et al.* (2006) señalan que la diversidad beta se correlaciona con la distancia geográfica entre condiciones evaluadas, el clima (especialmente la precipitación) y la elevación; mientras que la pendiente y la geología del lugar registraron una correlación baja en un bosque tropical en Panamá. Si bien en este estudio no se analizó la correlación con variables ambientales, las observaciones en campo indican una mayor disponibilidad de luz en ZD, ZR5 y ZR9, que en BR. Para tener mayores evidencias es conveniente medir otros factores abióticos como podrían ser variables físico-químicas del suelo (textura, disponibilidad de nutrimentos, saturación de bases del suelo, CIC, etc.) con la finalidad de entender con mayor claridad el porqué de la similitud especifica de las zonas estudiadas como lo señalan Chust *et al.* (2006).

Tabla 3. Diversidad beta para el sotobosque de cuatro zonas de estudio: zona degradada (ZD), dos zonas reforestadas de 5 y 9 años (ZR5 y ZR9), y un bosque de referencia (BR), en el ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.
Table 3. Beta diversity of four study zones: degraded zone (ZD), two reforested zones of 5 and 9 years (ZR5 and ZR9), and a reference forest (BR), in the ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.

Zonas	ZD	ZR5	ZR9	BR
ZD	1.00	0.63	0.52	0.25
ZR5	0.63	1.00	0.64	0.24
ZR9	0.52	0.64	1.00	0.35

Zonas	ZD	ZR5	ZR9	BR
BR	0.25	0.24	0.35	1.00

Índice de valor de importancia relativa

Los resultados del IVIR mostraron que, en todo el sotobosque *M. macroura* fue la especie más importante ecológicamente, con 13.34, 7.68 y 21.39% en las zonas, ZD, ZR5 y ZR9, respectivamente. El BR se diferenció por ser *P. virescens* la especie que registró el mayor valor de IVIR (14.40%). En todas las condiciones *M. macroura* estuvo presente, aunque en el BR pasó a un tercer lugar, con un IVIR de 10.75%. El resto de las especies presentes por zona tiene valores de IVIR relativamente bajos si se comparan con los valores de *M. macroura* y *P. virescens* (Tabla 4).

La composición de especies del sotobosque está regulada por la presencia de un dosel superior que determina la entrada de luz (cantidad y calidad) y por tanto su disponibilidad para favorecer a las especies demandantes de luz en el proceso de germinación y ocupación del sitio (Rendón-Pérez *et al.*, 2021). Lo anterior, parece ser el caso de *M. macroura* que estuvo presente en las cuatro zonas de estudio, notándose los mayores valores en SD, ZR5, y ZR9 (Tabla 4), donde no existe un dosel cerrado que impida la entrada de luz. En cambio, en el BR la cobertura del dosel es mayor comparado con el dosel de las reforestaciones, por lo que el ingreso de luz es menor, a su vez puede haber mayor humedad y nutrimentos en el suelo, lo que favorece la presencia de otras especies en el sotobosque y que se ve reflejado en los menores valores del índice de Jaccard al compararse con las demás zonas (Tabla 3). *Muhlenbergia macroura* tiene una distribución natural en ecosistemas de praderas alpinas y subalpinas (zacatonales) en el Eje Neovolcánico Transversal en bosques de pino, encino, encino-pino y oyamel y en altitudes que van de los 1800 a 4000 m (Mejía-Saules, 1993), condiciones que concuerdan con el área del presente estudio.

Tabla 4. Índice de valor de importancia relativa (IVIR) del sotobosque, en una zona degradada (ZD), en reforestaciones con *P. montezumae* de 5 y 9 años (ZR5 y ZR9), y un bosque de referencia (BR) en el ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.

Table 4. Relative Importance Value Index (IVIR) of the understory, in a degraded zone (ZD), in reforestations of 5 and 9 years with *P. montezumae* (ZR5 and ZR9), and a reference forest (BR) in the ejido Los Catorce Pueblos Unidos de San Juan, Puebla.

Especies	Dominancia absoluta (%)	Dominancia relativa	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	IVI al 100 %
ZD					
Muhlenbergia macroura (Kunth) Hitchc	147	22.10	5	4.59	13.34
Piptochaetium virescens (Kunth) Parod	76	11.39	4	3.67	7.53
Eryngium carlinae F. Delaroche	63	9.54	5	4.59	7.06
Plantago nivea Kunth	61	9.20	5	4.59	6.89
Arenaria lycopodioides Willd. ex Schltdl.	54	8.14	5	4.59	6.37
Trifolium repens L.	31	4.60	5	4.59	4.59
Rumex acetosella L.	29	4.30	5	4.59	4.44
Viola hookeriana H.B.K	25	3.70	5	4.59	4.14
Pseudognaphalium roseum (Kunth) Anderb.	24	3.58	5	4.59	4.08
Euphorbia terracina L.	18	2.68	5	4.59	3.63
Geranium lilacium Kunth	14	2.11	5	4.59	3.35
Bidens triplinervia Kunth	13	2.00	5	4.59	3.29
Erigeron longipes DC.	23	3.39	3	2.75	3.07
Salvia lavanduloides Kunth	10	1.43	5	4.59	3.01
Oxalis corniculata L.	9	1.28	5	4.59	2.93
Arenaria reptans Hemsl.	8	1.21	5	4.59	2.90

Especies	Dominancia absoluta (%)	Dominancia relativa	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	IVI al 100 %
Hypericum silenoides Juss.	7	1.02	5	4.59	2.80
Ammi majus L.	9	1.32	4	3.67	2.49
Sibthorpia repens (Mutis ex L.) Kuntze	14	2.07	2	1.83	1.95
Taraxacum officinale G. H. Weber ex Wigg.	5	0.75	3	2.75	1.75
Festuca elatior L.	5	0.75	2	1.83	1.29
Oxalis alpina (Rose) Rose ex R. Knuth	5	0.75	2	1.83	1.29
Erigeron sp.	4	0.57	2	1.83	1.20
Fragaria vesca L.	2	0.23	2	1.83	1.03
Conyza schiedeana (Less) Cronquist	1	0.19	2	1.83	1.01
Halenia brevicornis (Kunth) G. Don	1	0.08	2	1.83	0.96
Circium rhaphilepis (Hemsl.) Petrak	4	0.57	1	0.92	0.74
Erigeron karvinskianus DC.	4	0.57	1	0.92	0.74
Bromus catharticus Vahl	1	0.19	1	0.92	0.55
Galium praetermissum Greenm	1	0.11	1	0.92	0.52
Potentilla candicans Bonpl	1	0.11	1	0.92	0.52
Astragalus coccineus (Parry) Brandegee	1	0.08	1	0.92	0.50
	663	**100**	**109**	**100**	**100**
ZR5					
Muhlenbergia macroura (Kunth) Hitchc	84	12.03	4	3.33	7.68
Astragalus lyonnetii Barneby	78	11.16	4	3.33	7.25
Bidens triplinervia Kunth	66	9.44	5	4.17	6.80
Piptochaetium virescens (Kunth) Parod	62	8.83	5	4.17	6.50
Arenaria lycopodioides Willd. ex Schltdl.	43	6.17	5	4.17	5.17
Heterotheca inuloides Cass.	40	5.74	5	4.17	4.96
Eryngium carlinae F. Delaroche	36	5.10	5	4.17	4.63
Erigeron karvinskianus DC.	28	3.98	5	4.17	4.08
Rumex acetosella L.	21	3.02	5	4.17	3.59
Erigeron sp.	24	3.37	4	3.33	3.35
Baccharis conferta Kunth	16	2.29	5	4.17	3.23
Erigeron longipes DC.	28	3.95	3	2.50	3.22
Senecio salignus DC.	14	2.08	5	4.17	3.12
Geranium lilacium Kunth	14	1.97	5	4.17	3.07
Astragalus coccineus (Parry) Brandegee	24	3.41	3	2.50	2.96
Hypericum silenoides Juss.	11	1.58	5	4.17	2.87
Trifolium repens L.	10	1.36	5	4.17	2.77
Viola hookeriana H.B.K	17	2.48	3	2.50	2.49
Pseudognaphalium roseum (Kunth) Anderb.	5	0.72	5	4.17	2.44
Plantago nivea Kunth	17	2.37	3	2.50	2.43
Potentilla candicans Bonpl	16	2.33	3	2.50	2.42
Euphorbia terracina L.	8	1.15	4	3.33	2.24
Oxalis corniculata L.	8	1.15	4	3.33	2.24
Festuca elatior L.	3	0.43	4	3.33	1.88
Ammi majus L.	5	0.65	3	2.50	1.57
Conyza schiedeana (Less) Cronquist	2	0.32	3	2.50	1.41
Salvia prunelloides Kunth	6	0.83	2	1.67	1.25
Oxalis alpina (Rose) Rose ex R. Knuth	4	0.54	2	1.67	1.10
Halenia brevicornis (Kunth) G. Don	2	0.25	2	1.67	0.96
Lepechinia schiedeana (Schltdl.) Vatke	8	1.08	1	0.83	0.96
Taraxacum officinale G. H. Weber ex Wigg.	1	0.11	1	0.83	0.47
Circium rhaphilepis (Hemsl.) Petrak	1	0.07	1	0.83	0.45
Arenaria reptans Hemsl.	0	0.04	1	0.83	0.43

Especies	Dominancia absoluta (%)	Dominancia relativa	Frecuencia absoluta	Frecuencia relativa	IVI al 100 %
	696	**100**	**120**	**100**	**100**
ZR9					
Muhlenbergia macroura (Kunth) Hitchc	253	36.68	5	6.10	21.39
Arenaria lycopodioides Willd. ex Schltdl.	76	11.08	5	6.10	8.59
Rumex acetosella L.	67	9.73	5	6.10	7.92
Piptochaetium virescens (Kunth) Parod	39	5.67	5	6.10	5.88
Oxalis corniculata L.	37	5.30	5	6.10	5.70
Astragalus lyonnetii Barneby	43	6.21	4	4.88	5.54
Potentilla candicans Bonpl	46	6.72	2	2.44	4.58
Oxalis alpina (Rose) Rose ex R. Knuth	26	3.78	4	4.88	4.33
Baccharis conferta Kunth	8	1.18	5	6.10	3.64
Senecio salignus DC.	8	1.18	5	6.10	3.64
Erigeron karvinskianus DC.	15	2.11	4	4.88	3.49
Bidens triplinervia Kunth	13	1.85	4	4.88	3.37
Heterotheca inuloides Cass.	11	1.60	4	4.88	3.24
Astragalus coccineus (Parry) Brandegee	17	2.40	3	3.66	3.03
Trifolium repens L.	5	0.65	4	4.88	2.77
Ammi majus L.	4	0.51	3	3.66	2.08
Festuca elatior L.	2	0.22	3	3.66	1.94
Erigeron sp.	7	0.94	2	2.44	1.69
Geranium lilacium Kunth	3	0.44	2	2.44	1.44
Eryngium carlinae F. Delaroche	2	0.22	2	2.44	1.33
Fragaria vesca L.	4	0.54	1	1.22	0.88
Galium praetermissum Greenm	3	0.36	1	1.22	0.79
Plantago nivea Kunth	3	0.36	1	1.22	0.79
Circium rhaphilepis (Hemsl.) Petrak	1	0.18	1	1.22	0.70
Bromus catharticus Vahl	0	0.04	1	1.22	0.63
Hypericum silenoides Juss.	0	0.04	1	1.22	0.63
	688	**100**	**82**	**100**	**100**
BR					
Piptochaetium virescens (Kunth) Parod	64	19.70	5	9.09	**14.40**
Geranium lilacium Kunth	61	18.85	3	5.45	12.15
Muhlenbergia macroura (Kunth) Hitchc	46	14.24	4	7.27	10.75
Fleischmannia pycnocephala (Less.) R.M. King & Rob.	32	9.93	5	9.09	9.51
Baccharis conferta Kunth	20	6.18	5	9.09	7.64
Lepechinia schiedeanaa (Schltdl.) Vatke	20	6.16	4	7.27	6.71
Aegopogon cenchroides Humb. & Bonpl. ex Willd	29	8.93	2	3.64	6.28
Senecio salignus DC.	8	2.55	5	9.09	5.82
Fragaria vesca L.	9	2.77	4	7.27	5.02
Bidens triplinervia Kunth	13	3.85	2	3.64	3.74
Bromus catharticus Vahl	2	0.46	3	5.45	2.96
Roldana lineolata (DC.) H. Rob & Brettell	7	2.08	2	3.64	2.86
Galium praetermissum Greenm	3	1.00	2	3.64	2.32
Oxalis alpina Rose ex R. Knuth	1	0.31	2	3.64	1.97
Rumex acetosella L.	6	1.69	1	1.82	1.76
Ammi majus L.	0	0.08	1	1.82	0.95
Trifolium repens L.	0	0.08	1	1.82	0.95
Viola hookeriana H.B.K	0	0.08	1	1.82	0.95
	325	**100**	**55**	**100**	**100**

CONCLUSIONES

El sotobosque es un componente importante en la riqueza y diversidad en las reforestaciones, particularmente las especies herbáceas. Los resultados, en general, corroboran la hipótesis planteada, ya que el sotobosque fue menos diverso a medida que la edad de las reforestaciones aumentó; aunque en términos de composición esto no sucedió, ya que el BR fue el que menos similitud presentó con las demás condiciones (ZD, ZR5 y ZR9). La especie *Muhlenbergia macroura* representó el mayor IVIR dentro del sotobosque, lo que la cataloga con un valor de importancia estructural alto en las reforestaciones evaluadas.

Es importante dar seguimiento a estas reforestaciones, llevando a cabo evaluaciones a corto, mediano y largo plazo para obtener un panorama más amplio sobre los cambios de distintos atributos, funciones y procesos. Los resultados indican que el identificar los cambios que ocurren en la composición y diversidad del sotobosque a medida que la estructura horizontal de las reforestaciones cambia, puede ser un referente para determinar si las prácticas implementadas están contribuyendo a la recuperación de una zona o ecosistema degradado. La reforestación como estrategia para la recuperación del ecosistema parece estar funcionando en el área de estudio, sin embargo, se necesita continuar con las observaciones tanto de la composición de especies del sotobosque como de otros procesos ecológicos.

LITERATURA CITADA

Alday, J. G., Martínez, C., & Bravo F. (2012). Regeneración natural y conservación de la diversidad vegetal en masas de *Pinus pinaster* Ait. In G. M. Francisco Javier Gordo, Rafael Calama, Marta Pardo, Francisco Bravo (Ed.), *La problemática de la regeneración natural de los pinares en los arenales de la Meseta Castellana* (pp. 219–237). https://pfcyl.es/sites/default/files/biblioteca/documentos/regeneracion_pinares.pdf

Ares, A., Neill, A. R., & Puettmann, K. J. (2010). Understory abundance, species diversity and functional attribute response to thinning in coniferous stands. *Forest Ecology and Management*, *260*(7), 1104–1113. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.06.023

Balandier, P., Gobin, R., Prévosto, B., & Korboulewsky, N. (2022). The contribution of understorey vegetation to ecosystem evapotranspiration in boreal and temperate forests: a literature review and analysis. *European Journal of Forest Research*, *141*(6), 979–997. https://doi.org/10.1007/s10342-022-01505-0

Bhutia, Y., Gudasalamani, R., Ganesan, R., & Saha, S. (2019). Assessing forest structure and composition along the altitudinal gradient in the state of Sikkim, Eastern Himalayas, India. *Forests*, *10*(8). https://doi.org/10.3390/f10080633

Cabrera-Luna, J. A., & Gómez-Sánchez, M. (2005). Análisis Florístico de la Cañada, Querétaro, México. *Botanical Sciences*, *77*, 35–50. https://doi.org/10.17129/botsci.1711

Chen, H. Y. H., Biswas, S. R., Sobey, T. M., Brassard, B. W., & Bartels, S. F. (2018). Reclamation strategies for mined forest soils and overstorey drive understorey vegetation. *Journal of Applied Ecology*, *55*(2), 926–936. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13018

Chust, G., Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Lao, S., & Pérez, R. (2006). Determinants and spatial modeling of tree β-diversity in a tropical forest landscape in Panama. *Journal of Vegetation Science*, *17*(1), 83–92. https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2006.tb02426.x

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2023). *Flora y Fauna de México*. https://www.biodiversidad.gob.mx/

Deng, J., Fang, S., Fang, X., Jin, Y., Kuang, Y., Lin, F., Liu, J., Ma, J., Nie, Y., Ouyang, S., Ren, J., Tie, L., Tang, S., Tan, X., Wang, X., Fan, Z., Wang, Q. W., Wang, H., & Liu, C. (2023). Forest understory vegetation study: current status and future trends. *Forestry Research*, *2023*(3–6). https://doi.org/10.48130/FR-2023-0006

Derhé, M. A., Murphy, H., Monteith, G., & Menéndez, R. (2016). Measuring the success of reforestation for restoring biodiversity and ecosystem functioning. *Journal of Applied Ecology*, *53*(6), 1714–1724. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12728

Duan, M., House, J., & Chang, S. X. (2019). Understory plant communities vary with tree productivity in two reclaimed boreal upland forest types in Canada. *Forest Ecology and Management*, *453* (February), 117577. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117577

Fremout, T., Thomas, E., Taedoumg, H., Briers, S., Gutiérrez-Miranda, C. E., Alcázar-Caicedo, C., Lindau, A., Mounmemi Kpoumie, H., Vinceti, B., Kettle, C., Ekué, M., Atkinson, R., Jalonen, R., Gaisberger, H., Elliott, S., Brechbühler, E., Ceccarelli, V., Krishnan, S., Vacik, H., … Muys, B. (2022). Diversity for Restoration (D4R): Guiding the selection of tree species and seed sources for climate-resilient restoration of tropical forest landscapes. *Journal of Applied Ecology*, *59*(3), 664–679. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14079

Gann, G. D., Mcdonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decleer, K., & Dixon, K. W. (2016). *Principios y Estándares Internacionales para la Práctica de la Restauración Ecológica*. www.SER.org

García, E. (2004). *Modificación al Sistema de Clasificicación Climática de Koppen* (Quinta). Universidad Autónoma de México, Instituto de Geografía. http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1

Gillam, F. S. (2007). The Ecological Significance of the Herbaceous Layer in Temperate Forest Ecosystems. *BioScience*, *57*(10), 846–858. https://academic.oup.com/bioscience/article/57/10/845/232416

Gotelli, N. J. (2008). *A Primer of Ecology* (4th ed.). Sinauer Associated.

Granados-Victorino, R. L., Granados-Sánchez, D., & Sánchez-González, A. (2015). Caracterización y ordenación de los bosques de pino piñonero (*Pinus cembroides* subsp. *orizabensis*) de la Cuenca Oriental (Puebla, Tlaxcala y Veracruz). *Madera y Bosques*, *21*(2), 23–42.

Huang, C., Zhou, Z., Peng, C., Teng, M., & Wang, P. (2019). How is biodiversity changing in response to ecological restoration in terrestrial ecosystems? A meta-analysis in China. *Science of The Total Environment*, *650*(1), 1–9.

INEGI. (2021). *Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2020*.

Koleff, P. (2005). Conceptos y medidas de la Diversidad Beta. In G. Halffter, J. Soberón, P. Koleff, & A. Melic (Eds.), *Sobre Diversidad Biológica: El significado de las Diversidades alfa, beta y gamma* (Vol. 4, pp. 19–40). m 3 m M o n o g r a f í a s 3ercer Milenio. http://entomologia.rediris.es/sea

Kutnar, L., Nagel, T. A., & Kermavnar, J. (2019). Effects of disturbance on understory vegetation across slovenian forest ecosystems. *Forests*, *10*(11), 1–16. https://doi.org/10.3390/F10111048

Landuyt, D., De Lombaerde, E., Perring, M. P., Hertzog, L. R., Ampoorter, E., Maes, S. L., De Frenne, P., Ma, S., Proesmans, W., Blondeel, H., Sercu, B. K., Wang, B., Wasof, S., & Verheyen, K. (2019). The functional role of temperate forest understorey vegetation in a changing world. *Global Change Biology*, *25*(11), 3625–3641. https://doi.org/10.1111/gcb.14756

Luna-Bautista, L., Hernández De La Rosa, P., Velázquez-Martínez, A., Gómez-Guerrero, A., & Acosta-Mireles, M. (2015). El sotobosque en la composición y diversidad de áreas bajo manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, *21*(1), 109–121. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.08.037

Ma, Y., Xu, F., Wei, J., Wang, W., Wu, Z., Xu, D., Haider, F. U., Li, X., & Dong, Y. (2024). Ecological Restoration Increases the Diversity of Understory Vegetation in Secondary Forests: An Evidence from 90 Years of Forest Closures. *Forests*, *15*(9), 1–14. https://doi.org/10.3390/f15091642

Magurran, A. (2004). *Measuring Biologcial Diversity* (First). Blackwell Publishing.

Mejía-Canales, A. M., Franco-Maass, S., Endara-Agramont, A. R., & Akerberg, V. Á.

(2018). Characterization of the understory in dense pine and fir forests of the Nevado de Toluca. *Madera y Bosques*, *24*(3). https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431656

Mejía-Saules, M. T. (1993). Uso de *Muhlenbergia macroura* (Poaceae: Eragrostideae) en la región de Perote, Veracruz, México. *Boletín de La Sociedad Botánicade México*, *53*, 141–147. https://doi.org/10.17129/botsci.1422

Méndez-Toribio, M., Martínez-Garza, C., Ceccon, E., & Guariguata, M. R. (2018). *La restauración de ecosistemas terrestres en México Estado Actual, Necesidades y Oportunidades* (First). Center for International Forestry Research (CIFOR). https://doi.org/10.17528/cifor/006853

Mestre, L., Toro-Manríquez, M., Soler, R., Huertas-Herrera, A., Martínez-Pastur, G., & Lencinas, M. V. (2017). The influence of canopy-layer composition on understory plant diversity in southern temperate forests. *Forest Ecosystems*, *4*(1). https://doi.org/10.1186/s40663-017-0093-z

Morales-Salazar, M., Vílchez-Alvarado, B., Chazdon, R. L., Ortega-Gutiérrez, M., Ortiz-Malavassi, E., & Guevara-Bonilla, M. (2012). Diversidad y estructura horizontal en los bosques tropicales del Corredor Biológico de Osa, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, *9*(23), 19–28.

Moreno, C. E. (2001). *Métodos para Medir la Biodiversidad* (CYTED, ORCYT-UNESCO, & Sociedad Entomológica Aragonesa (eds.); Primera). M&T-Manuales y Tesis SEA. http://entomologia.rediris.es/sea

Mostacedo, B., & Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Proyecto de Manejo Forestal Sostenible (BOLFOR).

Ou, Z., Pang, S., He, Q., Peng, Y., Huang, X., & Shen, W. (2020). Effects of vegetation restoration and environmental factors on understory vascular plants in a typical karst ecosystem in southern China. *Scientific Reports*, *10*(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-68785-7

Poudel, D. R., Chen, H. Y. H., Mohan, K. C., Ge, Z., Bown, H. E., & Ruan, H. (2019). Understory vegetation dynamics across a poplar plantation chronosequence in reclaimed coastal saline soil. *Forests*, *10*(9), 1–14. https://doi.org/10.3390/f10090764

Quijada, G. E. M., Balderas, J. M. M., Garza, E. J. T., Calderón, Ó. A. A., Rodríguez, E. A., & Yamallel, J. I. Y. (2020). Diversity, structure and floristic composition of temperate forests of southern Nuevo León state. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *11*(61). https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i61.703

Recibido:
27/septiembre/2024

Aceptado:
6/junio/2025

Rendón-Pérez, M. A., Hernández-De la Rosa, P., Velázquez-Martínez, A., Alcántara-Carbajal, J. L., & Reyes-Hernández, V. J. (2021). Composition, diversity, and structure of a managed forest in central mexico. *Madera y Bosques*, *27*(1). https://doi.org/10.21829/myb.2021.2712127

Rodríguez-Calcerrada, J., Cano, F. J., Valbuena-Carabaña, M., Gil, L., & Aranda, I. (2010). Functional performance of oak seedlings naturally regenerated across microhabitats of distinct overstorey canopy closure. *New Forests*, *39*(2), 245–259. https://doi.org/10.1007/s11056-009-9168-1

Rodríguez-Laguna, R., Valencia-Manzo, S., Meza-Rangel, J., Capó-Arteaga, M. A., & Reynoso- Pérez, A. (2008). Crecimiento y caracteríasticas de la copa de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Galeana, Nuevo León. *Revista de Fitotecnia Mexicana*, *31*(1), 19–26. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61031103%0ACómo

Ruiz-Jaén, M. C., & Aide, T. M. (2005). Vegetation structure, species diversity, and ecosystem processes as measures of restoration success. *Forest Ecology and Management*, *218*(1–3), 159–173. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.07.008

Salgado-Negret, B. (2015). La Ecología Funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones. In *La ecología funcional como aproximación al estudio, manejo y conservación de la biodiversidad: protocolos y aplicaciones* (Issue February).

Shen, G., Tan, S., Sun, X., Chen, Y., & Li, B. (2020). Experimental Evidence for the Importance of Light on Understory Grass Communities in a Subtropical Forest.

Frontiers in Plant Science, *11*(July), 1–8. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01051

Staples, T. L., Mayfield, M. M., England, J. R., & Dwyer, J. M. (2020). Comparing the recovery of richness, structure, and biomass in naturally regrowing and planted reforestation. *Restoration Ecology*, *28*(2), 347–357. https://doi.org/10.1111/rec.13077

Su, X., Li, S., Wan, X., Huang, Z., Liu, B., Fu, S., Kumar, P., & Chen, H. Y. H. (2021). Understory vegetation dynamics of Chinese fir plantations and natural secondary forests in subtropical China. *Forest Ecology and Management*, *483*(August 2020), 118750. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118750

Ventura-Ríos, A., Plascencia-Escalante, F. O., Hernández-De La Rosa, P., Ángeles-Pérez, G., & Aldrete, A. (2017). ¿es la reforestación una estrategia para la rehabilitación de bosques de pino? Una experiencia en el centro de México. *Bosque*, *38*(1), 55–66. https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000100007

Zhang, Y., Liu, T., Guo, J., Tan, Z., Dong, W., & Wang, H. H. (2021). Changes in the understory diversity of secondary *Pinus tabulaeformis* forests are the result of stand density and soil properties. *Global Ecology and Conservation*, *28*, e01628. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01628

APÉNDICE 1. Listado florístico por forma de vida, origen, familia, y zonas donde se encontró cada especie: en una zona degradada (ZD), reforestaciones de diferentes edades (ZR5, ZR9), y bosque de referencia (BR).
APPENDIX 1. Floristic list by form of life, origin, family, and areas where each species was found: in a degraded zone (ZD), reforestation of different ages (R5Z, R9Z), and reference forest (BR).

Nombre científico	Forma de vida	Origen	Familia	Zonas en donde se presenta la especie			
				ZD	ZR5	ZR9	BR
Aegopogon cenchroides Humb. & Bonpl. ex Willd.	Herbácea	Ex	Poaceae				X
Ammi majus L.	Herbácea	Ex	Apiaceae	X	X	X	X
Arenaria lycopodioides Willd. ex Schltdl.	Herbácea	N	Caryophyllaceae	X	X	X	X
Arenaria reptans Hemsl.	Herbácea	N	Caryophyllaceae	X	X		
Astragalus coccineus (Parry) Brandegee	Herbácea	N	Fabaceae	X	X	X	
Astragalus lyonnetii Barneby	Herbácea	N	Fabaceae		X	X	
Baccharis conferta Kunth	Arbustivo	N	Asteraceae		X	X	X

Nombre científico	Forma de vida	Origen	Familia	Zonas en donde se presenta la especie			
				ZD	ZR5	ZR9	BR
Bidens triplinervia Kunth	Herbácea	N	Asteraceae	X	X	X	X
Bromus catharticus Vahl	Herbácea	Ex	Poaceae	X		X	X
Circium rhaphilepis (Hemsl.) Petrak	Herbácea	N	Asteraceae	X	X	X	
Conyza schiedeana (Less.) Cronquist	Herbácea	N	Asteraceae	X	X		
Erigeron karvinskianus DC.	Herbácea	N	Asteraceae	X	X	X	
Erigeron longipes DC.	Herbácea	N	Asteraceae	X	X		
Erigeron sp.	Herbácea	N	Asteraceae	X	X	X	
Eryngium carlinae F. Delaroche	Herbácea	N	Apiaceae	X	X	X	
Euphorbia terracina L.	Herbácea	Ex	Euphorbiaceae	X	X		
Festuca elatior L.	Herbácea	Ex	Poaceae	X	X	X	
Fleischmannia pycnocephala (Less.) R.M. King & Rob.	Herbácea	N	Asteraceae				X
Fragaria vesca L.	Herbácea	N	Rosáceae	X		X	X
Galium praetermissum Greenm	Herbácea	N	Rubiaceae	X		X	X
Geranium lilacium Kunth	Herbácea	N	Geraniaceae	X	X	X	X
Halenia brevicornis (Kunth) G. Don	Herbácea	N	Gentianaceae	X	X		
Heterotheca inuloides Cass.	Herbácea	N	Asteraceae		X	X	
Hypericum silenoides Juss.	Herbácea	N	Hypericaceae	X	X	X	
Lepechinia schiedeana (Schltdl.) Vatke	Herbácea	N	Lamiaceae		X		X
Muhlenbergia macroura (Kunth) Hitchc	Herbácea	N	Poaceae	X	X	X	X
Oxalis alpina (Rose) Rose ex R. Knuth	Herbácea	N	Oxalidaceae	X	X	X	X
Oxalis corniculata L.	Herbácea	N	Oxalidaceae	X	X	X	
Piptochaetium virescens (Kunth) Parodi	Herbácea	N	Poaceae	X	X	X	X
Plantago nivea Kunth	Herbácea	N	Plantaginaceae	X	X	X	
Potentilla candicans Bonpl	Herbácea	N	Rosáceae	X	X	X	
Pseudognaphalium roseum (Kunth) Anderb.	Herbácea	N	Asteraceae	X	X		
Roldana lineolata (DC.) H. Rob & Brettell	Herbácea	N	Asteraceae				X
Rumex acetosella L.	Herbácea	Ex	Polygonaceae	X	X	X	X
Salvia lavanduloides Kunth	Herbácea	N	Lamiaceae	X			
Salvia prunelloides Kunth	Herbácea	N	Lamiaceae		X		
Senecio salignus DC.	Arbustivo	N	Asteraceae		X	X	X
Sibthorpia repens (Mutis ex L.) Kuntze	Herbácea	N	Scrophulariaceae	X			
Taraxacum officinale G. H. Weber ex Wigg.	Herbácea	Ex	Asteraceae	X	X		
Trifolium repens L.	Herbácea	Ex	Fabaceae	X	X	X	X
Viola hookeriana H.B.K	Herbácea	N	Violaceae	X	X		X

N: nativa, Ex: exótica
N: native, Ex: exotic

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA BAJO DOS ESQUEMAS DE MANEJO FORESTAL E INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN GEOGRÁFICA EN UN BOSQUE DE DURANGO, MÉXICO

TREE STRUCTURE AND DIVERSITY UNDER TWO FOREST MANAGEMENT SCHEMES AND THE INFLUENCE OF GEOGRAPHIC ORIENTATION IN A FOREST IN DURANGO, MEXICO

Graciano Luna, J.J., E. Alanís Rodríguez, O. Aguirre Calderón, C.M. Cantú Ayala, J. Yerena Yamallel, C. Martínez Adriano, J. Luján Soto

ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA BAJO DOS ESQUEMAS DE MANEJO FORESTAL E INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN GEOGRÁFICA EN UN BOSQUE DE DURANGO, MÉXICO
TREE STRUCTURE AND DIVERSITY UNDER TWO FOREST MANAGEMENT SCHEMES AND THE INFLUENCE OF GEOGRAPHIC ORIENTATION IN A FOREST IN DURANGO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 141-161 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.9

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Estructura y diversidad arbórea bajo dos esquemas de manejo forestal e influencia de la orientación geográfica en un bosque de Durango, México

Tree structure and diversity under two forest management schemes and the influence of geographic orientation in a forest in Durango, Mexico

José de Jesús Graciano-Luna https://orcid.org/0000-0001-8499-5989
Eduardo Alanís-Rodríguez / eduardo.alanisrd@uanl.edu.mx
http://orcid.org/0000-0001-6294-4275
Oscar Alberto Aguirre-Calderón https://orcid.org/0000-0001-5668-8869
Cesar Martín Cantú-Ayala https://orcid.org/0000-0003-3903-9802
José Israel Yerena-Yamallel https://orcid.org/0000-0002-9216-7427
Cristian Adrián Martínez-Adriano https://orcid.org/0000-0002-4427-0913
Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Carretera Linares-Cd. Victoria, Km 145. Apartado Postal 41. CP 67700, Linares, N.L., México

José Encarnación Luján-Soto https://orcid.org/0000-0001-9427-1909
Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de El Salto. Calle Tecnológico # 101, Colonia La Forestal, C.P. 34942, El Salto, P.N., Durango, México

RESUMEN: La estructura y la diversidad de una comunidad vegetal son parámetros importantes para conocer la dinámica de un ecosistema. En el presente estudio se analizó el efecto de dos tipos de manejo, el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) con el tratamiento de selección y el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) con tratamientos de aclareo, en la estructura y diversidad de especies arbóreas en el ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango, México. Se determinaron los parámetros ecológicos de abundancia, dominancia, frecuencia y valor de importancia (IVI) y se compararon la riqueza y diversidad entre cortas selectivas y aclareos. La información se obtuvo de 52 sitios circulares de 1000 m^2 intervenidos con los dos tipos de manejo. La diversidad Alfa (α) se midió mediante el índice de Margalef para la riqueza de especies, y para la diversidad, los índices de Shannon, verdadero de Shannon, Simpson y equitativo de Simpson. Para la diversidad beta (β) se utilizó el algoritmo de Bray-Curtis. Los resultados muestran que los valores mayores de IVI fueron para *Pinus durangensis* y *Pinus cooperi*. Se observó una menor riqueza y diversidad cuando se aplican aclareos, existen diferencias en diversidad entre las diferentes orientaciones geográficas y hay un 45% de similitud de en cuanto a riqueza especies entre tratamientos de selección y aclareos.
Palabras clave: Índices de diversidad, Aclareos, Selección, Ecosistemas forestales.

ABSTRACT: The structure and diversity of a plant community are important parameters for understanding ecosystem dynamics. This study analyzed the effect of two management methods the Mexican Method for the Management of Irregular Forests (MMOBI) with selection treatment and the Silvicultural Development Method (MDS) with thinning treatments on the structure and diversity of tree species in the El Brillante ejido, Pueblo Nuevo, Durango, Mexico. The ecological parameters of abundance, dominance, frequency, and importance value (IVI) were determined, and richness and diversity were compared between selective felling and thinning. Information was obtained from 52 circular sites of 1,000 m^2 each, intervened with the two management methods. Alpha diversity (α) was measured using the Margalef index for species richness, and diversity was measured using the Shannon, true Shannon, Simpson, and

Graciano Luna, J.J., E. Alanís Rodríguez, O. Aguirre Calderón, C.M. Cantú Ayala, J. Yerena Yamallel, C. Martínez Adriano, J. Luján Soto

ESTRUCTURA Y DIVERSIDAD ARBÓREA BAJO DOS ESQUEMAS DE MANEJO FORESTAL E INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN GEOGRÁFICA EN UN BOSQUE DE DURANGO, MÉXICO

TREE STRUCTURE AND DIVERSITY UNDER TWO FOREST MANAGEMENT SCHEMES AND THE INFLUENCE OF GEOGRAPHIC ORIENTATION IN A FOREST IN DURANGO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 141-161. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.9

Simpson equitable indices. Beta diversity (β) was measured using the Bray-Curtis algorithm. The results show that the highest IVI values were for *Pinus durangensis* and *Pinus cooperi.* Lower species richness and diversity were observed when thinning was applied; there were differences in diversity between the different geographic orientations, and there was a 56% similarity in species richness between selection and thinning treatments.
Key words: Diversity indices, Thinning, Selection, Forest ecosystems.

INTRODUCCIÓN

La estructura de la comunidad vegetal es uno de los aspectos más importantes para la toma de decisiones en el manejo forestal, ya que de esta depende la productividad y las interacciones intra e interespecíficas dentro de los ecosistemas (Bettinger *et al*., 2017). Evaluar las diferencias en la estructura de las comunidades forestales es esencial para valorar los cambios que pueden llegar a sufrir estas comunidades por las actividades de gestión (Ramos-Hernández *et al.*, 2024). Los impactos que generan los aprovechamientos forestales son importantes en la modificación de las etapas sucesionales de un ecosistema, debido a que el manejo conlleva a modificaciones significativas en la estructura y la composición de especies (Graciano, 2001). Por lo que el conocer la estructura y composición de los bosques antes de las operaciones del manejo forestal (corta), permite entender los cambios que pueden presentar los componentes bióticos y abióticos de un ecosistema determinado (Luján-Soto *et al.*, 2008).

La complejidad estructural y la diversidad arbórea en la productividad de los ecosistemas forestales generan una sinergia, siendo la diversidad una característica estructural y la variabilidad un elemento de la biodiversidad (Alanís-Rodríguez e*t al.*, 2010; Monárrez-González *et al.*, 2018)**.** Los estudios de estructura y biodiversidad generan conocimientos para asegurar de manera perpetua y óptima servicios ecosistémicos para las necesidades de las generaciones futuras, a través de decisiones y actividades pertinentes sobre el manejo forestal (Aguirre-Calderón *et al*., 2015; Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2018; Ramos-Hernández *et al.*, 2024).

Varios trabajos han aportado evidencias de que los esquemas de manejo pueden afectar significativamente la composición de especies (Graciano-Luna, 2001; Corral-Rivas *et al.*, 2005; Solís-Moreno *et al.*, 2006; Castellanos-B, 2008; Návar-Cháidez & González-Elizondo, 2009; Leyva-López *et al.*, 2010; Hernández-Salas *et al.*, 2013; Graciano-Ávila *et al.*, 2017; Silva-González *et al.*, 2021 & Galván-Moreno *et al.*, 2024). La mayoría de estos trabajo se han enfocado en describir la diversidad alfa de manera excelente, sin embargo, en la actualidad, ante los nuevos compromisos internacionales sobre la conservación de la biodiversidad y la incursión para demostrar un buen manejo a través de la certificación forestal, se requiere generar conocimientos sobre aspectos estructurales por unidad de manejo más específicas, considerando los métodos silvícolas y características ecológicas como la orientación geográfica, la pendiente o la altura sobre el nivel del mar. Los estudios para evaluar la diversidad también son muy necesarios para poder comprender las relaciones entre comunidades forestales con las diferentes orientaciones geográficas y los esquemas de manejo forestal que se prescriben. (Flores-Morales *et al.*, 2022).

La región de El Salto, ubicada al sur de la capital del estado de Durango, posee una amplia diversidad vegetal, en la cual los géneros *Pinus, Quercus* y *Juniperus* son de gran importancia económica para la región. Los bosques de esta zona se han manejado y aprovechado desde 1926, primero con el Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM) en 1944 y modificado en 1984 a Método de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI), aplicando el tratamiento de selección, así como por el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) mediante tratamientos de aclareos desde la década de los setentas para tener bosques regulares. Sin embargo, existe la necesidad de evaluar los efectos de los tratamientos silvícolas en la estructura y diversidad de los dos métodos de manejo en función de la orientación geográfica, para comprender de qué manera influyen en la riqueza, abundancia y dominancia de las especies, ya que se argumenta que cuando se aplican tratamientos como aclareos, se eliminan algunas especies raras de poca abundancia y la diversidad se modifica porque esa nueva área es colonizada por las especies dominantes que suelen ser las de mayor interés económico (Silva-González *et al.*, 2021).

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Los objetivos del presente estudio fueron evaluar el efecto del MMOBI y del MDS en la estructura horizontal del bosque manejado, mediante la abundancia, frecuencia, dominancia, valor de importancia (IVI), riqueza y diversidad, así como conocer la influencia de la orientación geográfica en la composición de especies en bosques del ejido El Brillante, Pueblo Nuevo, Durango. La hipótesis planteada fue que la estructura y la diversidad es modificada por el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) con el tratamiento de selección y el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) con tratamientos de aclareo y que la orientación geográfica influye en dicha modificación. La información generada contribuirá al conocimiento biológico de los ecosistemas forestales en el Noroeste de México y generará conocimiento para la toma de decisiones del manejo de las masas forestales.

MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el sistema montañoso de la Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, en el ejido El Brillante, del municipio de Pueblo Nuevo, entre las coordenadas geográficas 23°50'44.85" latitud N, 105°22'2.95" longitud O y 23°46'49.38" N, 105°20'28.62" O con una Altura de 2600 m s.n.m. (Figura 1). De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (INEGI, 2007), el clima predominante en el área es el tipo C (E) (w), que corresponde a semifrío subhúmedo con lluvias en verano. La precipitación oscila entre los 1 000 a 1 200 mm anuales, con las temperaturas medias anuales de 11.5 ºC, las extremas más frías registradas de 8.3 ºC y las extremas más calurosas de 14.3 ºC (Quiñónez-Barraza *et al.*, 2012). Los tipos de suelo conforman asociaciones entre Regosol, Litosol y Cambisol (UPSE, 2007). Los tipos de vegetación existentes son bosque de pino, bosque de encino, bosque de pino-encino, encino-pino y vegetación secundaria arbustiva en todas las comunidades vegetales (González-Elizondo *et al.*, 2012).

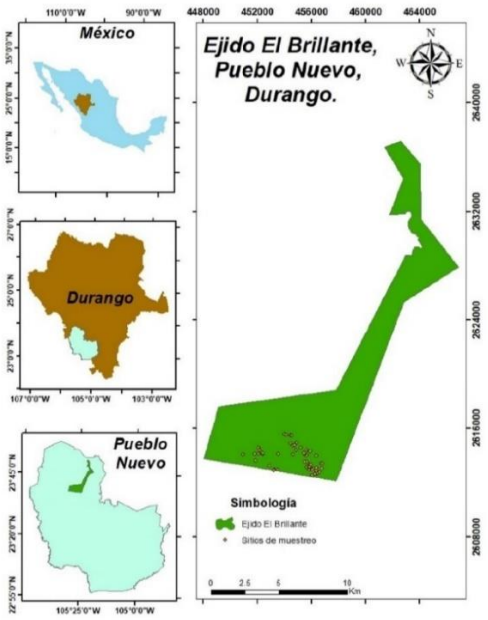


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo (puntos en color naranja) en el área de estudio.
Figure 1. Location of sampling sites (orange dots) in the study area.

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Evaluación en campo

La información dasométrica se obtuvo de 52 sitios de monitoreo forestal de forma circular de 1000 m^2, 38 para MMOBI, y 13 de MDS (Tabla1), ubicados aleatoriamente en diferentes áreas de corta del actual programa de manejo. Los sitios se establecieron donde se aplicaron tratamientos silvícolas con el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), incluyendo primero, segundo, tercer aclareo y cortas de liberación, así como en áreas con el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) bajo el tratamiento de selección. Los sitios se dividieron por orientación geográfica 12 sitios para la orientación Norte, Noreste, Noroeste en el grupo (N NE NO); 12 para Sur, Sureste, Suroeste en el grupo (S SE SO) y 14 para Este-Oeste en otro grupo (EO) para MMOBI, 4 sitios (N NE NO), 8 para (S SE SO) y 4 para (EO) en MDS. Se colectó información silvícola dasométrica de cada sitio, por estratos y por tratamiento. Para los análisis se consideraron el diámetro normal (*Dn*> 7.5 cm), el cual se midió con cinta diamétrica Ben Meadows; altura total (*H*), con un clinómetro Suunto Pm5/360pc; diámetro de copa Norte-Sur y Este-Oeste, así como el registro de la especie de cada individuo. Los formatos utilizados fueron los recomendados por el Sistema de Planeación Forestal para Bosques Templados SiPlaFor (Ávila-Márquez, 2021). Los nombres científicos se consultaron en la página web *The World flora On line List* (http://www.worldfloraonline.org/).

Tabla 1. Características silvícolas, ecológicas y geográficas de los sitios de estudio.
Table 1. Silvicultural, ecological and geographic characteristics of the study sites.

Sitio	AS.N.M.	Pendiente (%)	Orientación	Tratamiento	Manejo	Sitio	A.S.N.M.	Pendiente (%)	Orientación	Tratamiento	Manejo
2217	2839	26	Norte	aclareo	MDS	1773	2710	87	Oeste	selección	MMOBI
2040	2792	53	Sur	aclareo	MDS	2047	2785	32	Este	selección	MMOBI
2218	2858	30	Norte	aclareo	MDS	1900	2761	39	Oeste	selección	MMOBI
1908	2852	20	Oeste	2 aclareo	MDS	2713	2255	64	Noroeste	selección	MMOBI
1905	2882	60	Oeste	2 aclareo	MDS	1759	2266	74	Noreste	selección	MMOBI
2302	2828	40	Sur	2 aclareo	MDS	1763	2277	49	Noroeste	selección	MMOBI
2305	2852	60	Sur	2 aclareo	MDS	1767	2290	45	Oeste	selección	MMOBI
2216	2833	17	Noreste	aclareo	MDS	1747	2302	80	Oeste	selección	MMOBI
2316	2708	65	Noreste	aclareo	MDS	1822	2302	40	Norte	selección	MMOBI
2304	2830	30	Sur	2 aclareo	MDS	1845	2507	60	Oeste	selección	MMOBI
2311	2753	15	Sur	aclareo	MDS	2686	2658	65	Suroeste	selección	MMOBI
2037	2765	34	Sureste	aclareo	MDS	2032	2800	68	Norte	selección	MMOBI
1313	2752	21	Este	4 aclareo	MDS	1932	2683	65	Noreste	selección	MMOBI
2303	2804	60	Sur	selección	MMOBI	2319	2865	64	Sureste	selección	MMOBI
1957	2560	80	Suroeste	selección	MMOBI	2048	2784	29	Oeste	selección	MMOBI
1747	2302	80	Oeste	selección	MMOBI	1940	2517	72	Sureste	selección	MMOBI
2210	2893	10	Este	selección	MMOBI	2309	2644	67	Este	selección	MMOBI
1981	2572	60	Noroeste	selección	MMOBI	1899	2743	64	Oeste	selección	MMOBI
1952	2550	80	Sur	selección	MMOBI	1948	2815	62	Suroeste	selección	MMOBI
1793	2298	60	Oeste	selección	MMOBI	2315	2702	75	Sur	selección	MMOBI
1806	2272	35	Sur	selección	MMOBI	1947	2750	62	Sur	selección	MMOBI
1932	2683	64	Noreste	selección	MMOBI	2320	2808	60	Sureste	selección	MMOBI
1996	2758	64	Noroeste	selección	MMOBI	2760	2768	24	Noroeste	selección	MMOBI
1958	2682	34	Sur	selección	MMOBI	2317	2736	58	Sur	selección	MMOBI
1926	2815	20	Oeste	selección	MMOBI	1992	2760	58	Este	selección	MMOBI
1847	2770	19	Noroeste	selección	MMOBI	1976	25666	80	Norte	selección	MMOBI

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Análisis de la información

Con la información de campo y para cada tratamiento por tipo de manejo y orientación geográfica se realizó un análisis de la composición de especies entre los métodos de manejo MMOBI y MDS, se calculó el área basal y la cobertura en función del diámetro normal y diámetro de copa, con la fórmula del cilindro ($A = \pi r^2$), se estimaron los parámetros estructurales (dominancia, abundancia y frecuencia relativas) y el Índice de Valor de Importancia Ecológica (IVI) (Whittaker, 1972; Franco-López J., 1985; Magurran, 1988 y Moreno, 2001).

Para estimar la diversidad en las comunidades forestales evaluadas, se aplicaron los índices de Margalef [DM_g], Shannon [H´] y el número efectivo de especies con base en la exponencial del índice de Shannon (exp (H´)) llamado también índice verdadero de Shannon, conocido como ($_1$D), los cuales estiman la diversidad alfa (Moreno, 2011, 2019; Cultid-Medina C & Escobar F., 2019).

Con la identificación de cada especie y su abundancia en ambos tipos de manejo, se calculó el Índice de Dominancia de Simpson (D). Este índice varía de cero a uno, donde 0 significa que no hay dominancia y 1 significa dominancia por especies dentro de la comunidad (Simpson, 1949). Con el índice D, se estimó el Índice de Diversidad de Simpson (IDS = 1 - D), también llamado complemento de Simpson, el cual oscila entre 0 donde solo hay una especie y 1 donde hay mucha diversidad. Se realizó una prueba "t" para determinar diferencias estadísticas entre los índices de diversidad en ambos métodos de manejo. Para los análisis de diversidad se utilizó el Excel 2021 (18.0) y el software PAST 3.22 (Hammer, 2001).

Para evaluar la diversidad entre hábitats (grado de reemplazamiento de especies) o cambio biótico a través de condiciones ambientales, se generó un modelo de ordenación Bray-Curtis, el cual es una representación gráfica de la variación de la composición vegetal (Bray & Curtis, 1957).

El análisis se realizó entre tratamientos (Selección, Selección N NO NE, Selección S SE SO, Selección EO, Aclareo, Aclareo N NO NE, Aclareo S SE SO y Aclareo EO). El modelo es un algoritmo que determina el porcentaje de similitud en una medida de distancia, proporciona valores entre 0 y 100, donde el 100 significa que los sitios tienen la misma composición y 0 significa que no comparten especies entre comunidades (Bray & Curtis, 1957). Esta gráfica se elaboró con el algoritmo UPGMA y 999 permutaciones para respaldar el valor de cada rama (Hammer, 2001). Para determinar la distribución de los datos se realizaron pruebas de normalidad Shapiro-Wilk cuando $n \leq 2000$ con $\alpha = 0.05$.

RESULTADOS

Composición de especies

En cuanto a composición de especies, se registraron 24 especies para sitios con MMOBI y 11 para sitios con MDS, distribuidas en cinco familias (Tabla 2). La familia Fagaceae fue la mejor representada con un 46% (11 especies), seguida por Pinaceae con 42% (ocho especies) y 12% por las familias Cupressaceae, Betulaceae y Ericaceae. La familia Fagaceae fue representada por el género *Quercus*, mientras que Pinaceae tuvo nueve especies del género *Pinus* y una de *Pseudotsuga*; en la familia Cupressaceae aparecen el género *Juniperus*, en la Betulaceae *Alnus* y en Ericaceae *Arbutus*.

Tabla 2. Listado del arbolado del área de estudio y densidades (Árboles ha^{-1}) por tipo de manejo. Los nombres de las especies son acordes a la (WFO's, 2024).
Table 2. List of trees in the study area and densities (Trees ha-1) by management type. Species names are according to (WFO's, 2024).

Familia	Especie	Densidad (n ha^{-1})			
		MMOBI	(%)	MDS	(%)
Betulaceae	*Alnus spp* Kunth	19.2	4.34	46.9	9.65
Cupressaceae	*Juniperus deppeana* Steud.	12.9	2.92	20	4.11
Ericaceae	*Arbutus xalapensis* Kunth	50	11.31	28.5	5.86
Fagaceae	*Quercus candicans* Née	0.5	0.11	0	0.00
Fagaceae	*Quercus coccolobifolia* Trel.	1.8	0.41	0	0.00
Fagaceae	*Quercus crassifolia* Humb. & Bonpl.	9.2	2.08	0	0.00
Fagaceae	*Quercus durifolia* Seemen ex Loes.	5.5	1.24	0	0.00
Fagaceae	*Quercus eduardii* Trel.	1.8	0.41	0	0.00
Fagaceae	*Quercus emoryi* Porter & J.M.Coult.	0.3	0.07	0	0.00
Fagaceae	*Quercus fulva* Liebm.	3.9	0.88	0	0.00
Fagaceae	*Quercus rugosa* Née	35.5	8.03	21.5	4.42
Fagaceae	*Quercus sideroxyla* Bonpl.	46.6	10.54	18.5	3.81
Fagaceae	*Quercus urbanii* Trel.	11.6	2.62	0	0.00
Fagaceae	*Quercus viminea* Trel.	2.9	0.66	0	0.00
Pinaceae	*Pinus chihuahuana* Martínez	3.9	0.88	0.8	0.16
Pinaceae	*Pinus cooperi* C.E. Blanco	27.9	6.31	160	32.91
Pinaceae	*Pinus durangensis* Martínez	136.6	30.90	149.2	30.69
Pinaceae	*Pinus engelmannii* Carrière	9.7	2.19	0	0.00
Pinaceae	*Pinus herrerae* Martínez	11.3	2.56	0	0.00
Pinaceae	*Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. *et.* Cham.	8.2	1.86	6.9	1.42
Pinaceae	*Pinus lumholtzii* B. L. Rob et Fernald	3.2	0.72	0	0.00
Pinaceae	*Pinus strobiformis* Engelm.	27.1	6.13	33.1	6.81
Pinaceae	*Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. et Cham.	12.1	2.74	0.8	0.16
Pinaceae	*Pseudotsuga spp* (Mirb.) Franco	0.3	0.07	0	0.00
TOTALES		442	100	457.7	100

Se muestra que con las cortas selectivas en el MMOBI existen muchas especies exclusivas (13 especies), principalmente del género *Quercus* y algunas especies de baja densidad como el *Pseudotsuga* spp. y otras del género *Pinus*. En el MDS, las 11 especies que aparecen también se pueden encontrar cuando se aplica MMOBI (Tabla 2).

En cuanto a las densidades, para el MMOBI, el *P. durangensis, Arbutus* spp y *Q. sideroxyla* resultaron ser las especies que representan el mayor número de árboles por unidad de superficie, mientras que para MDS el *P. cooperi,* el *P. durangensis* y el *Alnus* spp. Existen otras especies con poca abundancia de los géneros *Quercus* y *Pinus* con porcentajes menores al 3%, principalmente en el MMOBI. Se observa que el *P. durangensis* y *P. cooperi* son las especies con mayor densidad, aunque en MDS cuando se aplican aclareos se aprecia como el *P. cooperi* incrementa su densidad. El *Q. sideroxyla* juega un papel importante en la composición de especies, sin embargo, se observa que con los aclareos del MDS se reduce significativamente su densidad.

Se puede observar también que las especies de interés comercial son las que van dejando los técnicos cuando se aplica MDS, el *P. cooperi* (160 árboles ha^{-1}) y el *P. durangensis* (149 árboles ha^{-1}), representando éstas dos especies el 64% de la densidad total. Sin embargo, se aprecia en este método, que se están incluyendo otras especies que cohabitan como el *P. leiophylla, P. teocote, Juniperus depeana*, *Q. sideroxyla, Q. rugosa, Arbutus y Alnus*, especies que anteriormente se eliminaban por la técnica llamada chaponeo.

Parámetros estructurales (Dominancia, abundancia y valor de importancia)

Selección (MMOBI) vs Aclareos (MDS)

En cuanto a la dominancia, en rodales con selección (MMOBI) el *P. durangensis* y *Q. sideroxyla* son las especies que presentan mayor área basal con 6.52 m^2 ha^{-1} y 1.84 m^2 ha^{-1} respectivamente. En densidad, el *P. durangensis* y *A. xalapensis* ocuparon los primeros lugares, con 137 y 50 árboles por hectárea en selección (MMOBI), además en el 84% de los sitios con MMOBI se encontraron estas especies, seguidas por *Q. sideroxyla* y *Q. rugosa.* (Tablas 3 y 4).

Tabla 3. Parámetros ecológicos relativos para selección y aclareos para los dos métodos de manejo.
Table 3. Relative ecological parameters for selection and thinning for the two management methods.

ESPECIE	Dominancia (Área Basal)		Densidad		Frecuencia		IVI (%)	
	MMOBI (%)	MDS (%)	MMOBI (%)	MDS (%)	MMOBI (%)	MDS (%)	MMOBI	MDS
Pinus cooperi	7.65	**19.4**	6.31	**32.91**	3.8	10.5	5.93	**20.95**
Pinus durangensis	**36.13**	**37.5**	**30.89**	**30.70**	**13.7**	**15.8**	**26.90**	**28.00**
Pinus leiophylla.	1.87	1.79	1.85	1.42	4.7	5.3	2.80	2.83
Pinus teocote.	2.54	0.44	2.74	0.16	2.6	1.3	2.61	0.64
Pinus engelmannii	1.62		2.20		1.7		1.84	
Pinus lumholtzii	0.56		0.71		1.3		0.85	
Pinus ayacahuite	3.12	4.51	6.13	6.80	10.7	**13.2**	6.65	8.16
Pinus chihuahuana	1.10	0.03	0.89	0.16	1.3	1.3	1.09	0.50
Pinus herrerae	2.57		2.56		2.1		2.42	
Juniperus deppeana	2.64	2.78	2.92	4.11	3.4	**11.8**	2.99	6.25
Pseudotsuga spp	0.11		0.06		0.4		0.20	
Quercus sideroxyla	**10.21**	10.0	**10.54**	3.80	**11.1**	10.5	**10.62**	8.13
Quercus durifolia	0.42		1.25		0.4		0.70	
Quercus coccolobifolia	0.58		0.42		1.3		0.76	
Quercus eduardii	0.80		0.42		1.3		0.83	
Quercus urbanii	3.78		2.62		3.8		3.42	
Quercus crassifolia	2.53		2.08		3.0		2.53	
Quercus viminea	0.30		0.65		1.7		0.89	
Quercus emoryi	0.06		0.06		0.4		0.18	
Quercus fulva	1.47		0.89		0.9		1.07	
Quercus candicans	0.19		0.12		0.9		0.39	
Quercus rugosa	**9.54**	**12.3**	8.04	4.43	9.8	7.9	9.14	8.19
Alnus spp	2.40	6.53	4.35	**9.65**	6.0	**11.8**	4.24	**9.34**
Arbutus xalapensis	7.80	4.69	**11.31**	5.85	**13.7**	10.5	**10.93**	7.02
TOTALES	100	100	100	100	100	100	100	100

La dominancia mayor en aclareos la representa el *P. cooperi* (7.92 m^2 ha^{-1}) y el *P. durangesnsis* con 4.10 m^2 ha^{-1}. Se observa también que con la aplicación del MDS a través de los sitios de aclareo, muchas especies del género *Quercus* ya no se encuentran, posiblemente por el chaponeo o a factores abióticos o bien a otras actividades complementarias que se realizan. En el 92.3% de

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

los sitios con aclareo se encontró el *P. durangesnis* y en el 76.9 % el *P. strobiformis*, en 69.2% el *Alnus* spp. y el *Juniperus depeana,* el *P*. *cooperi* en un 61.5%, luego *Q. rugosa* en un 46.2% de los sitios.

El *P. durangensis* y el *P. cooperi* presentaron los mayores porcentajes de IVI en sitios con MDS y con el tratamiento de aclareos (Tabla 4), las especies que aparecieron en aclareos con menores IVI entre 9% y 1% fueron: *Alnus* spp*, Q. rugosa, P. strobiformis, Q. sideroxyla, A. xalapensis, Juniperus deppeana, P. leiophylla, P. teocote* y *P. chihuahuana*, estas dos últimas especies se encontraron en un 7% de los sitios.

En la tabla 4 se presentan los parámetros de dominancia, densidad, frecuencia y Valor de Importancia para las primeras 5 especies con mayor IVI por orientación geográfica y por método de manejo.

Tabla 4. Parámetros estructurales por tratamiento para las cinco especies con mayor IVI, ordenadas de manera descendente.

Table 4. Structural parameters by treatment for the five species with the highest IVI, ordered in descending order.

ESPECIE	Dominancia (Área Basal)		Abundancia (Densidad)		Frecuencia		IVI (%)
	Absoluta (m^2 ha^{-1})	Relativa (%)	Absoluta (N ha^{-1})	Relativa (%)	Absoluta (%)	Relativa (%)	
Selección							
Pinus durangensis	6.52	36.13	136.6	30.89	84.2	13.7	26.90
Arbutus xalapensis	1.41	7.80	50.0	11.31	84.2	13.7	10.93
Quercus sideroxyla	1.84	10.21	46.6	10.54	68.4	11.1	10.62
Quercus rugosa	1.72	9.54	35.5	8.04	60.5	9.8	9.14
Pinus strobiformis	0.56	3.12	27.1	6.13	65.8	10.7	6.65
Aclareos							
Pinus durangensis	7.92	37.50	149.2	30.70	92.3	15.8	28.00
Pinus cooperi	4.10	19.40	160.0	32.91	61.5	10.5	20.95
Alnus spp.	1.38	6.53	46.9	9.65	69.2	11.8	9.34
Quercus rugosa	2.59	12.26	21.5	4.43	46.2	7.9	8.19
Pinus strobiformis	0.95	4.51	33.1	6.80	76.9	13.2	8.16
Selección N NE NO							
Pinus durangensis	8.19	38.63	124.5	30.79	72.7	10.7	26.69
Quercus sideroxyla	2.24	10.55	64.5	15.96	54.5	8.0	11.50
Arbutus xalapensis	1.27	5.97	34.5	8.54	72.7	10.7	8.39
Pinus strobiformis	0.77	3.64	22.7	5.62	81.8	12.0	7.09
Quercus rugosa	1.49	7.02	19.1	4.72	36.4	5.3	5.69
Aclareo N NE NO							
Pinus cooperi	8.49	50.71	330.0	63.46	75.0	13.6	42.60
Pinus durangensis	3.48	20.76	75.0	14.42	75.0	13.6	16.27
Pinus strobiformis	1.49	8.87	47.5	9.13	100.0	18.2	12.06
Quercus rugosa	2.50	14.93	17.5	3.37	25.0	4.5	7.61
Juniperus deppeana	0.39	2.36	15.0	2.88	75.0	13.6	6.29
Selección S SE SO							
Pinus durangensis	7.09	40.63	166.2	35.01	92.3	14.0	29.86
Quercus sideroxyla	2.10	12.06	66.2	13.94	84.6	12.8	12.93

ESPECIE	Dominancia (Área Basal)		Abundancia (Densidad)		Frecuencia		IVI (%)
	Absoluta (m^2 ha^{-1})	Relativa (%)	Absoluta (N ha^{-1})	Relativa (%)	Absoluta (%)	Relativa (%)	
Arbutus xalapensis	1.76	10.11	53.8	11.35	100.0	15.1	12.19
Quercus rugosa	2.06	11.83	41.5	8.75	92.3	14.0	11.51
Aclareo S SE SO							
Pinus durangensis	11.39	49.19	200.0	42.70	100.0	16.2	36.04
Pinus cooperi	2.11	9.11	75.0	16.01	50.0	8.1	11.08
Arbutus xalapensis	1.78	7.69	50.0	10.68	83.3	13.5	10.63
Quercus rugosa	3.15	13.61	30.0	6.41	66.7	10.8	10.28
Quercus sideroxyla	2.71	11.69	28.3	6.05	66.7	10.8	9.52
Selección E O							
Pinus durangensis	4.75	25.75	132.5	25.85	87.5	14.89	22.16
Arbutus xalapensis	1.67	9.05	78.8	15.37	87.5	14.89	13.10
Quercus rugosa	2.34	12.69	70	13.66	50	8.51	11.62
Pinus cooperi	1.96	10.62	40	7.80	12.5	2.13	6.85
Quercus sideroxyla	1.21	6.56	8.8	1.71	62.5	10.64	6.30
Aclareo E O							
Pinus durangensis	6.16	28.57	126.7	28.57	100.00	17.65	24.93
Alnus spp	5.21	24.15	126.7	28.57	100.00	17.65	23.46
Pinus cooperi	2.16	10.01	100	22.56	66.67	11.76	14.78
Quercus sideroxyla	3.63	16.84	6.7	1.50	66.67	11.76	10.04
Pinus strobiformis	0.68	3.15	33.3	7.52	66.67	11.76	7.48

Selección N NE NO vs Aclareos N NE NO

En el tratamiento Selección N NE NO (MMOBI) se encontraron 21 especies y 10 en aclareos orientación N NE NO (MDS). Se observó que varias especies del género *Quercus* como *Q. viminea, Q. urbanii, Q. candicans, Q. eduardii, Q. coccolobifolia* y *Q. crassifolia* y *P. lumholtzi* y el *P. teocote* que se encuentran en Selección N NE y NO ya no aparecen en el Aclareo N NE y NO. El *Pseudotsuga* spp. se ve afectado quizás por la falta de sombra y humedad de la orientación norte, ya que no aparece cuando se aplican aclareos.

La densidad de *A. xalapensis* disminuyen de 34 árboles ha^{-1} en Selección N NE NO a 10 árboles por hectárea en Aclareo N NE NO. El *P. cooperi* y el *P. durangensis* se encontraron en el 75% de los sitios en Aclareo N NE NO, sin embargo, resulta interesante que el *P. strobiformis* aparece en el 100% de los sitios con Aclareo N NE NO pero con área basal pequeña (1.49 m^2 ha^{-1}). Los valores mayores de IVI en Selección N NE NO los presenta el *P. durangensis* con 26.69%, *Q. sideroxyla* con 11.50%, *A. xalapensis* con 8.39% y *P. strobiformis con 7.09%.* Es importante que los técnicos pongan especial cuidado cuando apliquen cortas de selectivas con *P. engelmannii, P. lumholtzii* y *Pseudotsuga* spp, ya que observaron valores de IVI muy pequeños debido a sus bajas abundancias. En Aclareo N Ne NO esta dominando el *P. cooperi* con 8.49% y con más del 50% de las áreas basales (8.5m^2 ha^{-1}), con una densidad de 330 árboles ha^{-1} y con un IVI de 42.69%. El *P. durangensis* ocupó el segundo lugar con un IVI de 16.27 y el *P. strobiformis* con 12.02%. En Aclareo N Ne NO las especies con índices de valor de importancia menores fueron: *P.*

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

strobiformis, Q. rugosa, Juniperus deppeana, Q. sideroxyla, Alnus spp.*, A. xalapensis, P. leiophylla*, y *P. chihuahuana.*

Selección S SE SO vs Aclareo S SE SO

En el tratamiento de Selección S SE SO se encontraron 15 especies y con Aclareos S SE SO nueve especies, proliferan las hojosas, pero cuando se aplican los tratamientos también cambian las especies. En selección S SE SO el *P. durangensis* ocupa el primer lugar en el IVI con 29.86%, se presenta en el 92.3% de los sitios analizados, tiene densidades de 166 árboles ha^{-1}, con 7 m^2 ha^{-1}, ocupando el 40% de área basal, le sigue el *Q. sideroxyla* apareciendo en el 84.6% de los sitios y con un IVI de 12.93%, luego *Arbutus xalapensis* con 53.8 árboles ha^{-1}y un IVI de 12.19% pero se encuentra en todos los sitios muestreados con área basal de 1.76 m^2 ha^{-1}. El *Q. rugosa* también es importante en los sitios de Selección Sur con 41 árboles ha^{-1} y con un IVI de 11.51% encontrándose en el 92% de los sitios de muestreo con Selección S SE SO.

Resulta interesante saber que en este tratamiento (Selección S SE SO) aparecen muchas especies de hojosas y algunas coníferas de bajas abundancias; en orden descendente por su valor del IVI del quinto lugar en adelante son: *P. strobiformis, P. cooperi, P. teocote., J. deppeana, Q.* crassifolia, *Alnus spp, P. leiophylla*, *P. engelmannii, Q. fulva, Q. candicans* y *Q. urbanii. El Juniperus deppeana, Alnus* spp. y *P. leiophylla*.

En el Aclareo S SE SO es dominado por el *P. durangensis* con 200 árboles ha^{-1}, apareciendo en el 100% de los sitios y con el máximo IVI de 26.04%, además el 49.19% de la áreas basales es ocupada por ésta especie, sigue el *P. cooperi* con 76 árboles ha^{-1}, estando presente en el 50% de los sitios y un IVI de 11.08%, las otras especies tienen un IVI que va de 10 a 3% y con densidades promedio de 50 a 21 árboles ha^{-1}, esas especies son el *Arbutus xalapensis* apareciendo en el 83% de los sitios, el *Quercus rugosa* con 13.61% del área basal con 3.15 m^2 ha, *Q. sideroxyla, Juniperus deppeana. Alnus* spp.*, P. strobiformis y P. leiophylla* apareciendo en el 60% de los sitios y con IVI de 9.5, 6.68, 6.3, 6,1 y 3.35% respectivamente.

Selección EO vs Aclareo EO

Para el tratamiento Selección EO y Aclareo EO, el IVI más alto fue para el *P. durangesnis*, con 132.5 árboles ha $^{-}$1 en Selección EO y 126 en Aclareo EO, sin embargo, para Selección EO siguen el *Arbutus xalapensis* y el *Q. rugosa*, mientras que para el Aclareo EO el *Alnus* spp. y el *P. cooperi.* El *P, durangensis* se presentó en 87 de los sitios, el *Arbutus* 78% en Selección EO y el *P. durangensis* y el *Alnus spp.* en el 100% de los sitios con Aclareo EO. Para Selección EO se presentaron 18 especies y nueve para el Aclareo EO.

Diversidad Alfa

Con respecto a los índices de riqueza y diversidad, para el tratamiento Selección, Selección N NE NO, Selección S SE SO y Selección EO; el índice de riqueza de Margalef (Dmg) mostró promedios de 2.85 ± 0.48, para Shannon (H^+) 2.32 ± 0.15 y para la diversidad de Simpson (1-D) 0.85±0.02. Estos valores del MMOBI, fueron superiores que para MDS con Aclareo, Aclareo N NE NO, Aclareo S Se SO y Aclareo EO, donde, el índice de Margalef fue en promedio de 1.57±0.12, el de Shannon de 1.6±0.24, y para la diversidad de Simpson un promedio de 0.72±0.11. Con el tratamiento de selección del MMOBI se observó que la riqueza es mayor, encontrando 23 especies y tan solo 11 con el MDS, se aprecia la diferencia de riqueza y diversidad entre tratamientos, observando una diversidad media para los tratamientos de Selección (MMOBI) y baja para Aclareos (MDS). Con los valores anteriores, se muestra poca dispersión entre los índices sobre todo para los tratamientos de selección, donde presenta una desviación estándar muy baja, como es el caso del índice de Simpson. Los índices para los aclareos muestran una diversidad baja y poca variación entre ellos (Tabla 5).

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Tabla 5. Valores de índices de riqueza y diversidad por tipo de manejo MMOBI (selección) y MDS (Aclareos) en diferentes orientaciones geográficas.
Table 5. Richness and diversity index values by management type MMOBI (selection) and MDS (thinning) in different geographic orientations.

Tratamiento	Manejo	Especies (S)	Margalef (Dmg)	Diversidad de Shannon (H´)	Número de especies efectivas (^{1}D)	Dominancia de Simpson (D)	Diversidad de Simpson (1-D)
Selección	MMOBI	24	3.09	2.43	11.36	0.14	0.86
Selección N NE NO	MMOBI	21	3.28	2.37	10.65	0.15	0.85
Selección S SE SO	MMOBI	15	2.18	2.1	8.2	0.17	0.82
Selección E O	MMOBI	18	2.83	2.38	10.88	0.12	0.87
Aclareo	MDS	11	1.55	1.77	5.9	0.22	0.78
Aclareo N NE NO	MDS	10	1.68	1.28	3.6	0.44	0.56
Aclareo S SE SO	MDS	9	1.42	1.77	5.9	0.24	0.76
Aclareo E O	MDS	9	1.64	1.71	5.52	0.22	0.78

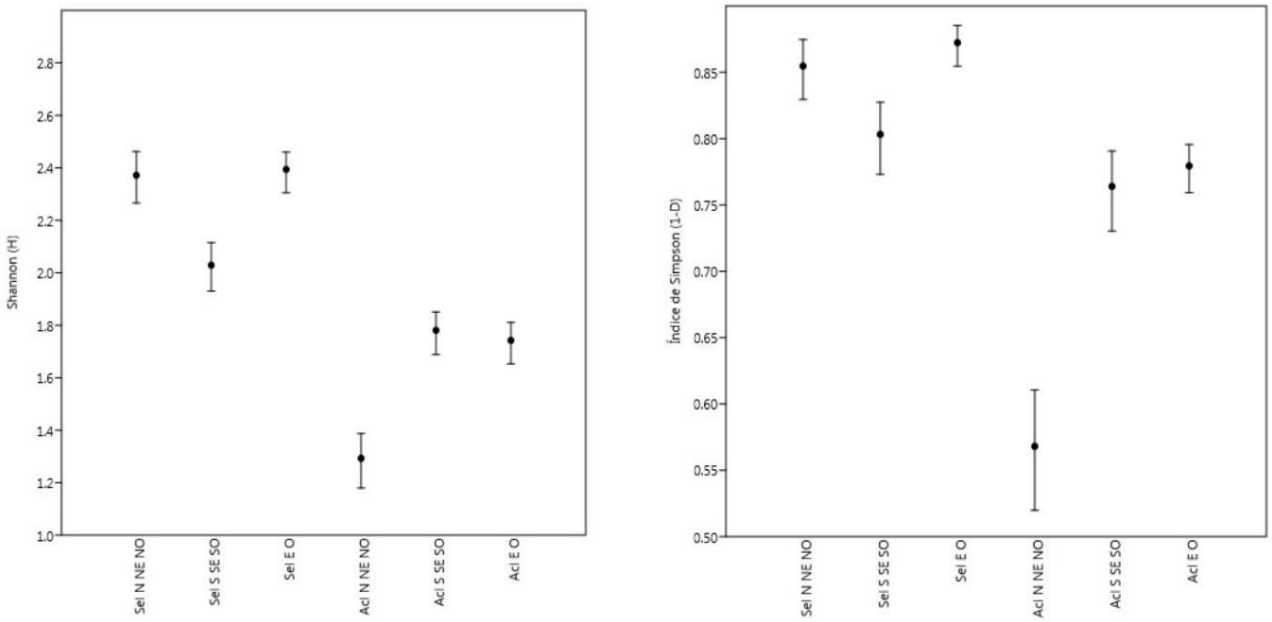


Figura 2. Índices de diversidad de Shannon-Weiner y Simpson por tratamiento para los dos métodos de estudio (Selección MMOBI y Aclareos MDS). Los valores graficados representan la media ± error estándar.
Figure 2. Shannon-Weiner and Simpson diversity indices by treatment for the two study methods (MMOBI Selection and MDS Thinning). Values plotted represent the mean ± standard error.

Existen diferencias entre tratamientos de selección y aclareos, mostrando una mayor diversidad el tratamiento de selección en exposiciones N NE NO que en S SE SO. Se observa también como el Aclareo N NE NO presentó la menor diversidad (Figura 2).

Se muestra también en la figura anterior que en el índice efectivo de especies (^{1}D) se observan valores altos de las especies más abundantes para las diferentes orientaciones geográficas en el MMOBI, en cambio para el MDS valores muy bajos, lo que se puede demostrar que en este tipo de manejo y con tratamientos con aclareos la diversidad se reduce y pocas especies ocupan las mayores abundancias (*P. cooperi, P. durangensis* y *Arbutus xalapensis* ó *Q. sideroxyla*). El índice de dominancia de Simpson (D) representa poca probabilidad de que dos individuos seleccionados

al azar sean de la misma especie en tratamientos de selección, habiendo mayor probabilidad en aclareos y sobre todo mayor en Aclareos N NE NO. El complemento de Simpson muestra que los rodales manejados con selección en las diferentes orientaciones presentan mayor diversidad como lo es el de Selección E O (0.86), Selección (0.85) y Selección N NE NO (0.82). El Aclareo N NE NO fue el que mostró menor diversidad de acuerdo al complemento de Simpson de 0.56.

Similitud entre comunidades

Los resultados obtenidos del análisis de similitud mediante la técnica de Bray-Curtis, muestran un 45% de similitud entre ambos métodos de manejo forestal. Se observan cuatro grupos de comunidades vegetales bien definidos, considerando un valor de referencia de 0.675, el primero conformado por Aclareo S SE SO, Selección S SE SO y Selección N NE NO, estas comunidades presentaron la mayor similitud de especies. El tratamiento Selección EO forma otro grupo. el tercer Aclareo EO y el cuarto grupo el Aclareo N NE NO que representó la comunidad vegetal con menor similitud de especies ocurriendo por separado del resto de las comunidades evaluadas (Figura 3).

Las especies generalistas que se registraron en todos los tratamientos analizados fueron: *P. cooperi, P. durangensis, P. leiophylla, P. strobiformis, J. deppeana, Q. sideroxyla, Q. rugosa, Alnus spp*. y *A. xalapensis,* mientras que las especies especialistas se presentaron en el MMOBI y fueron: *P. engelmannii, P. lumholtzii, P. herrerae, Pseudotsuga spp, Q. durifolia, Q. coccolobifolia, Q. eduardii, Q. urbanii, Q.* crassifolia, *Q. viminea, Q. emoryi, Q. fulva, Q. candicans.*

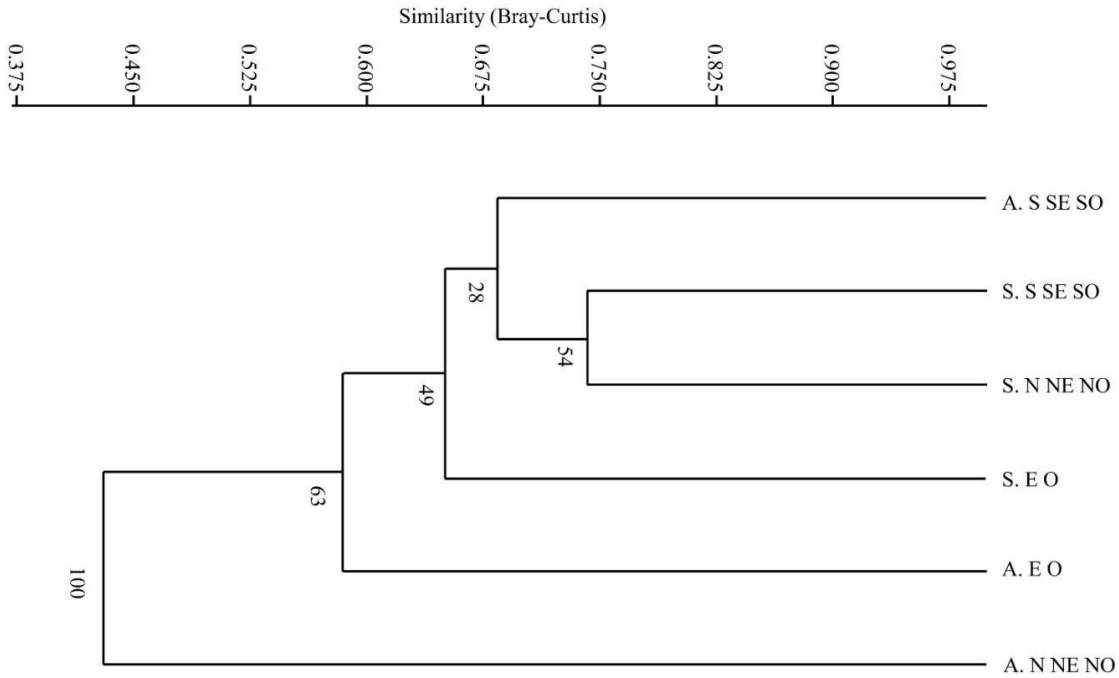


Figura 3. Dendrograma de similitud basado en análisis Bray Curtis entre tratamientos con diferentes orientaciones. A: aclareos y S es selección; N, S, E, O, NE, NO, SE, SO se refieren a las exposiciones donde se encontraron las comunidades vegetales estudiadas. Los números cercanos a cada rama son el porcentaje de permutaciones que respaldan cada nodo de separación en el dendrograma de agrupación final.

Figure 3. Dendrogram of similarity based on Bray Curtis analysis between treatments with different orientations. A: thinning and S is selection; N, S, E, W, W, NE, NW, SE, SW refer to the exposures where the studied plant communities were found. The numbers near each branch are the percentage of permutations supporting each split node in the final clustering dendrogram.

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

La correlación cofenética (Cophen. corr. 0.901) obtenida mostró una buena medida del grado de ajuste para la clasificación de nuestro conjunto de datos (Saraçli *et al.*, 2013).

DISCUSIÓN

Composición de especies

En el manejo de recursos forestales, la diversidad y la estructura son variables que aportan bases para la toma de decisiones en la silvicultura, manejo y aprovechamiento, así lo mencionan (García & Sánchez, 2005); López-Hernández *et al.* (2017); Flores-Morales *et al.* (2022). Estos últimos autores, reportan 24 especies y siete familias en su estudio "Diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo manejo en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México", resultados semejantes en el tratamiento de selección del presente trabajo. ya que el de referencia también está manejado con MMOBI con el tratamiento de selección.

Las familias representadas en los métodos de manejo analizados coinciden con las reportadas por García Arévalo & González Elizondo (1998) Graciano-Ávila *et al.* (2017) para las cadenas montañosas de Durango, dominadas por Pinaceae y Fagaceae. Las especies con mayor abundancia pertenecen al género *Pinus*, concordando con López-Hernández *et al.* (2017) que mencionan a este género como el de mayor abundancia en los bosques templados. El número de especies resultó mayor que el reportado por Graciano-Ávila *et al.* (2020) de 16 especies en 4 familias, en el estudio de cambios estructurales de la vegetación arbórea en un bosque templado de Durango, México con MMOBI.

Los más de 40 estudios revisados por Monárrez-González *et al.* (2018) con respecto al manejo de ecosistemas y la diversidad, donde se destaca que los tratamientos silvícolas modifican la estructura y diversidad, coinciden con los resultados de este trabajo, ya que se demuestra que al aplicar MDS se modifica la riqueza de especies, aunque faltaría comparar con rodales donde no se ha realizado ningún tipo de manejo. Algunos autores encontraron una relación entre el manejo forestal y la diversidad arbórea (Solís-Moreno *et al.*, 2006; Alanís-Rodríguez *et al.*, 2010; Leyva-López *et al.*, 2010 y Graciano-Ávila *et al.*, 2020), donde se modifica la riqueza, pero se incrementa después del manejo por reclutamiento de rodales adyacentes o por los tipos de propagación vegetativa de algunas especies (Graciano, 2001 y Hernández-Salas *et al.*, 2013).

Parámetros estructurales

La diferencia estructural encontrada entre sitios con MMOBI y MDS es consistente con la estructura documentada por diversos autores como Graciano (2001), Solís-Moreno *et al.* (2006), Hernández-Salas *et al.* (2013), Graciano-Ávila *et al.* (2017, 2020), Flores-Morales *et al.* (2022) y Silva-González *et al.* (2021) en bosques templados. Estas conclusiones semejantes se deben a que el área de estudio está localizada en la llamada Región de El Salto, donde a nivel paisaje comparten factores abióticos como algunas características geofísicas, por lo que se prescriben los mismos tratamientos silvícolas, bajo los dos tipos de manejo analizados.

Los resultados obtenidos en densidad coinciden con los citados por Delgado Zamora *et al.* (2016) y Graciano-Ávila *et al.* (2017) de 565 y 575 árboles ha^{-1}, en bosques templados de Durango. Silva-García *et al.* (2022), en su trabajo sobre la influencia de la altitud y orientación geográfica en la estructura y composición de un bosque templado reportan densidades y áreas basales que coinciden con los resultados de este trabajo en un intervalo altitudinal de 2400 a 2500 m s.n.m. Flores-Morales *et al.* (2022), reporta a *P. cooperi* con 158 árboles ha^{-1}, *Q. Sideroxyla* con 130 árboles ha^{-1} y al *P. durangensis* con 75 árboles ha^{-1} como las especies de mayor densidad en un trabajo similar en bosques de Durango. Por el contrario, (López-Hernández *et al.* (2017) registraron valores más bajos, de 389 árboles ha^{-1} y 11 especies en bosques del estado de Puebla, lo cual puede atribuirse a que los bosques evaluados presentan actividades más intensivas de aprovechamiento, en comparación con las del presente estudio.

Silva-García *et al.* (2022) reportan que, al aumentar la altitud, el área basal aumenta, asimismo, también mencionan que la orientación y la pendiente pueden influir en la productividad de diversas áreas. Los resultados de este estudio muestran que el área basal total es mayor en aclareos

con 21.12 m^2 ha^{-1}. esto se debe a que, desde el punto de vista fisiológico, al abrir la masa, se incrementa la cantidad de luz solar que detona una mayor tasa fotosintética y por lo tanto mayor desarrollo, sin embargo, no hay diferencias significativas por orientación geográfica. Estos autores concluyen que las características topográficas influyen en la estructura y riqueza de especies, que la mayor diversidad florística se encuentra en altitudes bajas y exposiciones sur. Los resultados son similares a los estimados por (Graciano-Ávila *et al.* (2017), quienes calcularon un área basal de 23.54 m^2 ha^{-1} en bosques templados de Durango con MMOBI. El área basal estimada es mayor a la encontrada por Caballero-Cruz *et al.* (2022) quienes obtuvieron valores de (22.21, 19.30 y 32.28 m^2 ha^{-1}) en el análisis de la estructura y diversidad arbórea de bosques templados en la ladera oriental del volcán Iztaccíhuatl, México. También es superior al reportado por Dávila-Lara *et al.* (2019), para un bosque templado en San Luis Potosí y similar a lo registrado para bosques templados de Nuevo León por Ramos-Hernández *et al.* (2024) **y** en Chihuahua por Hernández-Salas *et al.* (2013), es decir que los bosques de Durango presentan mayores dominancias (área basal total por especies).

Los resultados del IVI, muestran que en selección con MMOBI *P. durangensis* presenta la mayor importancia relativa (26%), sin embargo, en sitios con aclareos del MDS, se observó que *P. cooperi* llega a tener hasta más del 40% de IVI. Graciano-Ávila *et al.* (2017) reportan que *P. Cooperi, P. durangensis* y *Q. sideroxyla* ocupan el 26, 23 y 15% respectivamente en un bosque de Durango con MMOBI. En 2020 en el estudio "Cambios estructurales de la vegetación en un bosque templado de Durango, México", estos mismos autores coinciden con las especies de mayor porcentaje de IVI (*P. durangensi*s 46%, *Q. sideroxyla* 16% y *P. cooperi* con 11%). Lo anterior obedece a que los principios del MDS es uniformizar la estructura con las especies de mejor calidad de la madera y de mayor productividad, por lo que *P. cooperi* y *P. durangensis* son las especies ideales para dichos fines. Cuando se aplica un tratamiento, se dejan espacios donde ecológicamente serán ocupados por individuos que se reclutarán para aprovechar los recursos y generalmente lo van a hacer las especies con mejor capacidad de reproducción, de competencia y de dispersión. Flores-Morales *et al.* (2022) también coinciden con que *P. cooperi* con 20%, *Q. sideroxyla* con 16% y *P. durangensis* con 11% son las especies que presentan mayores valores de IVI en los bosques templado de Durango. Domínguez-Gómez *et al.* (2018) realizaron un estudio en la zona norte de la región de El Salto, donde las condiciones de calidad de sitio son pobres y ahí encuentran que *Q. sideroxyla* con 34%, *P. teocote* y *Arbutus jalapensis* ocupan los primeros lugares en el IVI. En este estudio la orientación geográfica influyó en la riqueza de especies, así como en su productividad, ya que las orientaciones sur, sureste y suroeste ofrecen mayor cantidad de luz, favoreciendo la fotosíntesis y la oportunidad de ocupar espacios más rápidamente. La consociación de *P. cooperi* y la asociación de *P. durangensis* con otras especies de *Pinus* y *Quercus,* se cuentan entre las más representativas de la vegetación de la Sierra Madre Occidental en Durango (Delgado Zamora *et al.*, 2016).

Diversidad

Con respecto a la diversidad alfa, el índice de diversidad de Shannon de 2.3 para tratamientos de selección fueron semejantes a los estimados en bosque templados por Solís-Moreno *et al.* (2006) de 2.05, y a los de Domínguez-Gómez *et al.* (2018) quienes reportaron 2.53, fue inferior al de López-Hernández *et al.* (2017) de 3.94, para bosques templado de Puebla, también a los reportados por Graciano-Ávila *et al.* (2017) en bosques de la misma región que el área de estudio que fueron de 5.75. Estos resultados muestran que el MMOBI permite que, con el tratamiento de selección, se mantenga la biodiversidad, ya que se observó que la composición florística no se ve afectada, faltaría estudiar dicha diversidad a través de rasgos funcionales para comprobar que se conservan los procesos y servicios ecosistémicos. El índice de Shannon para aclareos de 1.6, fue muy similar a los 1.91 y 1.51 encontrados por Dávila-Lara *et al.* (2019), en bosques templados de San Luís Potosí. Los resultados también muestran mayor diversidad de la Sierra Madre Occidental que la Oriental, ya que Ramos-Hernández *et al.* (2024) muestran índices de Shannon-Wiener de 1.6, 1.24 y 1.15 para bosques de pino, encino pino y encino respectivamente en la Sierra Madre Oriental. El número efectivo de especies (^1D) fue más alto para selección con MMOBI (11.36) que en aclareos con MDS (5.9), estos valores concuerdan con los trabajos

reportados por Solís-Moreno *et al.* (2006), Graciano-Ávila *et al.* (2017) y Domínguez-Gómez *et al.* (2018) donde los valores más altos son para bosques irregulares y más antiguos, tal como el patrón general para matorrales encontrado en estudios donde las comunidades de plantas más antiguas tienen mayor riqueza y diversidad de especies (Alanís-Rodríguez *et al.*, 2018, 2023). El complemento de Simpson se utilizó para describir cual tratamiento es el más diverso, encontrando valores que van desde 0.56 a 0.87, más altos que los que reporta Solís-Moreno *et al.* (2006) y parecidos a los de López-(Hernández-Salas *et al.*, 2013 y Graciano-Ávila *et al.*, 2017).
Los resultados de este trabajo coinciden con los de Flores-González *et al.* (2021), donde demuestran que no existen diferencias significativas en la dominancia y abundancia, sin embargo, a diferencia de los resultados de este autor donde no encontró diferencias entre la riqueza con aclareos, en este estudio si presentaron diferencias, reduciendo el número de especies.

Similitud Florística

A través del algoritmo de Bray Curtis se muestra que algunos tratamientos comparten varias especies entre orientaciones, quizás por la intensidad de luz y la cantidad de sombra y humedad, tal como lo consideran Martínez-Pastur *et al.* (2007) donde mencionan que la prescripción de métodos silvícolas se basa para mantener un equilibrio entre la apertura del dosel para la llegada de la lluvia al suelo y favorecer el ingreso de luz, así como para mantener una cobertura arbórea para la protección y la generación de semillas. Siles *et al.* (2017) mencionan que la orientación, la inclinación y la altitud, tienen gran influencia en la composición florística y la riqueza de especies. Para orientaciones sur se presentó mayor riqueza en los tratamientos de Selección, donde aparecieron más especies de hoja ancha que en comparación con las orientaciones Norte donde *P. cooperi* y *P. durangensis* son los dominantes en Aclareos, esto se debe a que las condiciones geográficas y factores abióticos del área de estudio son favorables para el desarrollo de estas especies, principalmente en orientaciones norte. La asociación es mayor a la obtenida por Ramos-Hernández *et al.* (2024) que fue de 21% en bosques de la Sierra Madre Oriental. Los resultados también prueban que la similitud entre comunidades está ligada a la altitud y orientación geográfica, como lo dice Chust *et al.* (2006) y Silva-García *et al.* (2022) que va de 46 a 65%, donde estos factores pueden determinar las especies que deberán de adaptarse a diferentes comunidades. La similitud depende en gran medida de la adaptación de los taxones (Hernández-Salas *et al.* 2013) y a las condiciones naturales y de disturbio del hábitat (Delgado-Zamora *et al.*, 2016). Luna-Bautista *et al.* (2015) mencionan que la similitud de especies aumenta con el tiempo de aplicación de tratamientos silvícolas, debido a los factores bióticos y abióticos asociados al ecosistema. Domínguez-Gómez *et al.* (2018) reportan baja similitud en el dendrograma de ordenación Bray-Curtis al estudiar la estructura y composición de la vegetación en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental, y esto se atribuye a las condiciones del sitio y a los métodos de manejo.

MMOBI y MDS

Solís-Moreno *et al.* (2006) en su estudio sobre el efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México, concluyen también como los resultados de este trabajo que en los tratamientos de selección (MMOBI) existe mayor mezcla y diversidad de especies que en aquellos sitios donde se aplican cortas por aclareos (MDS). Silva-González *et al.* (2021), realizaron un estudio del efecto de tratamientos silvícolas en la diversidad y estructura forestal en bosques templados bajo manejo en Durango, en el cual concluyen que el aprovechamiento forestal no modifica la diversidad y estructura de especies del estrato arbóreo, esto contrasta con los resultados obtenidos en el presente trabajo donde no se observan diferencias en ciertos parámetros estructurales como en la dominancia y abundancia, pero si en la diversidad de especies.
Hernández-Salas *et al.* (2013), realizaron una investigación sobre los cambios en la estructura y composición del bosque bajo dos tratamientos silvícolas en Oaxaca, los resultados demostraron que en las zonas de aprovechamiento forestal, después de la aplicación de los tratamientos, se formó un sólo tipo de bosque del género *Pinus*, por lo que las tendencias de los resultados del presente trabajo demuestran que si se sigue utilizando el MDS a través de aclareos, se debe

Núm. 60: 141-161 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

considerar la composición de especies, dado que pueden desaparecer especies diferentes a las pináceas que comparten hábitat de manera natural.

Bhat *et al.* (2020) concluyen que la orientación geográfica influye en la riqueza, abundancia y dominancia de las especies, así como en la distribución en las cadenas montañosas. Es necesario seguir evaluando dichos cambios a nivel rodal, haciendo énfasis en las principales orientaciones, ya que las comunidades vegetales difieren de acuerdo a su orientación geográfica (Santiago *et al.*, 2019).

La aplicación del MDS en superficies mayores, requiere de evaluaciones para entender los cambios en la estructura a largo plazo. Los resultados también muestran que se requiere el conocimiento de factores ecológicos que propicien una buena diversidad de especies no compartidas entre MMOBI y MDS para el apoyo de acciones efectivas de regeneración natural de las especies sensibles a la aplicación del MDS, tal como lo menciona Ramírez-Marcial *et al.* (2001) y Pérez-López *et al.* (2020) en su estudio sobre los efectos del "Método de Desarrollo Silvícola" sobre la diversidad arbórea en bosques húmedos de montaña del norte de Chiapas, México, donde registran principalmente efectos de bajo impacto sobre los principales parámetros de la estructura y diversidad.

CONCLUSIONES

El método de manejo es determinante para la composición florística, la riqueza y la estructura silvícola dasométrica, ya que el MMOBI a través del tratamiento de selección, se puede considerar como una técnica conservadora que promueve la permanencia de la diversidad y mantiene una estructura heterogénea y el MDS a través de los aclareos reduce la riqueza y modifica los parámetros estructurales de dominancia, densidad, frecuencia y valor de importancia, manteniendo una estructura homogénea.

Los resultados indican que dentro de las áreas evaluadas en las diferentes orientaciones geográficas y por método de manejo se presentaron alunas diferencias en cuanto a la diversidad, lo que hace suponer que la orientación influye en la riqueza y diversidad, densidad e IVI pero no así en los parámetros de área basal y cobertura. Es importante tomar medidas de conservación de las especies con valores de IVI bajos al momento de hacer el manejo para que se conserve la riqueza de los bosques. Estas especies son: *Q. candicans, Pseudotsuga* spp en Selección y Selección N NE NO al igual que *el P. lumholtzii, Q. fulva, Q. candicans* y *Q. urbanii* en Selección S SE SO.

El impacto de los dos tipos de manejo MMOBI y MDS, así como de sus tratamientos sobre la conservación de la diversidad vegetal y la estructura está relacionado con la intensidad y la calidad productiva del bosque, ya que de esto depende su resiliencia para mantener dicha estructura.

AGRADECIMIENTOS

JJGL agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de estudios de doctorado otorgada y al Tecnológico Nacional de México, Campus El Salto y al Colegio de Bachilleres del Estado de Durango por las facilidades para realizar sus estudios de Doctorado. CAMA agradece al CONAHCYT por la asignación de estancia posdoctoral.

LITERATURA CITADA

Aguirre- Calderón Ó. A. (2015). Manejo forestal en el Siglo XXI. Madera y Bosques, 21 81), 17–28.

Alanís-Rodríguez, E., Aranda-Ramos, R., Mata-Balderas, J. M., Canizales-Velázquez, P. A., Jiménez-Pérez, J., Uvalle-Sauceda, J. I., Valdecantos-Dema, A., & Ruiz-Bautista, M. G.

(2010). Riqueza y diversidad de especies leñosas del bosque tropical caducifolio en San Luis Potosí, México.

Alanís-Rodríguez, E., Martínez-Adriano, C. A., Sanchez-Castillo, L., Rubio-Camacho, E. A., & Valdecantos, A. (2023). Land abandonment as driver of woody vegetation dynamics in Tamaulipan thornscrub at Northeastern Mexico. PeerJ, 11. https://doi.org/10.7717/PEERJ.15438/

Alanís-Rodríguez, E., Valdecantos-Dema, A., Canizales-Velázquez, P. A., Collantes Chávez-Costa, A., Rubio-Camacho, E., Mora-Olivo, A., Alanís-Rodríguez, E., Valdecantos-Dema, A., Canizales-Velázquez, P. A., Collantes Chávez-Costa, A., Rubio-Camacho, E., & Mora-Olivo, A. (2018). Análisis estructural de un área agroforestal en una porción del matorral xerófilo del noreste de México. Acta Botánica Mexicana, 2018(125), 133–156. https://doi.org/10.21829/ABM125.2018.1329

Ávila-Márquez H. L., C.-R. J. (2021). Instructivo para el llenado de datos de inventario con fines de elaboración de programas de manejo forestal (versión Durango). 1–25.

Bettinger, P., Boston, K., Siry, J. P., & Grebner, D. L. (2017). Forest Management and Planning: Second Edition. Forest Management and Planning: Second Edition, 1–349. https://www.researchgate.net/publication/312136918_Forest_Management_and_Planning_Second_Edition

Bhat, J. A., Kumar, M., Negi, A. K., Todaria, N. P., Malik, Z. A., Pala, N. A., Kumar, A., & Shukla, G. (2020). Species diversity of woody vegetation along altitudinal gradient of the Western Himalayas. Global Ecology and Conservation, 24, e01302. https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2020.E01302

Bray, J. R., & Curtis, J. T. (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. Ecological Monographs, 27(4), 325–349. https://doi.org/10.2307/1942268

Caballero-Cruz, P., Treviño-Garza, E. J., Mata-Balderas, J. M., Alanís-Rodríguez, E., Yerena-Yamallel, J. I., Cuéllar-Rodríguez, L. G.C (2022). Análisis de la estructura y diversidad arbórea de bosques templados en la ladera oriental del volcán Iztaccíhuatl, México. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, *13*(71), 76–102. https://doi.org/10.29298/RMCF.V13I71.1253

Carlos-Monárrez-González, J., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Antonio Márquez-Linares, M., del, M., & González-Elizondo, S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. Madera y Bosques, 24(2). https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421569

Castellanos, B. J. F. (2008). Composición y estructura de bosques de pino encino bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. Facultad de Ciencias Forestales, UANL.

Chust, G., Chave, J., Condit, R. S., Aguilar, S., Lao, S., & Pérez, R. A. (2006). Determinants and spatial modeling of tree B-diversity in a tropical forest landscape in Panama. Journal of Vegetation Science, 17(1), 83–92. https://doi.org/10.1111/J.1654-1103.2006.TB02426.X

Corral Rivas, J. J., Aguirre Calderon, O. A., Jimenez Perez, J., & Corral Rivas, S. (2005). An analysis of the forest utilization effect on the structural diversity in «El Cielo» cloud forest, Tamaulipas, Mexico. Forest Systems, 14(2), 217–228. https://doi.org/10.5424/SRF/2005142-00885

Cultid-Medina C, & Escobar F. (2019). (PDF) Pautas para la estimación y comparación estadística de la diversidad biológica (qD). https://www.researchgate.net/publication/340104672

Dávila-Lara, M. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Jurado-Ybarra, E., Treviño-Garza, E., González-Tagle, M. A., & Trincado-Villagrán, G. F. (2019). Estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques templados de San Luis Potosí, México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 6(18). https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2112

Delgado Zamora, M., Alfredo, D., Silerio, H., Alonso, S., Quiñones, M., Daniela, M., Leandro, P., Leticia, N., Rentería, R., Isela, F., Corral, R., Hernández, V., Ituriel, A. & González, E, MS. (2016). Diversidad y estructura arbórea de dos rodales en Pueblo Nuevo,

Durango. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63445804007

Domínguez-Gómez, T. G., Hernández-González, B. N., González-Rodríguez, H., Cantú-Silva, I., Alanís-Rodríguez, E., & Alvarado, M. del S. (2018). Estructura y composición de la vegetación en cuatro sitios de la Sierra Madre Occidental. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 9(50). https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.227

Flores-Morales, E. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Angeles-Pérez, G., & Huizar-Amezcua, F. (2022). Diversidad y estructura arbórea de un bosque templado bajo manejo en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México. Polibotánica, 0(54), 11–26. https://doi.org/10.18387/POLIBOTANICA.54.2

Franco-López J. (1985). Manual de Ecología (Trillas, Ed.; 1st ed., Vol. 1).

Galván-Moreno, V. S., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., Olivas-García, J. M., & Cuéllar-Rodríguez, L. G. (2024). Efecto del manejo forestal en los ecosistemas forestales: Effect of forest management on forest ecosystems. E-CUCBA, 22(22), 27–33. https://doi.org/10.32870/E-CUCBA.VI22.345

García-Arévalo, Abel., & González-Elizondo, M. Socorro. (1998). Pináceas de Durango. 179. https://books.google.com/books/about/Pin%C3%A1ceasde_Durango.html?hl=es&id=5T5iAAAAMAAJ

García, R. G. G., & Sánchez, A. R. (2005). ¿Pueden los índices de diversidad biológica ser aplicados como parámetros técnicos de la gestión forestal? Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales, 20. https://doi.org/10.31167/CSEF.V0I20.9521

González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. Acta Botanica Mexicana, 100(100), 351–403. https://doi.org/10.21829/ABM100.2012.40

Graciano, J. J. (2001). Técnicas de evaluación dasométrica y ecológica de los bosques de coníferas bajo manejo de la Sierra Madre Occidental del centro sur de Durango, México. Facultad de Ciencias Forestales, UANL.

Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Luján-Soto, J. E. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del noroeste de México. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 4(12), 535. https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1114

Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Corral-Rivas, J. J. (2020). Structural changes of arboreal vegetation in a temperate forest of Durango, Mexico. Acta Botanica Mexicana, 127. https://doi.org/10.21829/ABM127.2020.1522

Hammer, Ø. (2001). PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica. https://www.academia.edu/3448604/PAST_paleontological_statistics_software_package_for_education_and_data_analysis

Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., & Domínguez-Pereda, L. A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente, 19(2), 189–199. https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2012.08.052

INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Serie II Continuo Nacional Durango. Escala 1:250 000.

Leyva-López, J. C., Velázquez-Martínez, A., & Ángeles-Pérez, G. (2010). Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pinos. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, XVI (2), 227–240. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.06.038

López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, Ó. A., Alanís-Rodríguez, E., Monarrez-Gonzalez, J. C., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. Madera y Bosques, 23(1), 39–51. https://doi.org/10.21829/MYB.2017.2311518

Luján, S. J. E. (2008). Análisis estructural de los ecosistemas de *Pinus cembroides* y su aprovechamiento en el estado de Nuevo León. Facultad de Ciencias Forestales, UANL.

Luna-Bautista, L., De La Rosa, P. H., Velázquez-Martínez, A., Gómez-Guerrero, A., & Acosta-Mireles, M. (2015). El sotobosque en la composición y diversidad de áreas bajo manejo forestal en Santa Catarina Ixtepeji, Oaxaca. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente, 21(1), 109–121. https://doi.org/10.5154/R.RCHSCFA.2014.08.037

Magurran, A. E. (1988). Ecological Diversity and Its Measurement. Ecological Diversity and Its Measurement. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7358-0

Morales, E. A. F., Calderón, O. A. A., Garza, E. J. T., Tagle, M. A. G., Rodríguez, E. A., Pérez, G. Á., & Amezcua, F. H. (2022). Diversidad y estructura de un bosque templado bajo manejo en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México. Polibotánica, 0(54). https://doi.org/10.18387/Polibotanica.54.2

Moreno, C. E. (n.d.). M&T-Manuales y Tesis SEA, vol. 1. Primera Edición: 2001 Título del volumen: Métodos para medir la biodiversidad. http://entomologia.rediris.es/sea

Moreno, C. E. (2019). La biodiversidad en un mundo cambiante: Fundamentos teóricos y metodológicos para su estudio (Libermex, Ed.).

Martínez Pastur G, MV Lencinas, PL Peri, M Arena. 2007. Photosynthetic plasticity of *Nothofagus pumilio* seedlings to light intensity and soil moisture. *Forest Ecology and Management* 243(2): 274-282.

Návar-Cháidez, J. de J., & González-Elizondo, S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. Polibotánica, 27(27), 71–87. https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/785

Pérez-López, R. I., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., Toledo-Aceves, T., Pérez-López, R. I., González-Espinosa, M., Ramírez-Marcial, N., & Toledo-Aceves, T. (2020). Efectos del "Método de Desarrollo Silvícola" sobre la diversidad arbórea en bosques húmedos de montaña del norte de Chiapas, México. Revista Mexicana de Biodiversidad, 91(4). https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2020.91.3326

Quiñónez Barraza, G., Cobos, F. C., Vargas Larreta, B., & Hernández, F. J. (2012). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. Diameter, height and volume estimation from the stump of forest species of Durango State. Revista mexicana de ciencias forestales, 3(9), 23-39. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322012000100003

Ramírez-Marcial, N., González-Espinosa, M., & Williams-Linera, G. (2001). Anthropogenic disturbance and tree diversity in Montane Rain Forests in Chiapas, Mexico. Forest Ecology and Management, 154(1–2), 311–326. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00639-3

Ramos-Hernández, C. G., López-Hernández, J. M., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., & González-Rodríguez, H. (2024). Estructura y diversidad en tres ecosistemas forestales del noreste de México. In Polibotánica (Vol. 0, Issue 57). https://doi.org/10.18387/polibotanica.57.3

Santiago, R. R., Pérez, G. Á., De La Rosa, P. H., Alcalá, V. M. C., Escalante, O. P., & Clark-Tapia, R. (2019). Efectos del aprovechamiento forestal en la estructura, diversidad y dinámica de rodales mixtos en la Sierra Juárez de Oaxaca, México. Madera y Bosques, 25(3). https://doi.org/10.21829/MYB.2019.2531818

Saraçli, S., Doğan, N., & Doğan, I. (2013). Comparison of hierarchical cluster analysis methods by cophenetic correlation. Journal of Inequalities and Applications, 2013(1), 1–8. https://doi.org/10.1186/1029-242X-2013-203/TABLES/2

Siles G., P., T. A. Patricia, F. A. Rugama, L. Alaniz y W. O. González. 2017. Composición florística, estructura y biomasa de los bosques de Pino-Encino en la reserva Santa Rosa,

Recibido:
3/agosto/2024

Aceptado:
12/enero/2025

Tisey, Estelí, Nicaragua. Revista de Biologia Tropical 65 (2): 763–776. https://doi.org/10.15517/rbt.v65i2.22928

Silva-García, J. E., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodriguez, E., Jurado-Ybarra, E., Jiménez-Pérez, J., Vargas-Larreta, B., & Rivas, J. J. C. (2022). Influencia de la altitud y exposición en la estructura y composición de un bosque templado en Durango. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 13(70), 64–84. https://doi.org/10.29298/RMCF.V13I70.1163

Silva-González, E., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Alanís-Rodríguez, E., & Corral-Rivas, J. J. (2021). Efecto de tratamientos silvícolas en la diversidad y estructura forestal en bosques templados bajo manejo en Durango, México. Madera y Bosques, 27(2). https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722082

Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity [16]. Nature, 163(4148), 688. https://doi.org/10.1038/163688A0

Solís-Moreno, R., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Jurado-Ybarra, E., & Corral-Rivas, J. (2006). Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México. Madera y Bosques, 12(2), 49–64. https://doi.org/10.21829/MYB.2006.1221242

UPSE. (2007). Programa de manejo forestal sustentable 2007- 2016.

WFO's Release World Flora Online. (2024). https://about.worldfloraonline.org/june-2024-release

Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. taxon, 21(2–3), 213–251. https://doi.org/10.2307/1218190

Zúñiga Vásquez, J. M., Martínez López, E. A., Navarrete Gallardo, C., Graciano Luna, J. d. J., Maldonado Ayala, D., & Cano Mejía, B. (2018). Análisis ecológico de un área de pago por servicios ambientales hidrológicos en el ejido La Ciudad, Pueblo Nuevo, Durango, México. Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes, 73, 27–36. https://doi.org/10.33064/IYCUAA201873204

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO Y NITRÓGENO EN LUVISOL BAJO DIFERENTES USOS DE SUELO EN OAXACA, MÉXICO

ORGANIC CARBON AND NITROGEN STOCKS IN LUVISOL UNDER DIFFERENT LAND USES IN OAXACA, MEXICO

Sandoval García, C., I. Cantú Silva

RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO Y NITRÓGENO EN LUVISOL BAJO DIFERENTES USOS DE SUELO EN OAXACA, MÉXICO
ORGANIC CARBON AND NITROGEN STOCKS IN LUVISOL UNDER DIFFERENT LAND USES IN OAXACA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 163-176 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.10

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 163-176 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Reservas de carbono orgánico y nitrógeno en Luvisol bajo diferentes usos de suelo en Oaxaca, México

Organic carbon and nitrogen stocks in Luvisol under different land uses in Oaxaca, Mexico

Celestino Sandoval García / celestinosandoval@gmail.com
Universidad del Mar, campus Puerto Escondido. Carretera a Oaxaca Vía Sola de Vega, km 1.5. Colonia Sector Universidad. C.P. 71980 Puerto Escondido, San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca, México

Israel Cantú Silva
Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales Carretera Nacional 85, Km. 145, Linares, Nuevo León México. C.P. 67700

Sandoval García, C., I. Cantú Silva

RESERVAS DE CARBONO ORGÁNICO Y NITRÓGENO EN LUVISOL BAJO DIFERENTES USOS DE SUELO EN OAXACA, MÉXICO

ORGANIC CARBON AND NITROGEN STOCKS IN LUVISOL UNDER DIFFERENT LAND USES IN OAXACA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 163-176. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.10

RESUMEN: Para la fertilidad de un suelo se requiere de información sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas. Debido a la escasa información al respecto para la Sierra Sur de Oaxaca se realizó la investigación con el objetivo de determinar el contenido y reserva de carbono orgánico y nitrógeno en un Luvisol, bajo diferentes usos del suelo: pastizal, agrícola, plantación de pino, bosque de pino (control) y agropecuario, en la microcuenca Río La Venta, Copalita, Oaxaca, México. Se colectaron cuatro muestras compuestas por cada uso de suelo, a profundidades de 0-10 y 10-30 cm, respectivamente. Para determinar el contenido de materia orgánica del suelo (MOS), carbono orgánico del suelo (COS, % y Mg ha^{-1}) se utilizó el método de Walkley/Black y para evaluar el nitrógeno total (Nt) fue mediante el método de Kjeldahl y se estimó la relación C:N. Se analizó el contenido de materia orgánica del suelo (MOS), carbono orgánico del suelo (COS, % y Mg ha^{-1}) y nitrógeno total (Nt, % y Mg ha^{-1}) y se estimó la relación C:N. Los resultados del contenido y reserva de COS y Nt para la profundidad de 0 a 10 cm fueron de 5.33-0.35% y 55.11-3.69 Mg ha^{-1} (agrícola), 6.39-0.44% y 50.59-3.50 Mg ha^{-1} (plantación de pino), 6.69-0.44% y 66.01-4.36 Mg ha^{-1} (agropecuario), 8.37-0.50% y 64.98-3.82 Mg ha^{-1} (pastizal), 9.11-0.54% y 56.91-3.39 Mg ha^{-1} (bosque de pino), respectivamente. Para la profundidad de 10-30 cm se observó que los valores disminuyeron. Los valores de relación C:N variaron de 14.21 a 17.1 en ambas profundidades. Los resultados mostraron una disminución en el COS y Nt del suelo, con respecto al uso original que es bosque de pino, por lo que es importante mantener la cobertura forestal, mediante prácticas de manejo como la silvicultura comunitaria, lo cual permitirá la conservación de los bosques y la disposición de materia orgánica en el suelo.
Palabras clave: Agropecuario, bosque de pino, Carbono orgánico del suelo, materia orgánica, Pastizal, Subcuenca Copalita, uso agrícola.

ABSTRACT: To the fertility of soil, information on its physical, chemical, and biological properties is required. However, the scarce information in this regard for the Sierra Sur de Oaxaca, the following research was carried out to evaluate the content and reserve of organic carbon and nitrogen in a Luvisol, in different land uses: pasture, agricultural, pine plantation, pine forest (control) and agricultural-livestock, in the Río La Venta micro-watershed, Copalita, Oaxaca, Mexico. Four composite samples were collected for each land use, at depths 0-10 and 10-30 cm respectively. To determine the soil organic matter (SOM), soil organic carbon (SOC, % and Mg ha^{-1}) content, the Walkley/Black method was used, and to evaluate total nitrogen (TN), the Kjeldahl method was used, and the C:N ratio was estimated. The soil organic matter (SOM) content, soil organic carbon (SOC, % y Mg ha^{-1}) and total nitrogen (Nt, % and Mg ha-1) were analyzed and the C:N ratio was estimated. The results of the content and reserve of SOC and Nt for the depth from

0 to 10 cm were 5.33-0.35% and 55.11-3.69 Mg ha^{-1} (agricultural), 6.39-0.44% and 50.59-3.50 Mg ha^{-1} (plantation of pine), 6.69-0.44% and 66.01-4.36 Mg ha-1 (agricultural-livestock), 8.37-0.50% and 64.98-3.82 Mg ha^{-1} (grassland), 9.11-0.54% and 56.91-3.39 Mg ha^{-1} (forest pine), respectively. For the depth of 10-30 cm the values decreased. The average C:N ratio values varied from 14.21 to 17.1 at both depths. The results showed a decrease in soil SOC and Nt compared to the original pine forest use. Therefore, it is important to maintain forest cover through management practices such as community forestry, which will allow for forest conservation and the disposition of organic matter into the soil.
Key words: Agricultural-livestock, pine forest, Soil organic carbon, organic matter, Grassland, Copalita Sub-basin, agricultural.

INTRODUCCIÓN

El suelo es el recurso del cual depende la humanidad, por los diferentes beneficios que aportan, no obstante, ha sufrido un deterioro en los últimos años debido al crecimiento de la población, misma que demanda una mayor cantidad de bienes y servicios, lo cual está propiciando los cambios de uso del suelo para la agricultura, ganadería y asentamientos humanos (FAO, 2015; Leija-Loredo *et al*., 2016; Nene Preciado *et al*., 2017).

El carbono orgánico del suelo (COS) y el nitrógeno total (Nt) son elementos importantes para el desarrollo de los diferentes tipos de vegetación. La calidad del suelo está relacionada con la cantidad de estos elementos que son secuestrados (FAO, 2017), además los diferentes usos del suelo juegan un papel primordial en la distribución y cantidad de dichos elementos (Burbano Orjuela, 2018; Xue & An, 2018). Asimismo, gran parte de la vegetación regula su crecimiento a través de la fijación del carbono (C) y el nitrógeno (N) por medio de la fotosíntesis (Lv *et al*., 2021). Las reservas más importantes de carbono se encuentran en el suelo, contiene más que la vegetación terrestre y el carbono orgánico en conjunto; sin embargo, es uno de los recursos más vulnerables ante el cambio climático, el cambio de uso de suelo, la erosión y la degradación (FAO, 2017). Se ha estimado que la reserva de carbono en el suelo es de alrededor de 2 300 PgC en los primeros tres metros de profundidad (FAO, 2017). No obstante, las diferentes actividades antropogénicas, han provocado una pérdida de esta reserva, ya que se estima que, en las primeras décadas de cultivarse el suelo, principalmente por la agricultura, se libera a la atmosfera más del 50 % de carbono (Amundson *et al*., 2015).

Por otra parte, un análisis sobre la dinámica del carbono orgánico en el suelo reveló que esta depende de varios factores, entre ellos el clima, el origen del suelo, el manejo actual e histórico del sistema de producción y las características específicas de cada ecosistema. Además, es común que los estudios se enfoquen en la sustitución de la vegetación, sin considerar el impacto acumulativo a largo plazo. Esto subraya la necesidad de investigaciones más integrales que evalúen los efectos del manejo del suelo y los cambios en la vegetación sobre la dinámica del carbono (Galicia *et al*., 2016).

Un estudio realizado en el sureste de México, sobre el almacenamiento de carbono reveló un importante potencial tanto en la vegetación como en los suelos de los bosques templados en el secuestro de carbono de la atmósfera, donde encontraron valores estimados entre 200 y 327 Mg ha^{-1}, lo que subraya la capacidad de estos ecosistemas para retener carbono de manera significativa (Leyva-Pablo *et al*., 2021). Estos hallazgos indican la importancia crucial del manejo sostenible del suelo y vegetación, ya que el uso adecuado de estos recursos es fundamental para maximizar su capacidad de almacenamiento de carbono y mitigar los efectos del cambio climático (Monreal *et al*., 2005).

En México, los Luvisoles cubren una superficie de 17.7 millones de hectáreas, principalmente en los estados de Guerrero, Oaxaca, Campeche, Península de Yucatán, así como la Sierra Madre Occidental, siendo uno de los suelos más fértiles, usado principalmente para la actividad agrícola (INEGI, 2013; IUSS, 2015).

En el estado de Oaxaca se ha practicado el cambio de uso del suelo de forestal a agrícola, incorporando áreas que originalmente fueron bosques en laderas con elevadas pendientes (20-60%) para el cultivo de maíz, siendo una agricultura de subsistencia a pequeña escala debido a

Núm. 60: 163-176 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

las condiciones socioeconómicas y a la tenencia de la tierra, en el cual aproximadamente el 80% del uso agrícola se realiza en laderas (Vergara-Sánchez *et al*., 2005).
En la Sierra Sur del estado de Oaxaca, se ha dado el cambio de uso de suelo de forestal a agrícola y pastizal, y posteriormente a otros usos, en laderas, y se desconoce el efecto de dicho cambio en las propiedades químicas del suelo. Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el contenido de materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno en un Luvisol, bajo diferentes usos del suelo: pastizal, agrícola, plantación de pino, bosque de pino (control) y agropecuario, en la microcuenca Río La Venta, Copalita, Oaxaca, México.

MÉTODOS

Área de estudio

Se encuentra en la parte alta de la microcuenca Río La Venta, Copalita, Oaxaca, México, en las coordenadas UTM Zona 14: 776000 E y 1792800 N (Figura 1). Presenta un clima templado húmedo (Cw) (García, 2004), con lluvias en verano, precipitación media anual mayor de 1 300 mm, con una máxima durante el mes de julio de 215 mm y mínima en febrero menor a 10 mm. La temperatura media anual de 18 a 20 °C, máxima en abril y mayo de 24 °C y mínima de enero y diciembre de 0 a 5 °C. Además, presenta un suelo de tipo Luvisol (INEGI, 2013; IUSS, 2015).

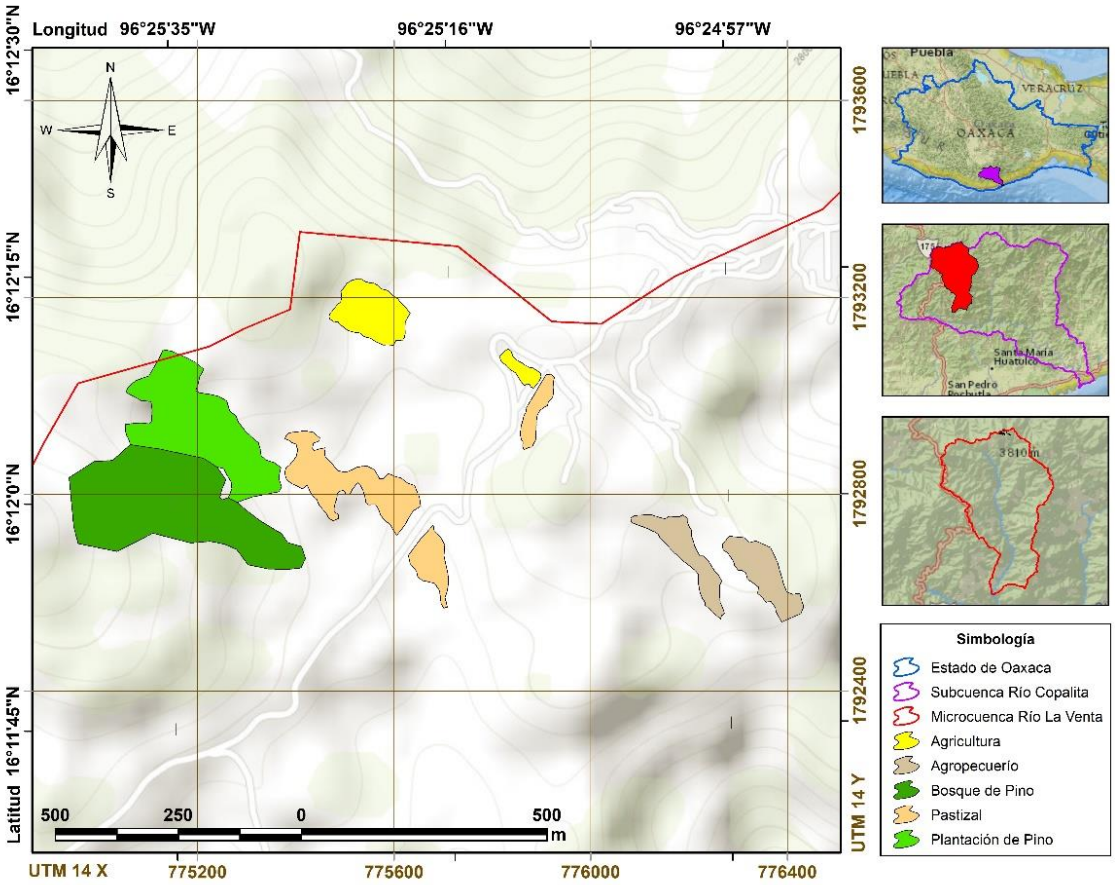


Figura 1. Ubicación del área de estudio.
Figure 1. Location of the study area.

Núm. 60: 163-176 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Usos de suelo evaluados

La evaluación se realizó en cinco áreas con diferentes usos que se extienden sobre la superficie del Luvisol, las cuales se describen a continuación (Tabla 1).

Tabla 1. Descripción y superficie de los usos del suelo.
Table 1. Description and area of land uses.

Uso de suelo	Superficie (ha)	Descripción
pastizal	8.22	Se encuentran diferentes especies nativas de pasto como son: *Bouteloua repens* (Kunth) Scribn. & Merr., *Muhlenbergia robusta* (E. Fourn.) A. Hitchc., *Panicum bulbosum* Kunth., *P. mertensii* Roth., *P. parviglume* Hack., *Paspalum convexum* Humb. & Bonpl. *ex* Flüggé (Pacheco Rivera & Dávila Aranda, 2004).
agrícola	4.15	Este uso se asocia la siembra de maíz con papa y haba.
agropecuario	5.60	Este uso está destinado al pastoreo de ganado bovino, caprino y ovino en áreas agrícolas en descanso (de uno a dos años).
plantación de pino	10.64	En este uso eran áreas agrícolas, mismas que posteriormente se convirtieron en plantaciones, estableciéndose las especies *Pinus ayacahuite* Ehrenb. *ex* Schltdl., *P. douglasiana* Martínez y *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. *et* Cham.)
bosque de pino (control)	16.56	Está compuesta principalmente por *Pinus ayacahuite* Ehrenb. *ex* Schltdl., *P. douglasiana* Martínez, *P. patula* var. *longepedunculata* Loock *ex* Martínez, *P. leiophylla* Schl. & Cham y *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. *et* Cham.) (CONAFOR, 2016).

Muestreo y análisis de suelo

Con base en las características del suelo Luvisol, cuyo nombre proviene del latín *Luere* que significa lavar. Son suelos rojos, grises o pardos que se forman a partir de una gran variedad de materiales no consolidados y que son susceptibles a la erosión cuando se encuentran en pendientes pronunciadas, además, son fértiles para la agricultura. Son comunes en clima templado húmedos, y fríos o cálidos húmedos con una marcada temporada de Lluvia y sequía, y se distribuye en la Sierra Madre Occidental, Guerrero, Oaxaca, Campeche y la Península de Yucatán (INEGI, 2013;IUSS, 2015). La topografía del área presenta una pendiente de 25% a 45%, y en cada uso del suelo se recolectaron cuatro muestras compuestas de suelo (de cuatro submuestras) a dos profundidades (0-10 cm y 10-30 cm), dando un total de 40 muestras colectadas (Cantú Silva & Yañez Díaz, 2018), mismas que fueron llevadas al laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Estas muestras se secaron a temperatura ambiente y se cribaron con mallas metálicas de 2 mm. Posteriormente se realizaron los diferentes análisis.

Determinación de Carbono y Nitrógeno en el Suelo

En la Tabla 2 se muestran las propiedades químicas evaluadas, el método de determinación y la unidad de medición utilizada.

Tabla 2. Métodos de evaluación de las propiedades químicas del suelo tipo Luvisol.
Table 2. Methods for evaluating the chemical properties of Luvisol-type soil.

Propiedad	Unidad	Método
MOS	%	Se realizó a través del método de *Walkley*/*Black* modificado
COS	%	(Woerner, 1989).
		Se aplicó el método de *Walkley*/*Black* modificado (Woerner, 1989). El contenido de carbono orgánico se obtuvo considerando que MOS tuviera el 58% de carbono (Castellanos *et al*., 2000).
Nt	%	Se evaluó a través del método *Kjeldahl*, y el análisis se realizó con base en lo propuesto por (Bremner & Mulvaney 1982).
C:N		Se estimó a partir de los datos obtenidos de COS y Nt.
DA	g cm^{-3}	Método gravimétrico (Cantú Silva & Luna Robles, 2022).

MOS = Materia orgánica del suelo; COS = Carbono orgánico del suelo; Nt = Nitrógeno total. Las variables evaluadas fueron a la profundidad de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm.
SOM = Soil organic matter; SOC = Soil organic carbon; Tn = Total nitrogen. The variables evaluated were at depths of 0 to 10 cm and 10 to 30 cm.

Reservas de Carbono Orgánico del Suelo y Nitrógeno

Para determinar la reserva de COS (Mg ha^{-1}) y Nt (Mg ha^{-1}) se utilizó el porcentaje de ambos, la densidad aparente y la profundidad del suelo, con base en las siguientes ecuaciones (Madrigal Reyes *et al*., 2019):

$$\text{COS}\ (Mg\ ha^{-1}) \quad = \text{COS\%} \times \text{DA} \times \text{Ps}$$

Donde:
COS = Carbono orgánico del suelo (Mg ha^{-1}),
COS = Contenido de carbono orgánico del suelo (%),
DA = Densidad aparente (g cm^{-3}), y
Ps = Profundidad del suelo (cm)

$$\text{Nt}\ (Mg\ ha^{-1}) = \text{Nt}\,\% \times \text{DA} \times \text{Ps}$$

Donde:
Nt = Nitrógeno total del suelo (Mg ha^{-1}),
Nt = Nitrógeno total del suelo (%),
DA = Densidad aparente (g cm^{-3}), y
Ps = Profundidad del suelo (cm)

Análisis estadístico

Las variables evaluadas se analizaron en un diseño experimental completamente al azar, para evaluar el efecto del cambio de uso del suelo y cambios por profundidad. Se aplicaron pruebas de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y homocedasticidad de Levene. Las variables que no cumplieron con ambos supuestos se aplicaron una prueba de Kruskal-Wallis ($p \leq 0.05$) y Post Hoc de corrección de Bonferroni ($p \leq 0.05$). Para la relación C:N se realizó un análisis de varianza y su respectiva prueba de Tukey. Todos los análisis estadísticos se realizaron en el programa SPSS® (Statistical Package for the Social Sciences) versión 22 (IMB, 2013).

Núm. 60: 163-176 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

RESULTADOS

El contenido de MOS, COS, Nt, relación C:N y DA, así como las reservas de COS y Nt para las profundidades de 0-10 y 10-30 cm en los cinco usos de suelo, se muestran en la Tabla 3, donde la profundidad de 0-10 cm, presentó los valores más altos para las variables evaluadas, comparado con la profundidad de 10-30 cm.

Tabla 3. Valores medios de MOS, COS, Nt, relación C:N y DA para la profundidad de 0-10 cm y 10-30 cm, en los usos de suelo evaluadas.
Table 3. Average values of SOM, SOC, Nt, C:N ratio and DA for the depth of 0-10 cm and 10-30 cm, in the evaluated land uses.

Variables	Uso de suelo/Profundidad									
	pastizal		agrícola		agropecuario		plantación de pino		bosque de pino	
	0-10	10-30	0-10	10-30	0-10	10-30	0-10	10-30	0-10	10-30
MOS (%)	14.42	10.90	9.05	7.30	11.47	10.58	10.95	8.56	15.70	9.19
COS (%)	8.37	6.40	5.33	4.31	6.69	6.29	6.39	4.97	9.11	5.32
Nt (%)	0.50	0.39	0.35	0.25	0.44	0.43	0.44	0.33	0.54	0.33
C:N	17.01	16.52	15.12	16.48	15.05	14.21	14.70	14.63	16.76	15.65
DA g cm^{-3}	0.78	0.92	1.03	1.15	0.98	1.10	0.79	0.86	0.63	0.75

MOS = Materia orgánica del suelo (%); COS = Carbono orgánico del suelo (%); Nt = Nitrógeno total (%); C:N = Relación Carbono-Nitrógeno; DA= Densidad aparente (g cm^{-3}).
SOM = Soil organic matter (%); SOC = Soil organic carbon (%); Tn = Total nitrogen (%); C:N = Carbon-nitrogen ratio; AD = Apparent density (g cm^{-3}).

Los valores más altos de MOS, COS y Nt los presentó el bosque de pino, para la profundidad de 0-10 cm, con valores promedios de 15.70, 9.11 y 0.54%, respectivamente; el uso agrícola, presentó los valores más bajos para MOS, COS y Nt, con valores promedio de 9.05, 5.33 y 0.35%, respectivamente. Para la relación C:N, los valores promedio variaron de 17.01 (pastizal) a 14.70 (plantación de pino) (Cuadro 3).

Para la profundidad de 10-30 cm, los valores más altos de MOS, COS y Nt, los presentó el pastizal, con valores promedios de 10.90, 6.40 y 0.39%, respectivamente. Contrastando con los resultados obtenidos para el uso agrícola, que presentó los valores más bajos para MOS, COS y Nt, con valores promedios de 7.30, 4.31 y 0.26%, respectivamente. Para la relación de C:N, los valores promedio variaron de 16.52 (pastizal) a 14.21 (agropecuario) (Tabla 3).

Con base en los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis se encontró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la variable MOS y COS para la profundidad de 0-10 cm (Tabla 4). Sin embargo, para la profundidad de 10-30 cm, ninguna de las variables mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Tabla 4).

Tabla 4. Prueba de H. de Kruskal-Wallis para detectar diferencias significativas entre los usos de suelo para las variables MOS, COS y Nt a la profundidad de 0 a 10 cm y de 10 a 30 cm.
Table 4. Kruskal-Wallis H. test to detect significant differences between land uses for the variables MOS, SOC and Nt at depths of 0 to 10 cm and 10 to 30 cm.

Estadístico	MOS (%)	COS (%)	Nt (%)	COS Mg ha^{-1}	Nt Mg ha^{-1}	MOS (%)	COS (%)	Nt (%)
	Profundidad 0-10 cm					Profundidad 10-30 cm		
N	20	20	20	20	20	20	20	20
Media	12.32	7.17	0.45	58.72	3.75	9.30	5.45	0.35
Mediana	11.75	6.88	0.45	57.85	3.84	9.67	5.65	0.35
X^2	15.088	15.016	10.357	4.857	5.514	6.871	7.016	8.275
Sig. Asintótica	0.005*	0.005*	0.035	0.302	0.276	0.143	0.135	0.082

MOS = Materia orgánica del suelo; COS = Carbono orgánico del suelo; Nt = Nitrógeno total; Sig. = Significancia, *= Diferencia significativa.
SOM = Soil organic matter; SOC = Soil organic carbon; Tn = Total nitrogen; Sig. = Significance, * = Significant difference.

Así mismo, se realizaron las pruebas de Post Hoc de Kruskal-Wallis para muestras independientes con comparaciones por pares con corrección de Bonferroni para usos del suelo, en las cuales las variables MOS y COS mostraron diferencias significativas en la combinación agrícola-pastizal y agrícola-bosque, y las variables MOS, COS y Nt en la combinación agrícola-bosque para la profundidad de 0-10 cm (Tabla 5). Para la profundidad de 10-30 cm, ninguna de las variables evaluadas mostró diferencias significativas de acuerdo con esta prueba.

Tabla 5. Prueba de Post Hoc de Kruskal-Wallis con corrección de Bonferroni, para detectar diferencias significativas para la variable MOS, COS y Nt a la profundidad de 0-10 cm.
Table 5. Kruskal-Wallis Post Hoc test with Bonferroni correction, to detect significant differences for the variables MOS, SOC and Nt at a depth of 0-10 cm.

Comparaciones por pares de uso del suelo	Variable		
	MOS	COS	Nt
	Sig. Ajustada	Sig. Ajustada	Sig. Ajustada
agrícola-plantación de pino	1.000	1.000	1.000
agrícola-agropecuario	1.000	1.000	0.879
agrícola-pastizal	0.025	0.025	0.180
agrícola-bosque de pino	0.007*	0.007*	0.023*
plantación de pino-agropecuario	1.000	1.000	1.000
plantación de pino-pastizal	0.776	0.882	1.000
plantación de pino-bosque	0.337	0.390	1.000
agropecuario-pastizal	1.000	1.000	1.000
agropecuario-bosque de pino	0.776	0.068	1.000
pastizal- bosque de pino	1.000	1.000	1.000

Cada fila prueba la hipótesis nula de que las distribuciones de comparación por pares de uso del suelo son iguales.
MOS = Materia orgánica del suelo; COS = Carbono orgánico del suelo; Nt = Nitrógeno total; Sig. = Significancia; *= Diferencia significativa.
Each row tests the null hypothesis that the pairwise land-use comparison distributions are equal. SOM = Soil organic matter; SOC = Soil organic carbon; Tn = Total nitrogen; Sig. = Significance; * = Significant difference.

Relación C:N

La relación C:N no evidenció diferencias significativas entre los usos de suelo (Tabla 6). Los valores promedios de la relación C:N para plantación de pino fue de 14.50, agropecuario 15.05, agrícola 15.12, bosque de pino 16.76 y pastizal 17.01, para la profundidad de 0-10 cm. Con relación a la profundidad de 10-30 cm, los valores fueron para agropecuario 14.21, plantación de pino 14.63, bosque de pino 15.65, agrícola 15.12 y pastizal 16.52.

Tabla 6. Análisis de varianza con los factores uso de suelo (FA) y profundidad (FB) y su interacción (FA×FB).
Table 6. Analysis of variance with the factors land use (FA) and depth (FB) and their interaction (FA×FB).

Variable	FA[(a)] F (4.39)	FB[(b)] F (1.39)	(FA)×(FB) F (4.39)	R^2 ajustada
C:N [(c)]	1.952	0.143	0.513	0.25
	(0.128)	(0.708)	(0.727)	

FA[(a)] = Uso de suelo; FB[(b)] = Profundidad; [(c)] = Entre paréntesis se proporciona el valor de *p*; C:N = Relación carbono.
FA(a) = Land use; FB[(b)] = Depth; [(c)] = The value of p is given in parentheses; C:N = Carbon ratio

La prueba de Tukey indicó que la relación C:N es estadísticamente igual en las dos profundidades en los usos de suelo evaluados. Sin embargo, la relación C:N fue mayor a la profundidad de 0-10 cm debido a la actividad microbiana que existen en los diferentes usos de suelo evaluado excepto para el uso agrícola, que fue mayor para la profundidad de 10-30 debido a la remoción del suelo cuando se realiza la siembra, así como a la incorporación de residuos y estiércol de ganado. El pastizal y bosque de pino son casi iguales debido que existen una existe rápida descomposición de las raíces y de la desintegración y descomposición de la materia orgánica, lo cual indica que existe más carbono disponible para los microorganismos.

Reservorio de COS (Mg ha^{-1}) en el suelo

Con base en el análisis de varianza y de la prueba de Levene, la reserva de carbono y nitrógeno total no evidencia diferencias significativas entre los usos de suelo (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis de varianza y prueba de Levene de la reserva de carbono orgánico y nitrógeno total.
Table 7. Analysis of variance and Levene's test of the organic carbon and total nitrogen stock.

Variable	*gl*	Media cuadrática	Valor *F*	Valor *P*	Prueba de *Levene*	Valor *P*
Reserva de carbono orgánico	4	0.043	0.333	0.860	0.84	0.509
Reserva de nitrógeno total	4	0.052	0.394	0.808	1.149	0.350

gl = grados de libertad.
gl = degrees of freedom.

El carbono orgánico almacenado en los primeros 10 cm de suelo para los usos evaluados fue: plantación de pino 50.59 Mg ha^{-1}, agrícola 55.11 Mg ha^{-1}, bosque de pino 56.91 Mg ha^{-1}, pastizal 64.98 Mg ha^{-1} y agropecuario 66.01 Mg ha^{-1}. El bajo almacenamiento en la plantación de pino se debe probablemente a que antes fue un área agrícola, además del aprovechamiento del carbono en el desarrollo del arbolado, mientras que el uso de suelo que presentó el mayor reservorio fue el agropecuario, esto debido que al no remover el suelo de manera continua permite que el carbono se mantenga, reduciendo su liberación y pérdida.

El carbono orgánico total almacenado en la profundidad de 0-30 cm del suelo para los usos evaluados fue: bosque de pino 148.19 Mg ha^{-1}, agrícola 154.09 Mg ha^{-1}, plantación de pino 159.99 Mg ha^{-1}, agropecuario 160.21 Mg ha^{-1} y pastizal 180.68 Mg ha^{-1}. La plantación de pino presentó el reservorio más bajo de carbono, ya que el área donde se estableció fue de uso agrícola,

mientras que el uso que mostró el mayor almacenamiento fue el pastizal, debido probablemente a la gran cantidad de raíces que genera y que se incorpora al suelo.

Reservorio de Nt (Mg ha^{-1}) en el suelo

La reserva de Nitrógeno total en los diferentes usos del suelo mostró una ligera diferencia, aunque estadísticamente no fue significativa. Los valores medio de la reserva de Nt, para la profundidad 0-10 cm fueron: bosque de pino 3.39 Mg ha^{-1}, plantación de pino 3.50 Mg ha^{-1}, agrícola 3.69 Mg ha^{-1}, pastizal 3.82 Mg ha^{-1} y agropecuario 4.36 Mg ha^{-1}.

Para la profundidad de 10-30 cm, el almacenamiento de nitrógeno fue: bosque de pino 5.87 Mg ha^{-1}, agrícola 5.95 Mg ha^{-1}, agropecuario 6.72 Mg ha^{-1}, pastizal 7.15 Mg ha^{-1} y plantación de pino 7.45 Mg ha^{-1}. Estos resultados indican que el suelo tipo Luvisol es un reservorio importante de Nitrógeno total, además que el uso original del área de estudio ha sido bosque de pino (control) y que se toma como referencia para la evaluación en la reserva del Nitrógeno total respecto a los cambios del uso del suelo.

DISCUSIÓN

El cambio de uso de suelo afecta el contenido de carbono y nitrógeno, principalmente cuando se pasa de vegetación nativa a pastizal, tal como lo señalan (Martínez Soto *et al*., 2023), quienes encontraron una reducción en COS y Nt de 23 y 26%, respectivamente. Sin embargo, para el presente estudio presentó una reducción en COS de 23% y para Nt de 22% en promedio para la profundidad de 0 a 30 cm.

En este estudio, la relación C:N fluctuó de 14.21 a 16.52%, lo que puede permitir la proliferación de microorganismos descomponedores de la materia orgánica, ya que cuentan con suficiente carbono para ser usado como fuente de energía y nitrógeno para sintetizar sus proteínas, lo que facilita la mineralización del carbono para ser aprovechado por los vegetales en los diferentes usos del suelo evaluado (Cantú Silva & Bejar Pulido, 2024).

De acuerdo con Cantú Silva & Luna Robles (2022), señalan que relaciones de C:N entre 10 y 14 evidencian una buena calidad de MOS y que potencialmente existe un adecuado funcionamiento de los microorganismos en la descomposición de la materia orgánica. Al respecto, los valores calculados en el presente estudio se encuentran por arriba de la buena calidad de mineralización.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las variables evaluadas en los diferentes usos del suelo, se observó que existe efecto por el cambio de uso de suelo para el contenido de MOS, COS y Nt para la profundidad de 0 a 10 cm. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Medina-Méndez *et al* (2019), quienes cuantificaron el contenido de materia orgánica en un suelo de tipo Luvisol en el estado de Campeche en un sistema de cultivo continuo de maíz comparado con un sistema de vegetación natural, encontrando una disminución de la materia orgánica de 5.28 a 3.59% después de 16 a 30 años de cultivo. Por otra parte, Cantú Silva & Yañez Díaz (2018), encontraron en un Vertisol que el contenido de COS y Nt fue menor en el uso agrícola; sin embargo, en matorral fue mayor para la profundidad de 0-10 cm, estos resultados fueron menores a los obtenidos en el presente estudio.

Los altos valores de COS y Nt en el bosque de pino, coinciden con lo reportado por Madrigal Reyes *et al*. (2019) quienes evaluaron estas variables encontrando valores más altos para la profundidad de 0-10 cm para bosque de pino, bosque de pino-*Alnus* y bosque de oyamel, en el cual mencionan que existe una influencia de la pendiente, la cobertura y profundidad del suelo. Vela Correa *et al* (2012), encontraron en suelos de conservación de la ciudad de México, mayor contenido de COS en suelos reforestados con *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. *et* Cham.), *Pinus* spp. y *Pinus*-*Cupressus*, sin embargo, los suelos agrícolas contenían la mitad del COS que los suelos forestales.

En el presente estudio, el pastizal fue el segundo uso con mayor contenido de las variables de MOS, COS y Nt, esto debido a la gran cantidad de raíces finas que genera año con año, lo anterior coincide con lo reportado por (Yerena Yamallel *et al*., 2014).

Karuku & Mochoge, (2016) determinaron el contenido de nitrógeno en un suelo tipo Luvisol en Kutamani, Kenia, encontrando para la profundidad de 0-15 cm un 39% de N, y para la

profundidad de 15-30 cm un 42.1% de N, los cuales son superiores a los observados en el presente estudio.

Wabusya *et al*. (2020), mencionan que la agricultura a pequeña escala reduce el contenido de COS en el suelo, y que coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio respecto al contenido de COS para el uso agrícola. Por otra parte, Soto *et al.*, (2016) realizaron una investigación en parcelas agrícolas en Tlaxcala, México, en el que evaluaron el contenido de MOS, COS y Nt, así como la relación C:N, en el cual los resultados obtenidos fueron menores a los encontrados en esta investigación para el uso agrícola.

En Buenos Aires, Argentina, se encontró que las plantaciones de pino y pastizal secundario presentaron un incremento del COS, ya que, al realizarse la reforestación de pino en áreas de pastizal, permitió mejorar el nivel de carbono en el suelo (Di Gerónimo *et al*., 2018), por lo que es una práctica recomendable para mejorar las propiedades del suelo, tal como lo están realizando algunos pequeños propietarios, ejidos y comunidades del área de estudio.

El cambio de uso del suelo influye en las variables evaluadas, en las cuales se pudo observar diferencias en el contenido de MOS, COS y Nt, lo cual coincide con las mencionadas por (Wiesmeier *et al*. (2015) en una investigación realizada sobre el impacto de diferentes usos del suelo en el almacenamiento de COS en el Sureste de Alemania, donde encontraron que los efectos del uso de la tierra se vieron fuertemente afectadas por los usos del suelo en el almacenamiento COS.

Las reservas de Carbono y Nitrógeno están influenciadas por los cambios de usos del suelo, así como de las diversas prácticas de manejo, pero también por los ciclos bioquímicos (Cocotle Romero *et al*., 2022). El contenido de nitrógeno total en todos los usos del suelo se encuentra en una valoración media, de acuerdo con la clasificación para suelos de origen volcánico que establece la NOM-02-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), lo cual indica que en el Bosque de pino y demás usos de suelo, este macronutriente está disponible para su desarrollo.

Por otra parte, Álvarez-Arteaga *et al*. (2013) estimaron el almacén de carbono orgánico en bosque montano de niebla en la Sierra Norte de Oaxaca, en el cual encontraron una mayor reserva comparado con esta investigación.

El almacenamiento de carbono orgánico del suelo tipo Luvisol en los diferentes usos varió de 50.59 a 66.01 Mg ha^{-1} a la profundidad de 10 cm. Estos valores son mayores a los reportados por (Castillo *et al.* (2016), quienes evaluaron diferentes coberturas y cultivos en la cuenca del Río Mololoa, Nayarit, México, y a los reportados por Cantú Silva & Luna Robles (2022) en un suelo tipo Umbrisol en bosque de pino encino en Durango, pero similares a los valores reportados por Álvarez-Arteaga et al. (2013) para diferentes sistemas agroforestales en el municipio Líbano, Tolima, Colombia con almacenamiento de nitrógeno total de 3.50 a 4.36 Mg ha^{-1}. Para la profundidad de 10 a 30 cm, el Luvisol acumuló 56.82% del total del COS en el bosque de pino y 72.03% en el pastizal. Asimismo, respecto al reservorio de Nitrógeno total en esta profundidad, el bosque de pino acumuló 56.56%, y la plantación de pino 71.78%.

El Luvisol en el perfil de profundidad de 0 a 30 cm tiene un alto potencial para la reserva de COS y Nt, pues la media entre los usos evaluados promedió un total de 160.63 y 10.38 Mg ha^{-1}, respectivamente. Los valores obtenidos en el presente estudio son mayores a los reportados por Martínez Soto *et al*. (2023) en dos usos de suelo a la profundidad de un metro en un suelo tipo Cambisol, en donde se observó el potencial que tienen los pastizales para la reserva de COS y Nt, así como de la vegetación de Matorral Espinoso Tamaulipeco. Así mismo, Cantú Silva & Bejar Pulido (2024), mencionan que el cambio de uso del suelo de forestal a uso agrícola tiene un efecto significativo en el reservorio de Carbono orgánico y de nitrógeno total en un suelo tipo Andosol. Por otra parte, Cantú Silva & Luna Robles (2022) señalan que los tratamientos silvícolas como Matarrasa y Arboles padre en Bosque de pino influyen en la reserva de COS y Nt, al acelerar la incorporación del material orgánico al suelo.

Finalmente, Foote *et al*. (2015), con base en una investigación realizada en Canadá y Estados Unidos, mencionan que existe un incremento en el contenido de C y N en el suelo después de dos décadas del aprovechamiento, debido a la acumulación de la materia orgánica. Lo que indica que es un proceso lento, y en este sentido la microcuenca Río La Venta, Copalita, debe mantener la cobertura forestal, debido a que es área con un alto potencial para la reserva de Carbono y Nitrógeno.

CONCLUSIONES

Existe un efecto por el cambio del uso del suelo en el contenido de las propiedades químicas evaluadas, destacando la importancia de la cobertura forestal, al ser el bosque de pino el uso de suelo que presentó los valores más altos.
El suelo tipo Luvisol en la microcuenca es un importante reservorio de COS y Nt en los diferentes usos a la profundidad de 0 a 30 cm.
Los resultados obtenidos servirán de base para la toma de decisiones en el manejo de los diferentes usos de suelo de la microcuenca Río La Venta, Copalita, Oaxaca.

LITERATURA CITADA

Álvarez-Arteaga, G., Calderón, N. E. G., Krasilnikov, P., & García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, *47*(2), 171–180.

Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. In *Science* (Vol. 348, Issue 6235). https://doi.org/10.1126/science.1261071

Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, *35*(1), 82–96. https://doi.org/10.22267/rcia.183501.85

Cantú Silva, I., & Bejar Pulido, S. J. (2024). Impacts of land use change on carbon and nitrogen stocks in an Andosol in Michoacan, Mexico. *Egyptian Journal of Soil Science*, *64*(3), 1305–1314. https://doi.org/10.21608/ejss.2024.285526.1757

Cantú Silva, I., & Luna Robles, E. O. (2022). Reservorio de Nitrógeno y relación C:N de un Umbrisol bajo manejo forestal en Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *13*(72), 82–111. https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i72.1055

Cantú Silva, I., & Yañez Díaz, M. I. (2018). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido del carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *9*(45), 122–151. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.138

Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X., & Aguilar-Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. In *Colección INCAPA*.

Castillo, L., Bojórquez, J., Hernández, A., & García, D. (2016). Contenidos de Carbono Orgánico en Suelos Bajo Diferentes Coberturas Vegetales y de Cultivo. *Cultivos Tropicales*, *37*(3), 72–78.

Cocotle Romero Lourdes, Ramírez Salazar María, & Hernández Castellanos Benito. (2022). *Impacto en la calidad del suelo mediada por el cambio de uso en el Cofre de Perote, México*. *14*, 1–8.

CONAFOR. (2016). *Estudio de cuenca de abasto para el desarrollo industrial forestal maderable de la región Copalita, Oaxaca* (A. C. Colegio de Profesionales Forestales de Oaxaca, Ed.). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/254061/Estudio_de_cuenca_de_abasto_-_Copalita_Oaxaca.pdf.

Di Gerónimo, P. F., Videla, C., Fernández, M. E., Zamuner, E. C., & Laclau, P. (2018). Cambios en propiedades químicas y bioquímicas del suelo asociados al reemplazo de pastizales naturales por Pinus radiata D. Don y rotaciones agrícolas. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, *34*(ahead), 89–101. https://doi.org/10.4067/S0719-38902018005000302

FAO. (2015). Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015. Compendio de datos. In *Food and Agriculture Organization (FAO)*.

FAO. (2017a). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto.* (Wiese Liesl, Alcantara Viridiana, Baritz Rainer, & Vargas Ronald, Eds.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura.

FAO. (2017b). Mapa de Carbono Orgánico del Suelo. *Alianza Mundial Por El Suelo*.

Foote, J. A., Boutton, T. W., & Scott, D. A. (2015). Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management. *Forest Ecology and Management*, *355*, 48–57. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.03.036

Galicia, L., Gamboa, A., Cram, S., Chávez, B., Peña, V., Saynes, V., & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana*, *34*(1), 1–29.

García, E. (2004). Modificaciones Al Sistema de Clasificación Climática de Köppen Para Adaptarlo a Las Condiciones de la República Mexicana. In *Comisión Nacional para el estudio de la Biodiversidad*.

IMB. (2013). *IBM SPSS Statistics for Windows* (22.0).

INEGI. (2013). *Carta Edafológica, Villa de Zaachila, Serie II, escala 1:2 50 000*.

IUSS. (2015). *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. I* (IUSS Working Group WRB & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Eds.; Vol. 1).

Karuku, G. N., & Mochoge, B. O. (2016). Nitrogen Forms in Three Kenyan soils Nitisols, luvisols and Ferralsols. *International Journal for Innovation Education and Research*, *4*(10), 17–30. https://doi.org/10.31686/ijier.vol4.iss10.594

Leija-Loredo, E. G., Reyes-Hernández, H., Reyes-Pérez, O., Flores-Flores, J. L., & Sahagún-Sánchez, F. J. (2016). Cambios en la cubierta vegetal, usos de la tierra y escenarios futuros en la región costera del estado de Oaxaca, México. *Madera Bosques*, *22*(1), 125–140. https://doi.org/10.21829/myb.2016.221481

Leyva-Pablo, T., De León-González, F., Etchevers-Barra, J. D., Cortés-Pérez, M., Santiago-García, W., Ponce Mendoza, A., & Fuentes Ponce, M. H. (2021). Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario. *Madera y Bosques*, *27*(4), 1–18. https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742421

Lv, P., Sun, S., Medina-Roldánd, E., Zhao, S., Hu, Y., Guo, A., & Zuo, X. (2021). Effects of habitat types on the dynamic changes in allocation in carbon and nitrogen storage of vegetation–soil system in sandy grasslands: How habitat types affect C and N allocation? *Ecology and Evolution*, *11*(13), 9079–9091. https://doi.org/10.1002/ece3.7751

Madrigal Reyes, S., Cristóbal Acevedo, D., Hernández Acosta, E., & Romo Lozano, J. L. (2019). Influencia de la cobertura, pendiente y profundidad, sobre el carbono y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *10*(51), 201–223. https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i51.113

Martínez Soto, R. A., Cantú Silva, I., Yánez Díaz, M. I., González Rodríguez, H., & Bejar Pulido, S. J. (2023). Reservorio de carbono y nitrógeno en un suelo Cambisol bajo dos usos de suelo en Linares, Nuevo León, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *14*(79), 4–30. https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i79.1339

Monreal, C. M., Etchevers, J. D., Acosta, M., Hidalgo, C., Padilla, J., López, R. M., Jiménez, L., & Velázquez, A. (2005). A method for measuring above- and below-ground C stocks in hillside landscapes. *Canadian Journal of Soil Science*, *85*(4), 523–530. https://doi.org/10.4141/s04-086

Nene Preciado, A. J., González Sansón, G., Mendoza Cantú, M. E., & Silva Bátiz, F. de A. (2017). Cambio de cobertura y uso de suelo en cuencas tropicales costeras del Pacifico Central Mexicano. *Investigaciones Geográficas*, *94*, 64–81. https://doi.org/10.14350/rig.56770

Pacheco Rivera, D., & Dávila Aranda, P. (2004). Sinopsis de las gramíneas de Oaxaca, México. *Acta Botanica Mexicana*, *69*, 83–114. https://doi.org/10.21829/abm69.2004.982

Page, A. L. (1982). Methods of soil analysis-Part 2: Chemical and Microbiological properties. (2nd edition). *Am. Soc. Agron. Inc. Publ.Madison, USA*, *9*(2), 1–1159.

SEMARNAT. (2002). NORMA Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. *Diario Oficial de La Federación*.

Recibido:
8/noviembre/2024

Aceptado:
9/junio/2025

Soto, E. S., Hernández, M., Santos, H., Ortiz, E., & García, E. (2016). Evaluación del contenido de materia orgánica en suelos agrícolas y su relación carbono/nitrógeno. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, *3*(5), 98–102.

Vela Correa, G., Blanco, J. L., & De Lourdes Rodríguez Gamiño, M. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del distrito federal, centro de México. *Investigaciones Geograficas*, *77*, 18–30. https://doi.org/10.14350/rig.31007

Vergara-Sánchez, M. Á., Etchevers-Barra, J. D., & Padilla-Cuevas, J. (2005). La fertilidad de los suelos de ladera de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, *39*(3), 259–266.

Wabusya, W. M., Pili, N. N., Bekuta, B. K., Tsingalia, H. M., & Kakembo, V. (2020). Effects of land-use changes on soil chemical parameters in Kakamega-Nandi forest complex. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *23*(3), 1. https://doi.org/10.56369/tsaes.3064

Wiesmeier, M., Lützow, M. von, Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., & Kögel-Knabner, I. (2015). Land use effects on organic carbon storage in soils of Bavaria: The importance of soil types. *Soil and Tillage Research*, *146*(PB). https://doi.org/10.1016/j.still.2014.10.003

Woerner. (1989). *Método químico para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas* (UANL). Facultad de Ciencias Forestales, Departamento Agroforestal, Universidad Autónoma de Nuevo León.

Xue, Z., & An, S. (2018). Changes in soil organic carbon and total nitrogen at a small watershed scale as the result of land use conversion on the Loess Plateau. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(12), 1–4757. https://doi.org/10.3390/SU10124757

Yerena Yamallel, J. I., Jiménez Pérez, J., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., González Tagle, M. A., & Treviño Garza, E. J. (2014). Dinámica de la captura de carbono en pastizales abandonados del noreste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosistems*, *17*, 113–121.

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

ESTIMACIÓN DE CARBONO A NIVEL ÁRBOL INDIVIDUAL EN BOSQUE NATURAL MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)

CARBON ESTIMATION AT THE INDIVIDUAL TREE LEVEL IN NATURAL FOREST USING UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

Hinojosa-Espinoza, S.I., Briseño Reyes, J., J.J. Corral-Rivas, J. Aguirre-Gutiérrez, D.J. Vega-Nieva, H.M. De los Santos Posadas

ESTIMACIÓN DE CARBONO A NIVEL ÁRBOL INDIVIDUAL EN BOSQUE NATURAL MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)
CARBON ESTIMATION AT THE INDIVIDUAL TREE LEVEL IN NATURAL FOREST USING UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 177-198 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.11

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 177-198 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Estimación de carbono a nivel árbol individual en bosque natural mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT)

Carbon estimation at the individual tree level in natural forest using unmanned aerial vehicles (UAV)

Hinojosa-Espinoza, S.I.,
J. Briseño Reyes,
J.J. Corral-Rivas,
J. Aguirre-Gutiérrez,
D.J. Vega-Nieva,
H.M. De los Santos Posadas

ESTIMACIÓN DE CARBONO A NIVEL ÁRBOL INDIVIDUAL EN BOSQUE NATURAL MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANT)

CARBON ESTIMATION AT THE INDIVIDUAL TREE LEVEL IN NATURAL FOREST USING UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 177-198. Julio 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.60.11

Susana I. Hinojosa-Espinoza https://orcid.org/0000-0001-6786-6624
Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México

Jaime Briseño-Reyes / jaime.briseno@ujed.mx
https://orcid.org/0000-0003-0732-4908
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México

José Javier Corral-Rivas https://orcid.org/0000-0002-2851-7517
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México

Jesús Aguirre-Gutiérrez https://orcid.org/0000-0001-9190-3229
Environmental Change Institute, School of Geography and the Environment, University of Oxford, UK

Daniel José Vega-Nieva https://orcid.org/0000-0002-1463-6523
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales
Universidad Juárez del Estado de Durango, México

Héctor Manuel de los Santos Posadas https://orcid.org/0000-0003-4076-5043
Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados
Campus Montecillo. México

RESUMEN: El uso de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) ha ido en aumento en los últimos años en el ámbito forestal, con aplicaciones como estimación de variables dendrométricas, biomasa aérea y contenido de carbono. Este trabajo tiene como objetivo estimar el contenido de carbono mediante VANT a nivel de árbol individual en bosques templados de la Sierra Madre Occidental en México. A partir de modelos digitales de terreno (MDT) y superficie (MDS), se generó un modelo de altura de dosel (canopy height model, CHM, por sus siglas en inglés) como base para la estimación de alturas, geolocalización e identificación de árboles, usando el paquete *ForestTools* de RStudio evaluando tres combinaciones de parámetros del algoritmo de filtro de ventana variable (variable-window-filter, VWF, por sus siglas en inglés). Además, se realizó un reconocimiento de especies mediante análisis de imágenes basado en objetos (object-based image analysis, OBIA, por sus siglas en inglés). Finalmente, se realizó una predicción de biomasa y contenido de carbono usando ecuaciones alométricas. Los resultados mostraron una alta concordancia en la identificación y conteo de árboles (96.10%) con la combinación de 0.05 + 0.6 en los parámetros del algoritmo de VWF. El análisis mostró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.87 y 0.58 para alturas y diámetros respectivamente, además un índice Kappa de 0.92 en reconocimiento de especies. Comparando las estimaciones de carbono entre el método tradicional y el uso de VANT, se observó un r de 0.74 y un R^2 de 0.55, evidenciando una relación moderada entre ambos métodos. Los resultados muestran la viabilidad de los VANT para la estimación de carbono en bosques.

Palabras clave: Algoritmo de filtro de ventana variable, contenido de carbono, *ForestTools*, modelo de altura de dosel, OBIA, VANT.

ABSTRACT: The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) has increased in recent years in the forestry field, with applications such as estimating dendrometric variables,
aerial biomass, and carbon stock. This work aims to estimate carbon stock using UAV at the individual tree level in temperate forests of the Sierra Madre Occidental in Mexico. From digital terrain models (DTM) and surface models (DSM), a canopy height model (CHM) was generated as a basis for estimating heights, geolocation, and tree identification using the *ForestTools* package in RStudio, evaluating three parameter combinations of the variable window filter (VWF) algorithm. Additionally, species recognition was performed using object-based image analysis (OBIA). Finally, biomass and carbon stock prediction was performed using allometric equations. The results showed high concordance in tree identification and counting (96.10%) with the combination of 0.05 + 0.6 in the VWF algorithm parameters. The analysis showed a coefficient of determination (R^2) of 0.87 and 0.58 for heights and diameters respectively, as well as a Kappa index of 0.92 in species recognition. Comparing carbon estimates between the traditional method and the use of UAV, a r of 0.74 and an R^2 of 0.55 were observed, evidencing a moderate relationship between both methods. The results demonstrate the feasibility of UAV for carbon estimation in forests
Key words: Variable Window Filter (VWF) algorithm, carbon stock, *ForestTools*, canopy height model, OBIA, UAV.

INTRODUCCIÓN

Los bosques ocupan casi un tercio de la superficie total terrestre y representan importantes sumideros de carbono, ya que fijan y almacenan cantidades superiores que cualquier otro ecosistema terrestre y participan con el 90% del flujo anual de carbono entre la atmósfera y el suelo (Palacios-Cruz *et al.*, 2020). Actualmente el almacenamiento de carbono se considera un servicio de regulación clave para mitigar el cambio climático (Buotte *et al.*, 2020). De tal manera que, los bosques constituyen la base para la implementación de instrumentos financieros, tales como los bonos de carbono, que convierten el secuestro natural de dióxido de carbono (CO_2) en un mecanismo de financiamiento para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta estrategia resulta especialmente pertinente para países en desarrollo con vastas extensiones forestales, como México, donde los bosques cubren 65.7 millones de hectáreas, lo que representa un tercio del territorio nacional (FAO, 2021), y estados como Durango albergan reservas forestales significativas en la Sierra Madre Occidental (Novo-Fernández *et al.*, 2018).
Por lo anterior, contar con avances tecnológicos en la captura y procesamiento de imágenes mediante vehículos aéreos no tripulados (VANT), junto con el uso de técnicas fotogramétricas y algoritmos de aprendizaje automatizado permite caracterizar de manera detallada los ecosistemas forestales (Dainelli *et al.*, 2021; Hernando *et al.*, 2019), lo que favorece entre otras cosas, a los proyectos de compra y venta de bonos de carbono (Shteto *et al.*, 2025). Estas herramientas posibilitan también la estimación precisa de variables dendrométricas relevantes como el diámetro a altura de pecho (DAP) y la altura total de los árboles, así como la detección y delimitación de copas individuales (Ke y Quackenbush, 2011), la identificación de diversas especies (Komárek *et al.*, 2018) y sus rasgos funcionales (Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2021). Asimismo, el uso de VANT equipados con cámaras RGB (Red, Green, Blue) ofrece una alternativa rentable y eficiente en comparación con tecnologías como LiDAR (Light Detection and Ranging) que requieren una mayor inversión económica (Alzamora *et al.*, 2021), reduciendo significativamente tanto los costos económicos como el tiempo requerido en los inventarios forestales tradicionales, cubriendo áreas extensas de manera eficiente. En este contexto, disponer de inventarios forestales precisos y confiables sobre almacenes de biomasa y contenido de carbono en los bosques, facilitan el diseño de estrategias de manejo forestal que contribuyen a la

mitigación del cambio climático (Martínez *et al.*, 2025). Si bien, en la región de Durango se han desarrollado estudios orientados al análisis de biomasa aérea mediante el uso de imágenes satelitales (López Serrano *et al.*, 2021; Rosas-Chavoya *et al.*, 2023), así como al modelado de atributos biométricos a través de VANT (Quiñonez-Barraza *et al.*, 2023). Hasta el momento no se cuenta con registros de investigaciones que estimen el carbono a nivel árbol individual a partir de imágenes generadas con VANT RGB.

Este estudio tiene como objetivo estimar el contenido de carbono a nivel de árbol individual en un bosque natural utilizando VANT, con el fin de optimizar los recursos y mejorar la eficiencia en la cuantificación de captura de carbono, ofreciendo una alternativa precisa y escalable a los métodos tradicionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio es un sitio perteneciente a la red nacional de Sitios Permanentes de Investigación Forestal y de Suelos (SPIFyS, https://forestales.ujed.mx/monafor) con presencia en 15 estados del país establecidos a través de las metodologías de Corral-Rivas *et al.* (2009). El SPIFyS de 50x50 m se encuentra dentro del ejido "La Victoria" en el municipio de Pueblo Nuevo, ubicado dentro de la cadena montañosa de la Sierra Madre Occidental al sur del estado de Durango (Figura 1). El ejido se encuentra ubicado en 105°25'39.465" Oeste y 23°43'53.022" Norte, con una altitud que va desde los 2,400 y 2,850 metros sobre el nivel del mar (msnm). La vegetación predominante es bosque de pino-encino con estructuras mixtas constituidos principalmente por los géneros *Pinus, Quercus, Juniperus, Cupressus, Pseudotsuga, Arbutus* y *Alnus* (Vega *et al.*, 2022).

Núm. 60: 177-198 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

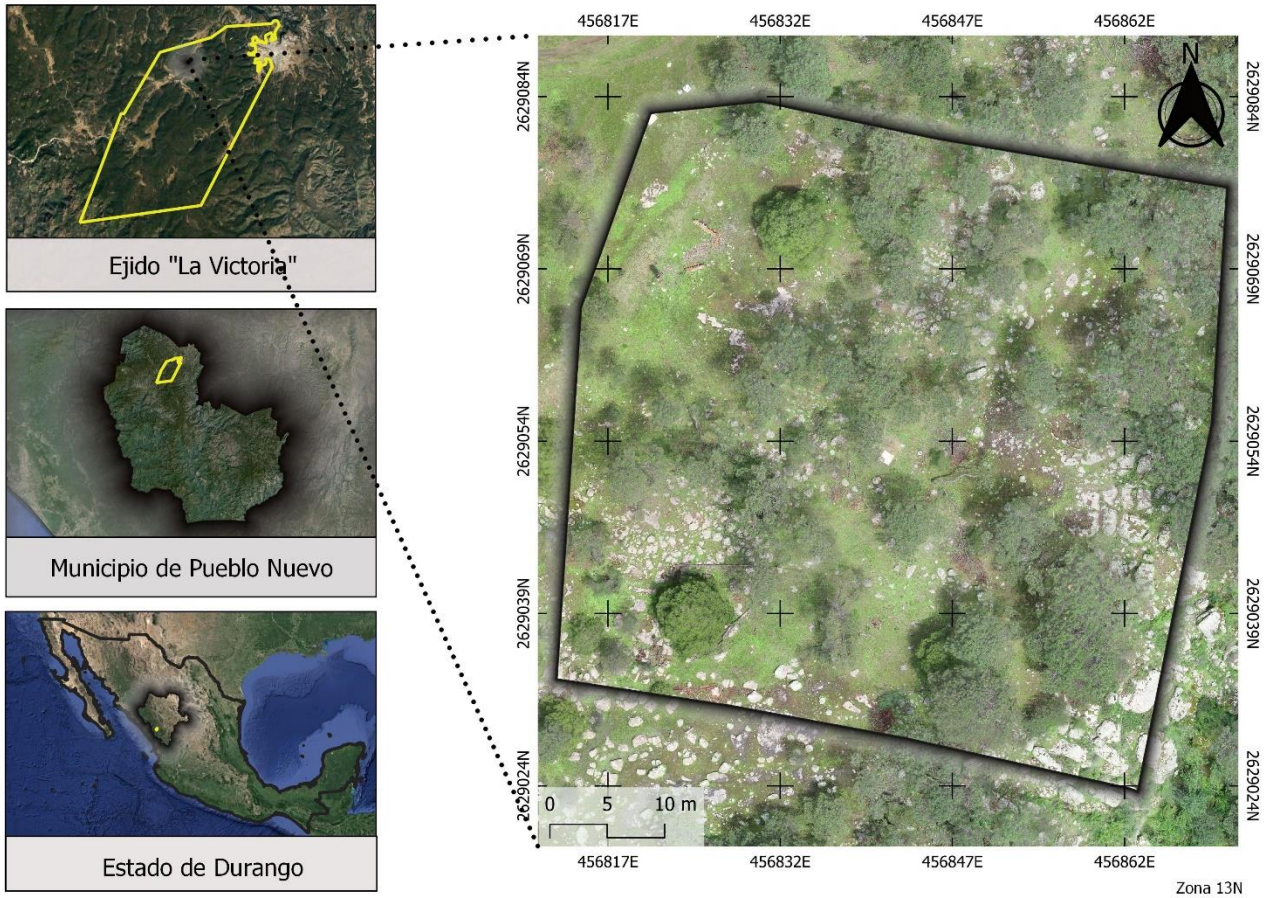


Figura 1. Localización del área de estudio en el ejido “La Victoria”
Figure 1. Location of the study area in the ejido "La Victoria"

Flujo de trabajo

El diagrama del proceso general utilizado para la estimación de carbono mediante VANT se ilustra en la Figura 2.

Núm. 60: 177-198 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

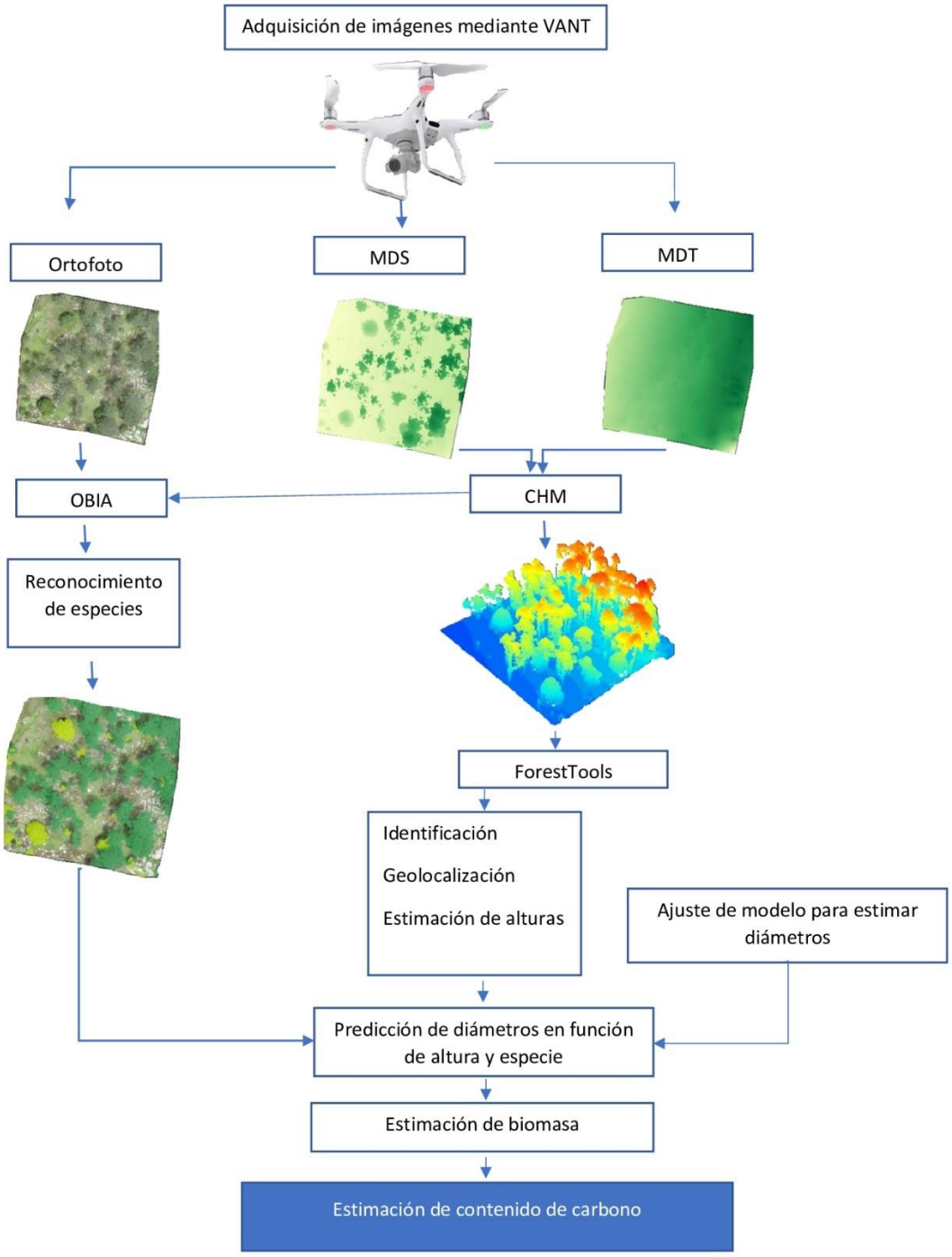


Figura 2. Flujo de trabajo para la estimación de contenido de carbono mediante VANT; modelo digital de superficie (MDS), modelo digital de terreno (MDT), modelo de altura de dosel (CHM) y análisis de imágenes basado en objetos (OBIA).
Figure 2. UAV-based workflow for carbon stock estimation; digital surface model (MDS), digital terrain model (MDT), canopy height model (CHM) and object-based image analysis (OBIA).

Núm. 60: 177-198 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Adquisición de imágenes mediante VANT

El 01 de septiembre del año 2024 a las 18:00 horas se sobrevoló la zona de estudio empleando un VANT Phantom 4 Pro de la marca DJI con un sensor RGB de 20 megapíxeles, con capacidad de georreferenciación de imágenes de manera directa gracias a su sistema de posicionamiento global (GPS), y con un rango de precisión de vuelo de ±0.5 m en ubicación vertical y ±1.5m en ubicación horizontal (https://www.dji.com/mx/phantom-4-pro-v2/specs consultado el 02 de septiembre de 2024). El plan de vuelo se diseñó mediante la aplicación Pix4Dcapture, con un área de 70 x 70 metros. Se realizaron un total de cinco vuelos a una altitud constante de 50 metros sobre el nivel del suelo. Esta baja altitud permite obtener mayor precisión y detalle en la reconstrucción de productos fotogramétricos, ya que reduce la distancia entre el sensor y el objeto de estudio (Seifert *et al.*, 2019). Se empleó una superposición de 80% entre fotografías y 80% entre líneas. Los primeros dos vuelos se realizaron con un ángulo de cámara de 90° siguiendo un patrón de cuadricula en dirección horizontal y vertical respecto al área de estudio. Los dos vuelos subsecuentes se efectuaron a la misma altitud, con un ángulo de 75° en la cámara, finalmente el quinto vuelo se realizó con un ángulo en cámara de 75° y una ruta de vuelo con una rotación de 45° respecto a las rutas de vuelo anteriores. Esta combinación de ángulos de visión se implementó para aumentar el nivel de detalle en la parte inferior y los laterales del dosel, lo que permite una reconstrucción más completa de la estructura forestal (Nesbit y Hugenholtz, 2019). Para mejorar la precisión de los productos fotogramétricos, se colocaron puntos de control en el centro y en cada una de las cuatro esquinas del sitio, distribución recomendada para obtener resultados precisos en ortofotos, modelos digitales de superficie (MDS) y modelos digitales de terreno (MDT) derivados de VANT (Ortiz *et al.*, 2019). Los puntos de control cuentan con una dimensión de 1x1 metro (m) y se encuentran numerados del 1 al 5. En cada punto de control se registró la coordenada utilizando el dispositivo Spectra MobileMapper con precisión submétrica.

Procesamiento fotogramétrico

Se capturaron un total de 235 imágenes RGB durante los 5 vuelos, estas fueron sometidas a procedimientos fotogramétricos y de georreferenciación utilizando las coordenadas registradas en cada uno de los puntos de control. Estos procedimientos se llevaron a cabo mediante el software para procesamientos fotogramétricos Pix4D Mapper (versión 4.5.6), que permite generar mapas 2D y modelos 3D a partir de imágenes aéreas obtenidas mediante VANT (https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dmapper-fotogrametria-software/ consultado el 03 de septiembre de 2024). El procesamiento fotogramétrico permitió obtener un ortomosaico RGB, un MDS, un MDT y una nube de puntos de la zona.

Detección de árboles y estimación de altura

Se delimitó el área de estudio (sitio de 50 x 50m) sobre el ortomosaico, el MDS y el MDT. A partir de estos modelos se generó un modelo de altura de dosel (canopy height model, CHM, por sus siglas en inglés) mediante la resta del MDT al MDS (CHM = MDS - MDT) (Gallardo-Salazar y Pompa-García, 2020). El CHM obtenido corresponde a una representación espacialmente continua de las alturas del dosel, en formato ráster, con valores por píxel que reflejan la diferencia de elevación entre la superficie del dosel y el terreno, lo cual permite estimar de manera detallada la estructura vertical de la vegetación dentro del área La resta de los modelos se llevó a cabo utilizando el software QGIS (versión 3.16) (https://www.qgis.org/es/site/ consultado el 03 de septiembre de 2024). Mediante el software estadístico RStudio (versión 4.4.1) (https://posit.co/download/rstudio-desktop/ consultado el 03 de septiembre de 2024) y con el paquete *ForestTools* se estimó la altura y conteo de árboles dentro del sitio a partir del modelo CHM. El software emplea el algoritmo de filtro de ventana variable (variable-window-filter, VWF, por sus siglas en inglés) desarrollado por Popescu y Wynne (2004). Este algoritmo evalúa cada pixel en el modelo CHM como una potencial copa de árbol, analiza todos los pixeles alrededor del pixel focal para identificar la copa de los árboles y obtener la altura máxima (Young *et al.*, 2022). Se asume un modelo lineal entre la altura y el radio de VWF. Por tanto, la relación entre la altura del pixel focal (x) y el radio de la ventana de búsqueda (y) se modela con la siguiente ecuación:

Núm. 60: 177-198 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

$$y = a + bx$$

Donde:
y = Radio de la ventana de búsqueda.
x = Altura del píxel focal.
a = Intersección (controla el tamaño mínimo de la ventana de búsqueda).
b = Coeficiente (define la pendiente de la relación entre la altura del árbol (x) y el tamaño de la ventana de búsqueda (y).

Con el propósito de identificar la totalidad de los árboles levantados en campo, se probaron tres combinaciones diferentes de los parámetros de intersección (a) y pendiente (b) del algoritmo VWF: (0.04+0.6), (0.05+0.6) y (0.07+0.9). Entendiendo que, al otorgarle valores mayores a los rangos, mayor es la ventana de búsqueda de las copas, así como también el ancho de copa identificado, al tratarse de especies en su mayoría con copas de diámetros pequeños se probó una variación en amplitud en un rango de búsqueda de tamaño mínimo, medio y máximo (Chang *et al.*, 2016; Popescu y Wynne, 2004). Además, se estableció una altura mínima de 3 metros para cada combinación con el fin de excluir arbustos y árboles con diámetros menores a 7.5 cm.

Reconocimiento de especies mediante análisis de imágenes basado en objetos (OBIA, object-based image analysis)

Dentro de la zona de estudio se encuentran dos especies arbóreas: *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana* conocidas comúnmente como pino blanco y táscate, respectivamente. La identificación de las especies se realizó mediante observación directa en campo y a través de OBIA. Este enfoque permitió identificar individualmente los árboles localizados mediante el algoritmo VWF, y posteriormente clasificar su especie con base a las características espectrales y estructurales.

El proceso de segmentación se llevó a cabo implementando el algoritmo de desplazamiento medio (mean shift segmentation) mediante el software Orfeo Toolbox (versión 7.1), siguiendo la metodología propuesta por Hinojosa-Espinoza *et al.* (2021), quienes recomiendan una combinación óptima de parámetros para lograr una clasificación efectiva. Los valores establecidos fueron: radio espacial = 5, radio de rango = 7, tamaño mínimo de la región = 250 pixeles. El radio espacial determina la distancia espacial entre clases e indica el tamaño de la ventana para crear segmentos (toma como base el promedio de los pixeles analizados), un valor más alto genera segmentos más grandes, pero se puede perder nivel de detalle. El radio de rango, también denominado rango de color, especifica el umbral de diferencia radiométrica (reflectancia) permitido entre pixeles para ser agrupados dentro de un mismo segmento. Este parámetro es fundamental para la identificación de especies ya que cada especie tiene una reflectancia diferente, lo que discrimina una especie de otra. Por su parte el tamaño mínimo de la región indica la cantidad mínima de pixeles que forman un segmento, los segmentos que tienen un número de pixeles por debajo del establecido en este parámetro se fusionan con el segmento más cercano que tenga la misma firma espectral. Finalmente, el número máximo de iteraciones del algoritmo se estableció en 100 con el fin de permitir una adecuada convergencia del proceso de agrupamiento, pocas iteraciones suelen generar segmentos no representativos (De Luca *et al.*, 2019). Para mejorar la segmentación y clasificación se utilizó un layerstack compuesto por el ortomosaico RGB y el CHM, así como también se consideraron los valores de elevación de los píxeles, la textura y la intensidad del color (Bhatnagar *et al.*, 2020). Los polígonos de referencia se seleccionaron de manera aleatoria y manual mediante interpretación en pantalla y verificación en campo. Una vez obtenidos, se dividieron de manera aleatoria en dos subconjuntos: 80% (288 muestras) para el entrenamiento del modelo y un 20% (72 muestras) para su validación. Los parámetros del modelo Random Forest se establecieron con base en las recomendaciones de Immitzer *et al.* (2016), cuya metodología ha demostrado ser efectiva en contextos similares. Los valores utilizados fueron: número máximo de árboles = 100, profundidad máxima de cada árbol = 5, número mínimo de muestras en cada nodo = 10, tasa de error (out of bango OOB, por sus siglas en inglés) 0.01 y número de variables seleccionadas aleatoriamente por nodo = 0 (valor por defecto, √n características). Cada uno de estos parámetros influye en la precisión del modelo; un mayor número de árboles puede mejorar la estabilidad y reducir la varianza del clasificador; el

sobreajuste se reduce con una menor profundidad, el umbral mínimo de muestras por nodo evita la generación de nodos con poca representatividad estadística, el error OOB es una métrica interna de validación cruzada que sirve para detener el entrenamiento cuando el modelo deja de mejorar sustancialmente (Han *et al.*, 2020).
Para evaluar la precisión de la clasificación se utilizó el índice de Kappa (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins, 1986), el cual permite cuantificar la concordancia entre la clasificación obtenida y los datos de referencia.

Modelo para la predicción del diámetro normal a partir de la altura
Para predecir el diámetro normal o a la altura del pecho (DAP, 1.3 m sobre el nivel del suelo), se desarrolló un modelo matemático de regresión no lineal, considerando la predicción del DAP en función de la altura del árbol. El modelo empleado es de tipo potencial, y es frecuentemente utilizado en estudios de biometría por su flexibilidad y aplicabilidad en distintas especies forestales (Morales et al., 2019). El modelo corresponde con la siguiente ecuación:

$$DAP = a \cdot H^b$$

Donde:
DAP = Diámetro a la altura de pecho (cm).
H = Altura del árbol (m).
a y b = Parámetros estimados mediante regresión no lineal.

Los parámetros *a* y *b* se estimaron mediante el método de mínimos cuadrados no lineales utilizando la función nls en RStudio. El ajuste del modelo se realizó utilizando un total de los 2,220 árboles de las especies *Pinus cooperi,* y *Juniperus deppeana*. Estos datos se obtuvieron de MONAFOR, un repositorio de libre acceso para la gestión, almacenamiento y evaluación de datos de SPIFyS en México y provienen de la misma Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) donde se localiza el sitio de estudio (https://forestales.ujed.mx/monafor consultado el 07 de septiembre de 2024).
El modelo ajustado se utilizó para predecir el DAP de los árboles pertenecientes al sitio de estudio a partir de los datos del VANT y la especie identificada mediante análisis OBIA.

Recolección de datos dendrométricos en campo
Para el estudio se incluyeron todos los árboles presentes en el sitio, excluyendo únicamente los individuos con un diámetro menor a 7.5 cm, ya que su contribución a la biomasa del sitio es mínima (Nanos y Sjöstedt de Luna, 2017). Del mismo modo se excluyeron los individuos pertenecientes a las siguientes dominancias: categoría 7 (muerto en pie), 8 (muerto caído) y 9 (tocón). Cada árbol fue etiquetado y numerado de manera manual. La altura (m) se determinó mediante un hipsómetro de la marca Haglöf Vertex IV con precisión de 0.1 m, el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) se midió a la altura de 1.3 m, con una forcípula forestal Häglof con precisión milimétrica, promediando dos mediciones perpendiculares para corregir excentricidades. Las coordenadas de cada individuo se registraron utilizando el dispositivo Spectra MobileMapper. En total se registraron 77 árboles dentro del SPIFyS. Las estimaciones en altura obtenidas mediante el VANT fueron validadas y comparadas con los datos de las mediciones de campo.

Estimación del contenido de carbono
Se calculó la biomasa aérea mediante ecuaciones alométricas específicas para el noroeste de México, desarrolladas para *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana* por Vargas-Larreta *et al.* (2017) (Tabla 1). Posteriormente, la biomasa aérea estimada fue convertida a carbono aplicando factores de conversión específicos para cada especie (tabla 2), mismos que también fueron propuestos por Vargas-Larreta *et al.* (2017).

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de biomasa en *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*
Table 1. Equations for calculating biomass for *Pinus cooperi* and *Juniperus deppeana*

Ecuación del componente de biomasa del árbol	Estadísticos de bondad de ajuste	
	R^2	RMSE
Pinus cooperi		
$W_w = 0.031126d^{2.09355}h^{0,768845}$	0.97	41.22
$W_b = 0.011361d^{1.676006}h^{0,74627}$	0.81	10.43
$W_{br} = 0.007965d^{1.599044}h^{1.347388}$	0.89	27.06
$W_f = 0.049925d^{1.122846}h^{0.600293}$	0.74	3.79
$W_t = \Sigma W_i$	0.94	87.21
Juniperus deppeana		
$W_w = 0.01289d^2h$	0.91	28.98
$W_b = 0.000772d^2h$	0.57	3.15
$W_{br} = 0.00204d^2h$	0.81	5.87
$W_f = 0.00098d^2h$	0.67	3.92
$W_t = \Sigma W_i$	0.90	37.00

Donde, d= diámetro a la altura de pecho (cm), h = altura total (m), W_w = biomasa de madera del tallo (kg árbol $^{-1}$), W_b = biomasa de corteza del tallo (kg árbol $^{-1}$), W_{br} = biomasa de madera más corteza de las ramas (kg árbol $^{-1}$), W_f = biomasa del follaje (hojas/acículas) (kg árbol $^{-1}$), W_t = biomasa total sobre el suelo ($W_w + W_b + W_{br} + W_f$) (kg árbol $^{-1}$), RMSE = raíz del error medio cuadrático.

Tabla 2. Valores utilizados para el cálculo de carbono mediante los factores de conversión en *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*
Table 2. Values used for carbon calculation using conversion factors for *Pinus cooperi* and *Juniperus deppeana*

Especie	Proporción de carbono			
	Madera	Corteza	Hojas/acículas	Total (sd)
Pinus cooperi	0.485	0.511	0.471	0.489 (0.0020)
Juniperus deppeana	0.527	0.438	0.496	0.487 (0.0045)

Donde, Total = contenido de carbono total, sd = desviación estándar

Validación estadística

Los resultados de la estimación de variables dendrométricas, incluyendo altura, DAP y contenido de carbono, fueron validados mediante análisis estadístico. Se utilizaron estadísticas descriptivas como la media aritmética y la mediana, así como de correlación y estadísticos de bondad de ajuste, incluyendo el coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de determinación, el coeficiente de determinación ajustado y el valor de significancia estadística (p-value), con el fin de comparar los resultados obtenidos en campo mediante el método tradicional y los resultados obtenidos a partir del vuelo del VANT.

RESULTADOS

Con las 235 imágenes adquiridas, se generó un MDT, MDS y ortomosaico RGB, derivados del procesamiento fotogramétrico (Figura 3, inciso a, b y c, respectivamente). La utilización de los puntos de control junto con el sistema GPS integrado en el VANT contribuyeron a obtener una mayor exactitud posicional del ortomosaico y de los modelos generados. En la figura 3, inciso d), se observa que las estimaciones del modelo CHM, mismas que resultan de la diferencia entre MDS y MDT, utilizados para el cálculo de alturas, varían desde 0 m, correspondientes a zonas

sin presencia de arbolado (indicada en tono amarillo claro) hasta 18.35 m, que representa la altura máxima registrada (indicada en tono verde obscuro). Por otro lado, de las tres combinaciones de parámetros del algoritmo de VWF, la combinación óptima para la zona de estudio fue 0.05 + 0.6, ya que logró identificar el 96.1% de los árboles, lo que equivale a 74 de los 77 individuos presentes en el sitio de estudio. En contraste, la combinación 0.07 + 0.9 identificó únicamente 56 individuos, mientras que la combinación 0.04 + 0.6 detectó el 90.9% de los árboles (Tabla 3).

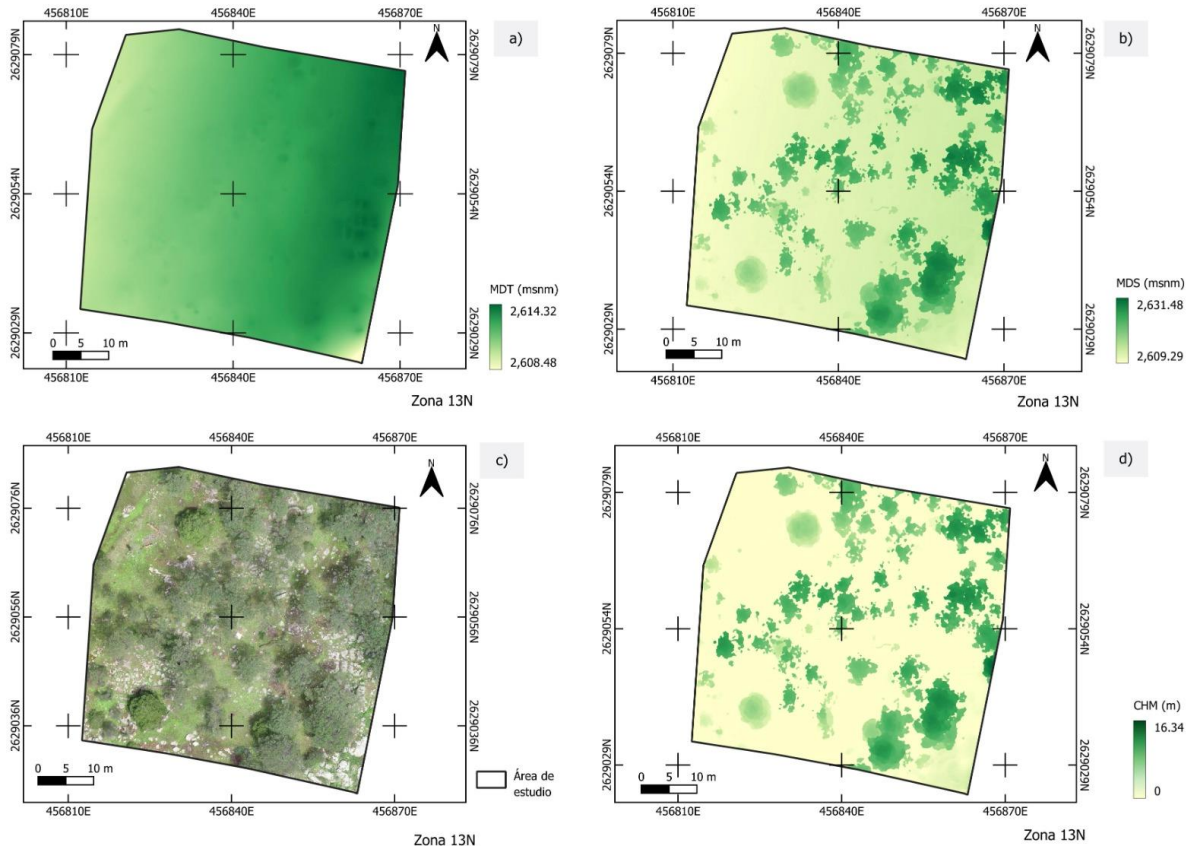


Figura 3. a) Modelo digital de terreno (MDT) b) Modelo digital de superficie (MDS) c) Ortomosaico d) Modelo de altura de dosel de la zona de estudio (CHM).
Figure 3. a) Digital Terrain Model (MDT) b) Digital Surface Model (MDS) c) Orthomosaic d) Canopy Height Model (CHM) of the study area.

Tabla 3. Número y porcentaje de árboles detectados con las diferentes combinaciones de valores de los parámetros de intersección y pendiente en el algoritmo VWF
Table 3. Number and percentage of trees detected with different parameter value combinations of intersection and slope in the VWF algorithm

Combinación de valores en el algoritmo VWF	Número de árboles detectados	Porcentaje de árboles detectados
(0.04 + 0.6)	70	90.9 %
(0.05 + 0.6)	74	96.1 %
(0.07 + 0.9)	56	72.7 %

Con base a los resultados anteriores, se realizó un análisis de correlación de Pearson y se ajustó el modelo de regresión potencial previamente definido a los 74 árboles identificados. Las estadísticas descriptivas obtenidas para los datos registrados en campo y los obtenidos por el VANT se muestran en la tabla 4. Los datos obtenidos en campo y usados en este trabajo como datos de referencia, mostraron una altura mínima de 4.40 m, mientras que los datos generados por VANT registran 4.49 m, indicando una sobreestimación de 0.09 m. En contraste, la altura máxima fue subestimada en 2.46 m por el algoritmo de VWF. La mediana estimada por el VANT (11.60 m) sobreestimó en 0.40 m a la mediana registrada en campo (11.20 m). Asimismo, la media aritmética del VANT (10.96 m) subestimó en 0.46 m la media de campo (11.42 m). Finalmente, los valores de ambos cuartiles (primero y tercero) obtenidos con el VANT fueron ligeramente inferiores, sugiriendo una tendencia general de subestimación en las mediciones realizadas por este método frente a los métodos tradicionales. No obstante, la mayoría de las diferencias observadas se encuentran dentro del rango de precisión del instrumento utilizado en campo (hipsómetro Haglöf Vertex IV), el cual, de acuerdo con las especificaciones del fabricante, presenta una precisión de ± 1% en la medición de distancias y una resolución de 0.1m para la estimación de altura. Por lo tanto, la incertidumbre asociada a las mediciones de campo puede considerarse en el orden de ±01 a ±0.2 m, dependiendo de factores como distancia al árbol visibilidad y la experiencia del operador (https://haglofsweden.com/ consultado el 25 de abril de 2025). Lo anterior indica que las estimaciones con VANT presentan un nivel aceptable de concordancia con los datos de referencia.

Tabla 4. Estadísticas descriptivas de las alturas medidas en campo y alturas generadas mediante VANT
Table 4. Descriptive statistics of heights measured in the field and heights generated using UAV

	Datos obtenidos en campo	Datos generados mediante VANT
Min.	4.40	4.49
1st Qu.	9.00	8.67
Median	11.20	11.60
Mean	11.42	10.96
3rd Qu.	13.95	13.57
Max.	18.80	16.34

En el análisis de correlación de Pearson realizado entre las alturas medidas en campo mediante el método tradicional y las obtenidas mediante VANT evidenció una relación lineal positiva y altamente significativa (r de 0.93, p-value< 2.2e $^{-16}$). Este hallazgo se refleja de manera equivalente en el modelo de regresión lineal, el cual explica el 87% de la variabilidad observada en la altura de los árboles muestra (R^2= 0.87, RMSE= 1.34 m) (Figura 4). En cuanto a los diámetros, la comparación entre los valores medidos en campo y aquellos predichos a partir de la altura estimada con el VANT mostró una correlación positiva (r = 0.76). Este valor sugiere una relación moderadamente fuerte entre las observaciones medidas en campo y las predicciones. Además, se obtuvo un valor de p-value de 6.07 e^{-13} lo que indica que la correlación es estadísticamente significativa, descartando la posibilidad de que la relación observada se deba al azar. En este caso, el R^2 fue de 0.58, lo que sugiere que el modelo explica el 58% de la variabilidad observada en los diámetros de los árboles. Con un valor de RMSE de 6.44 cm, que refleja un error promedio considerable entre los diámetros medidos y los predichos, indicando el potencial del modelo para la predicción de diámetros usando la altura estimada con VANT como variable predictiva (Figura 5).

Núm. 60: 177-198 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

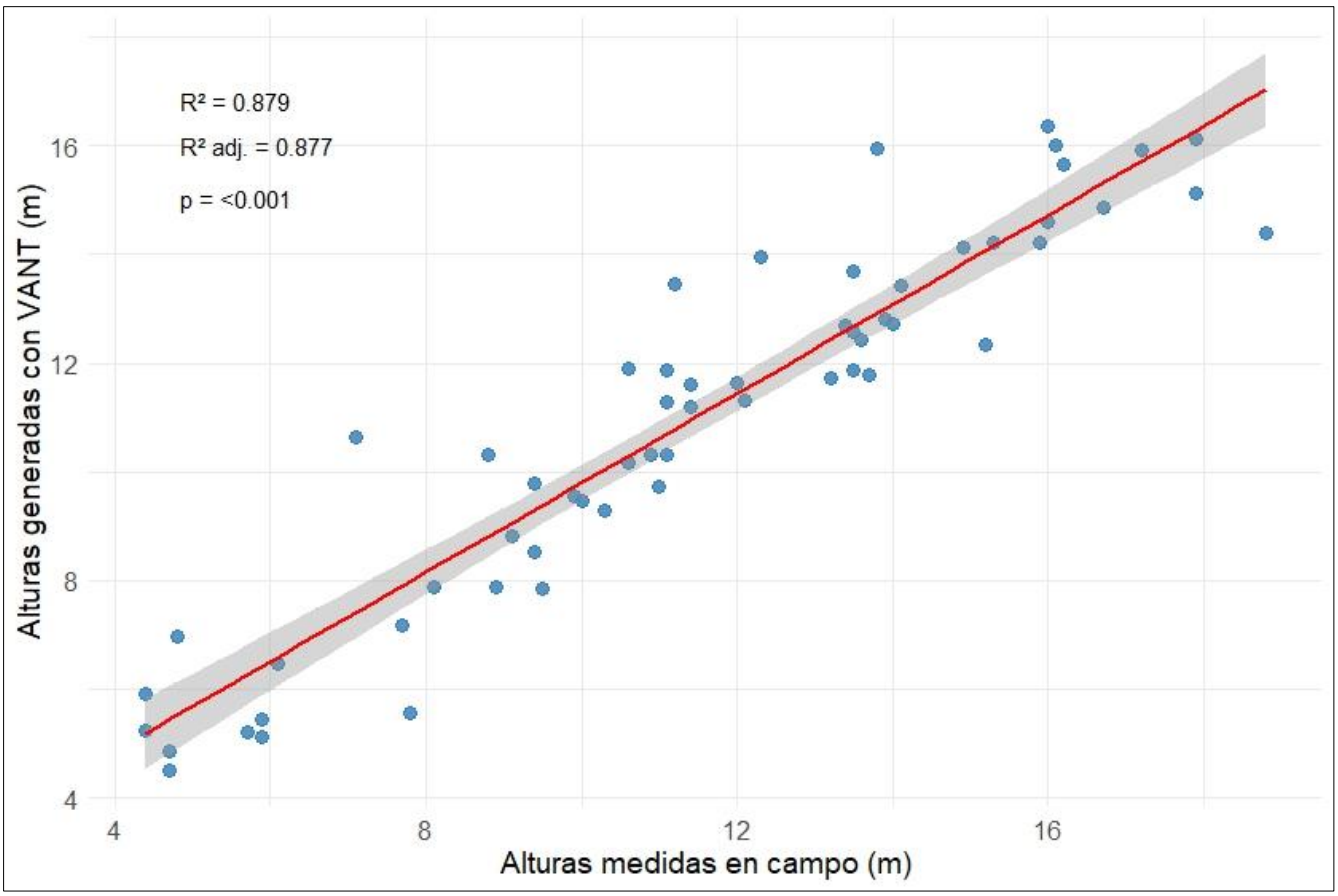


Figura 4. Relación de alturas estimadas con VANT vs alturas medidas en campo.
Figure 4. Relationship of heights estimated with UAV vs heights measured in the field.

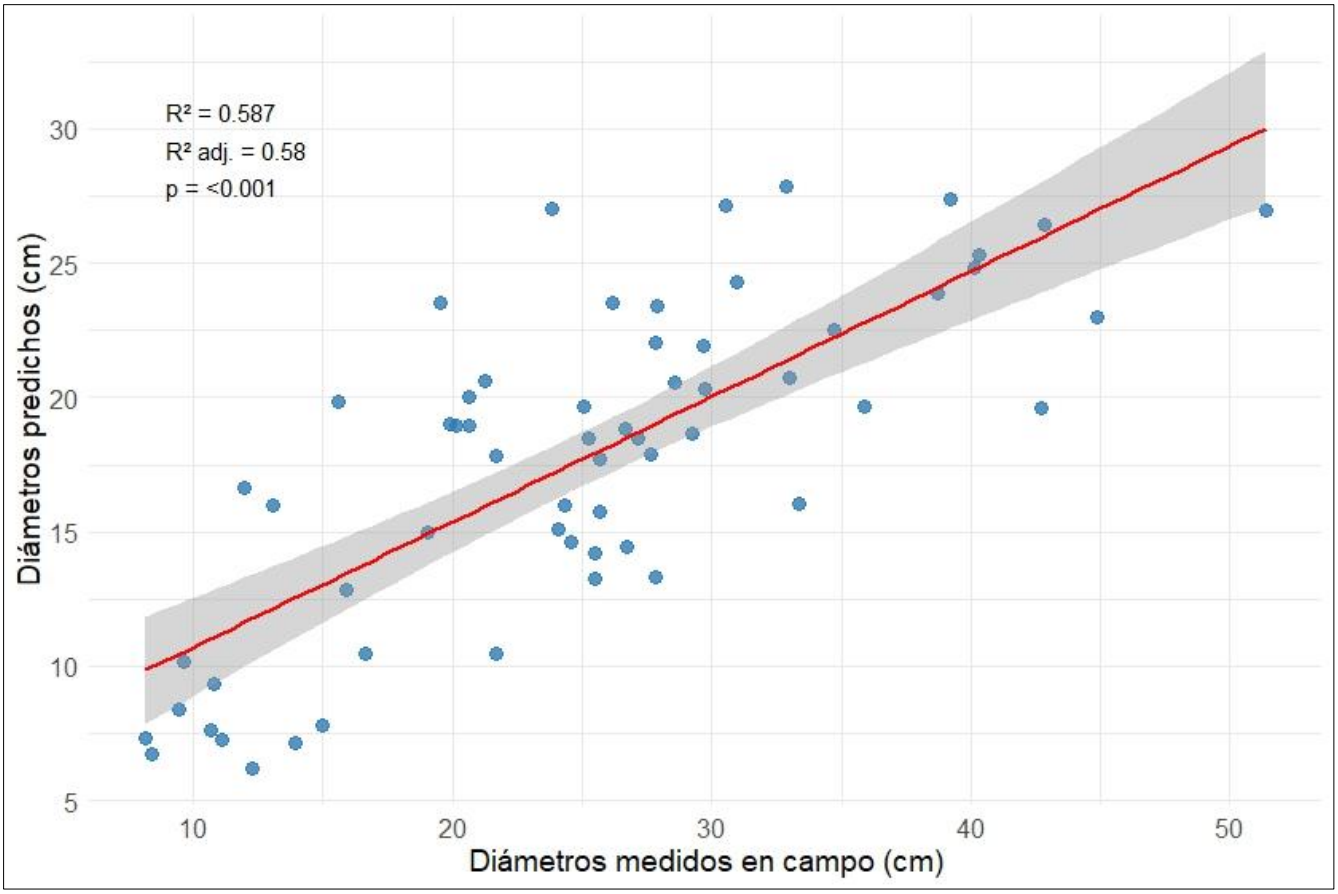


Figura 5. Relación de diámetros estimadas con VANT vs diámetros medidos en campo.
Figure 5. Relationship of diameters estimated with UAV vs diameters measured in the field

En cuanto al reconocimiento de las especies mediante OBIA, los resultados indican una identificación efectiva de las especies *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*, obteniendo un índice de kappa de 0.92. Este valor indica un alto nivel de concordancia entre el reconocimiento de especies mediante OBIA y la identificación de las especies realizada en campo (Figura 6). Esta elevada concordancia sugiere que el modelo logró representar con precisión la distribución espacial de ambas especies dentro del área de estudio, la separación espectral y espacial permitió diferenciar correctamente entre ambas especies.

Núm. 60: 177-198 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

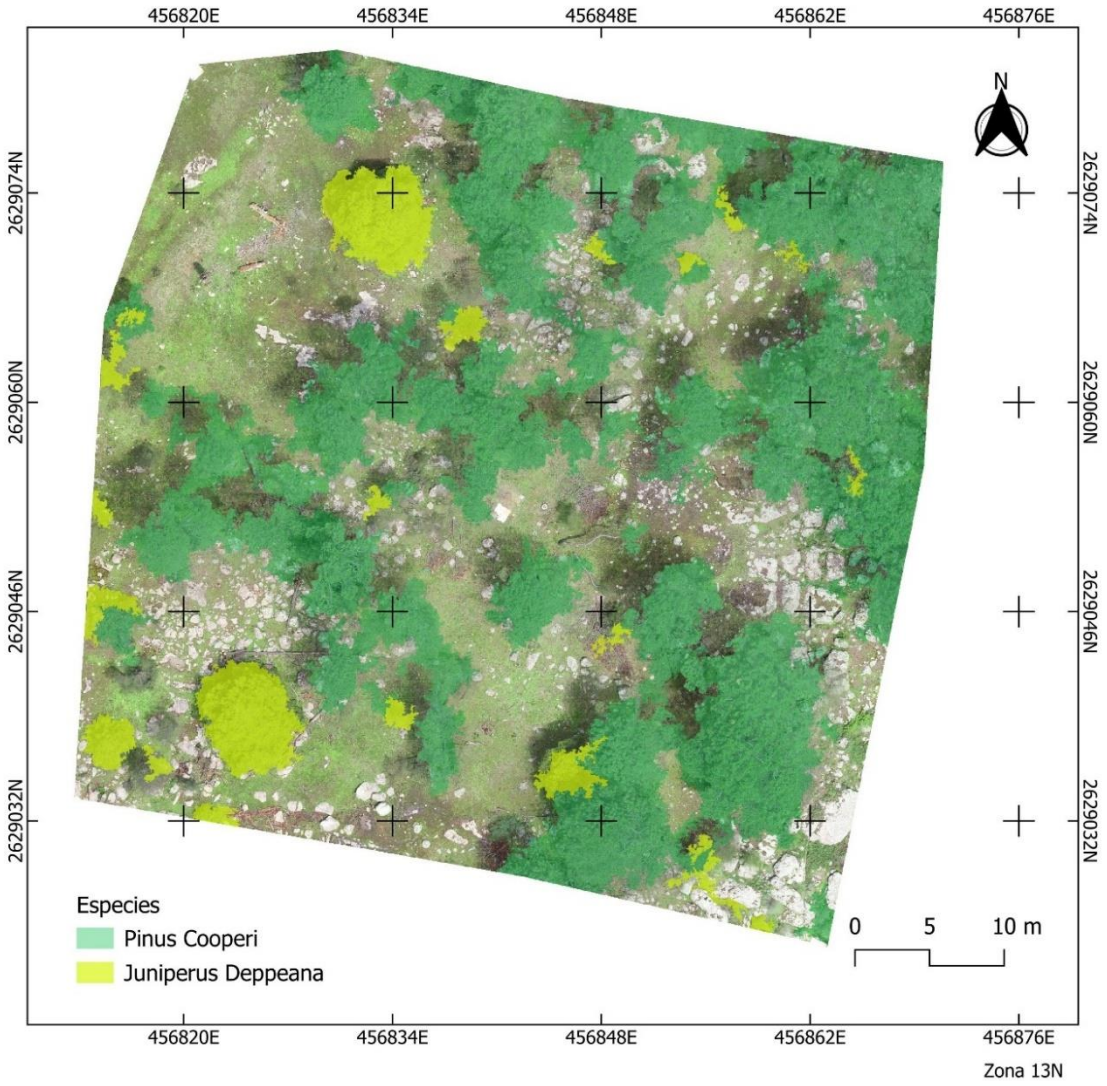


Figura 6. Reconocimiento de especies mediante OBIA en la zona de estudio
Figure 6. Species identification using OBIA in the study area

Finalmente, el análisis comparativo entre las estimaciones de contenido de carbono obtenidas mediante el método tradicional y aquellas derivadas de los datos recolectados por el vuelo del VANT mostró un r de 0.74, indicando una relación positiva moderadamente fuerte entre ambos enfoques. Las estimaciones de carbono derivadas de los datos generados mediante VANT fueron consistentemente inferiores a las obtenidas a partir de mediciones en campo. La media estimada con VANT, que fue de 70.01 kg árbol^{-1}, en comparación con los 150.35 kg árbol^{-1} obtenida con los datos de campo. Estos resultados sugieren una subestimación sistemática del contenido de carbono cuando se emplean datos obtenidos mediante VANT (tabla 5). Asimismo, el análisis de regresión lineal arrojó un R^2 de 0.55 (Figura 7) y una RMSE de 88.99 kg árbol^{-1} y un p-value de <0.001, lo cual sugiere que el modelo basado en datos del VANT explica aproximadamente el 55% de la variabilidad en la estimación de carbono respecto al método tradicional. Estos resultados indican que el VANT presenta un nivel aceptable de concordancia con el método convencional, sin embargo, aún persiste un margen considerable de variabilidad.

Tabla 5. Estadísticas descriptivas de la estimación de carbono en campo y la estimación generada mediante VANT
Table 5. Descriptive statistics of the field carbon estimate and the estimate generated by UAV

	Estimación de carbono en campo (kg árbol^{-1})	Estimación de carbono mediante datos generados con VANT (kg árbol^{-1})
Min.	5.853	3.551
1st Qu.	64.055	31.630
Median	114.613	60.455
Mean	150.354	70.009
3rd Qu.	189.24	101.323
Max.	661.027	189.605

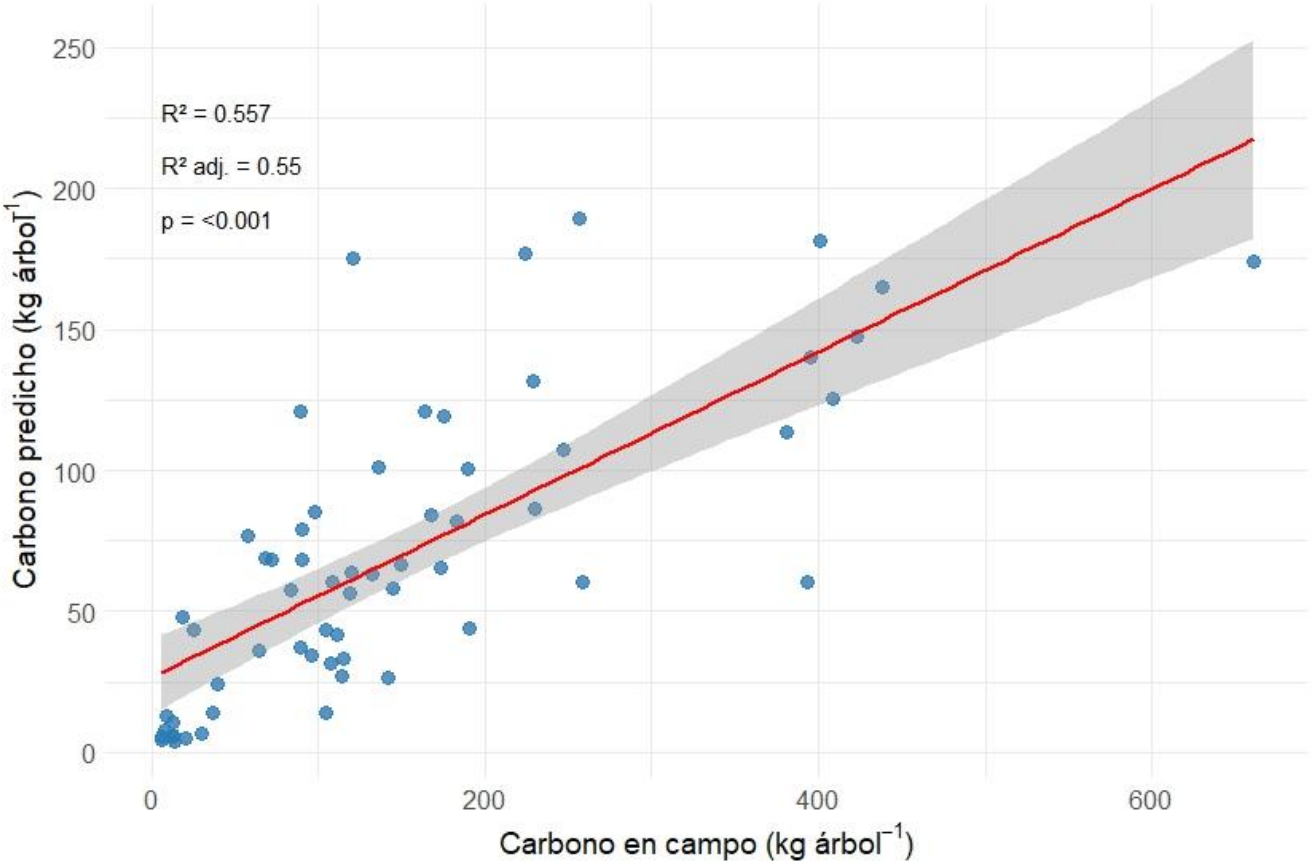


Figura 7. Regresión lineal del contenido de carbono estimado en campo y el predicho a través de las variables obtenidas mediante VANT.
Figure 7. Linear regression of carbon stock estimated in the field and predicted through variables obtained using UAV.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante el algoritmo VWF demuestran un alto nivel de eficacia en la detección individual de árboles (96.1%), comparable e incluso superior a lo reportado en estudios previos. Investigaciones como las de Mohan *et al.* (2017) y Chen *et al.* (2021) reportaron tasas de detección del 85% y 80% en bosques mixtos densos, respectivamente, mientras que Wu *et al.* (2019), empleando tecnología LiDAR, alcanzaron una precisión del 98% en plantaciones

forestales. En este estudio, la combinación de parámetros aplicada (intersección = 0.05, pendiente = 0.6) resultó adecuada para un bosque con baja densidad y características estructurales poco complejas, permitiendo detectar 74 de los 77 individuos presentes. Además, cabe destacar que la aplicación de diferentes combinaciones de parámetros en el algoritmo VWF para ajustar el tamaño de la ventana de búsqueda mejora la precisión en la identificación de árboles en bosques con diferentes alturas de dosel. Ya que, fue posible observar que valores más altos en los parámetros del algoritmo VWF (intersección y pendiente) incrementan el tamaño de la ventana de búsqueda, lo que se traduce en una mayor área proyectada para las copas identificadas. Esto podría ser adecuado para áreas donde predominan especies con copas amplias, ya que permite una mejor detección de individuos dominantes. Los árboles no identificados en este trabajo corresponden con individuos ubicados en sotobosque, lo cual coincide con lo señalado por Young *et al.* (2022), quienes destacan una mayor precisión en identificación con el algoritmo VWF para arboles dominantes y una menor precisión para aquellos del sotobosque.

El coeficiente de correlación estimado para estimación de las alturas en esta investigación (0.93) refuerza la capacidad del uso de VANT con cámaras RGB para modelar la estructura vertical de los bosques. Este valor es superior al obtenido con sensores LiDAR en algunos estudios, como el de Kwong y Fung (2020), quienes reportaron un r = 0.81 para VANT con sensor RGB y r = 0.76 para LiDAR en una reserva natural. Sin embargo, son escasos los estudios que reportan una correlación mayor al utilizar sensores RGB en comparación con LiDAR.

Los resultados obtenidos en la estimación de alturas mediante el modelo de regresión lineal (R^2= 0.87, RMSE= 1.34 m) son consistentes con lo reportado por Islami *et al.* (2021) y Nasiri *et al.* (2021), quienes obtuvieron un R^2 de 90% y 80%, con RMSE de 0.83 m y 3.22 m, respectivamente, al emplear modelos CHM en bosques mixtos. Hao et al. (2021) sugieren que la precisión mejora cuando las estimaciones se realizan a nivel rodal, alcanzando un R^2 de 0.95 y un RMSE de 0.12 m, en comparación con R^2 de 0.89 y un RMSE de 0.22m a nivel árbol individual. Estos hallazgos refuerzan que la precisión de estas estimaciones está condicionada por la densidad y distribución espacial de los árboles, factores que afectan directamente la calidad del CHM. En este sentido, Birdal *et al.* (2017) reportaron un valor de la RMSE de apenas 28 cm, en un bosque urbano de coníferas con baja densidad, lo que evidencia cómo la estructura del dosel incide directamente en la reducción del error en la estimación de alturas.

En cuanto a la predicción del DAP a partir de la altura, el ajuste del modelo con más de 2,000 árboles de las mismas especies contribuyó a la mejora de la precisión de las predicciones. Sin embargo, el R^2 obtenido indica que el modelo solo explica el 58% de la variabilidad observada en los diámetros, lo cual es esperado ya que predecir el DAP a partir de la altura representa un reto, principalmente debido a la dificultad para medir con exactitud las alturas en campo, especialmente en bosques densos donde el solapamiento de copas complica la identificación de la parte superior de los árboles. En ese sentido, el principal error en la predicción del DAP se debe a una medición inadecuada de las alturas, cuya precisión puede verse afectada por factores como la densidad del sitio y el solapamiento de copas (Young *et al.*, 2022). En contraste, la predicción de alturas a partir de variables como el diámetro normal o el diámetro de tocón tiende a ser más precisa (Cuevas *et al.*, 2017). Un ejemplo de esto es el estudio de Corral-Rivas et al. (2007) quienes obtuvieron un R^2 superior a 95% al predecir el diámetro a la altura de pecho en función del diámetro del tocón en especies forestales. Esto sugiere que, mientras la estimación de altura basada en diámetro puede ofrecer resultados más consistentes, la relación inversa presenta mayores desafíos. Es importante destacar que, aunque existen numerosos estudios que abordan la predicción de variables dendrométricas utilizando datos de inventarios forestales tradicionales, son escasos los trabajos que exploran la estimación de DAP a partir de alturas obtenidas mediante VANT RGB. Por lo que, esta investigación contribuye significativamente en este sentido, al proporcionar evidencia empírica de la aplicabilidad y las limitaciones de los datos recolectados con VANT RGB para la estimación de DAP, resaltando la necesidad de continuar desarrollando y refinando modelos que integren tecnologías de teledetección en el ámbito forestal.

La identificación de especies dentro de un bosque es esencial para la aplicación precisa de ecuaciones alométricas que permitan estimar la biomasa aérea y el contenido de carbono. En este estudio, el reconocimiento de especies mediante OBIA reflejó una alta capacidad de discriminación entre las especies *Pinus cooperi* y *Juniperus deppeana*, el índice de Kappa

obtenido (0.92) representa una concordancia "casi perfecta" según la escala de interpretación propuesta por Landis y Koch. (1977), lo que aporta evidencia sólida sobre la fiabilidad del método empleado. Este valor no solo implica que la clasificación automatizada se asemeja estrechamente a la identificación en campo, sino que además reduce considerablemente la probabilidad de coincidencias producto del azar. En estudios de teledetección aplicada a sistemas forestales, alcanzar valores superiores a 0.80 ya se considera un indicador de alto rendimiento, tal es el caso de Yang *et al.* (2022) quienes lograron un índice de Kappa de 0.94 en la identificación de olivos chinos (*Canarium album* L.) utilizando un VANT multiespectral; por lo que, un valor de 0.92 posiciona al enfoque como una herramienta precisa para el monitoreo y gestión de la vegetación. Además, estos resultaron sugieren que el modelo logró capturar adecuadamente tanto las características espectrales como espaciales relevante de cada especie, lo cual es fundamental en zonas donde coexisten diferentes especies. No obstante, es importante señalar que la efectividad de métodos como OBIA tiende a aumentar con el uso de sensores multiespectrales que incluyen el infrarrojo cercano (Near-infrared, NIR, por sus siglas en inglés), ya que estos sensores ofrecen un mayor rango espectral y son capaces de detectar variaciones sutiles en la reflectancia entre distintos tipos de vegetación. Esto es evidente en la investigación de Franklin (2018) quien reportó una precisión de 69% en la detección de especies comerciales de coníferas y árboles caducifolios con el uso de un sensor RGB, mientras que la precisión se incrementó al 80% al incorporar un sensor multiespectral.

Los resultados de esta investigación se centraron también en evaluar la estimación de contenido de carbono, destacando la relación entre el carbono medido en campo mediante métodos convencionales y el carbono predicho a partir de los datos recopilados con VANT. Se observó que el $R^2 = 0.55$ estuvo significativamente afectado por la omisión en la detección de árboles, especialmente de *Pinus cooperi*, una de las especies con mayor capacidad de almacenamiento de carbono (Barrón *et al.*, 2016). La subestimación en la detección de estos individuos conduce a discrepancias notables entre las mediciones en campo y las predicciones derivadas de los datos VANT. En este contexto, se observó que el DAP máximo medido en campo fue de 50 cm, mientras que el valor predicho alcanzó solo 30 cm. De manera similar, el contenido de carbono promedio de los árboles estimado mediante el método tradicional fue de 661 kg, en contraste con los 189 kg estimados a partir de los datos del VANT. Estas discrepancias pueden atribuirse a que el modelo de predicción del DAP explica solo el 58% de la variabilidad observada, siendo más preciso en árboles de menor altura. Dado que el bosque estudiado está dominado por árboles de altura considerable, la predicción del DAP tiende a ser menos precisa, lo que incrementa el rango de error y afecta directamente la estimación de contenido de carbono. Si bien se reconoce el uso de VANT para estimaciones de biomasa y carbono (Dainelli *et al.*, 2021), es crucial evaluar el alcance de un VANT de bajo costo equipado con cámara RGB en bosques naturales mixtos como los usados en este estudio. La mayoría de los estudios previos se han enfocado en tecnología LiDAR, que en general, proporciona una mayor precisión (Sanaa *et al.*, 2022). Por ejemplo, (Juan-Ovejero *et al.*, 2023) estimaron el carbono almacenado en una plantación forestal, obteniendo resultados aceptables con R^2 de 0.68 utilizando un VANT con cámara RGB. Un aspecto adicional a considerar es que la estimación de contenido de carbono se llevó a cabo a nivel árbol individual lo cual añade un valor significativo a los resultados permitiendo observar las variaciones de biomasa y carbono en los diferentes árboles. Ya que de esta manera es posible reducir el error de sobreestimación o subestimación que se genera en las estimaciones a nivel parcela (Bueno-López *et al.*, 2019).

Finalmente, aunque el enfoque aplicado en este estudio demostró ser efectivo en un bosque natural de baja complejidad estructural y diversidad moderada, su escalabilidad hacia otras regiones con mayor heterogeneidad estructural aún requiere validación. Ecosistemas con múltiples estratos, copas densas, y especies de difícil discriminación representan un desafío significativo para la generalización de estos métodos. Por lo tanto, se destaca la necesidad de desarrollar modelos adaptativos que integren sensores multiespectrales o LiDAR que ofrecen mayor detalle y precisión, así como algoritmos más robustos, que permiten extender la aplicabilidad de herramientas como los VANT a contextos más complejos. Sin embargo, es importante destacar que el uso de VANT RGB (Phantom 4 PRO) representa una alternativa de bajo costo frente a sistemas LiDAR cuya adquisición y operación pueden ser hasta 10 veces más

costosa. Estos hallazgos subrayan el potencial del enfoque, pero también las oportunidades para su mejoría en términos de precisión, resolución y escalabilidad, particularmente en lo referente a la estimación individualizada de carbono en bosques naturales.

CONCLUSIONES

El uso de VANT para estimar contenido de carbono es una herramienta relativamente nueva que ofrece un campo amplio de exploración para estimar las reservas de carbono en los bosques, a través de un método no destructivo que propone un panorama atractivo para el sector forestal con una reducción en recursos económicos y tiempo. En este sentido, la posibilidad de estimar de manera rápida y precisa la biomasa aérea a nivel de árbol brinda la posibilidad de entrar en una nueva etapa para el manejo y gestión de recursos forestales ofreciendo una opción con VANT de costos accesibles, como es en este caso, que se realizó únicamente con sensor RGB la precisión obtenida es aceptable, sin embargo, para un mejor resultado se sugiere el uso de sensores LiDAR y de tipo multiespectral. Sin duda, a pesar de que estas herramientas tecnológicas ofrecen una precisión estadísticamente aceptable, no se excluye por completo el trabajo de campo ya que este es necesario para la validación y control de calidad de las predicciones. Como trabajo a futuro se propone realizar el mismo estudio con diferentes densidades de bosques y diversidad de especies, para estimar las capacidades descriptivas de la técnica presentada.

LITERATURA CITADA

Aguirre-Gutiérrez, J., Rifai, S., Shenkin, A., Oliveras, I., Bentley, L. P., Svátek, M., Girardin, C. A. J., Both, S., Riutta, T., Berenguer, E., Kissling, W. D., Bauman, D., Raab, N., Moore, S., Farfan-Rios, W., Figueiredo, A. E. S., Reis, S. M., Ndong, J. E., Ondo, F. E., … Malhi, Y. (2021). Pantropical modelling of canopy functional traits using Sentinel-2 remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, *252*, 112122. https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.112122

Alzamora, R. M., Becker, J. C., Escudero, M., Pinto Rodríguez, A. A. (2021). Factibilidad técnico-económica de implementar LiDAR en una empresa forestal. *Madera y Bosques*, *27*(2). https://doi.org/10.21829/MYB.2021.2721661

Barrón, R., Aguirre Calderón, O. A., Larreta, B., Pérez, J., Garza, E., y Yerena Yamallel, J. (2016). Modeling of biomass and aboveground arboreal carbon in forests of the state of Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *7*, 91–105.

Bhatnagar, S., Gill, L., y Ghosh, B. (2020). Drone Image Segmentation Using Machine and Deep Learning for Mapping Raised Bog Vegetation Communities. *Remote Sensing 2020, Vol. 12, Page 2602*, *12*(16), 2602. https://doi.org/10.3390/RS12162602

Birdal, A. C., Avdan, U., y Türk, T. (2017). Estimating tree heights with images from an unmanned aerial vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *8*(2), 1144–1156. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1300608

Bueno-López, S. W., García-Lucas, E., Caraballo-Rojas, L. R. (2019). Allometric equations for total aboveground dry biomass and carbon content of *Pinus occidentalis* trees. *Madera y Bosques*, *25*(3). https://doi.org/10.21829/MYB.2019.2531868

Buotte, P. C., Law, B. E., Ripple, W. J., y Berner, L. T. (2020). Carbon sequestration and biodiversity co-benefits of preserving forests in the western United States. *Ecological Applications*, *30*(2). https://doi.org/10.1002/EAP.2039

Chang, K. T., Lin, C., Lin, Y. C., y Liu, J. K. (2016). Accuracy assessment of crown delineation methods for the individual trees using LIDAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *XLI-B8*, 585–588. https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLI-B8-585-2016

Chen, S., Liang, D., Ying, B., Zhu, W., Zhou, G., y Wang, Y. (2021). Assessment of an improved individual tree detection method based on local-maximum algorithm from unmanned

aerial vehicle RGB imagery in overlapping canopy mountain forests. *International Journal of Remote Sensing*, *42*(1), 106–125. https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1809024

Corral-Rivas, J. J., Barrio-Anta, M., Aguirre-Calderón, O. A., y Diéguez-Aranda, U. (2007). Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (Mexico). *Forestry: An International Journal of Forest Research*, *80*(1), 29–40. https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPL048

Corral-Rivas, J. J., Vargas Larreta, B., Wehenkel, C., Aguirre-Calderón, O. A., Álvarez-González, J. G., y Rojo-Alboreca, A. (2009). Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango. *Editorial de La Universidad Juárez Del Estado de Durango.*, *octubre 2017*, 54p. https://www.researchgate.net/publication/305640430%0AGuía

Cuevas, X. G., Ramos, J. H., Ramos, A. H., Quiñonez Barraza, G., Carlos, J., Urías, T., Geraldine, G., y Espinoza, G. (2017). Predicción del diámetro normal, altura y volumen a partir del diámetro del tocón en especies tropicales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *8*(43), 089–116. https://doi.org/10.29298/RMCF.V8I43.67

Dainelli, R., Toscano, P., Di Gennaro, S. F., y Matese, A. (2021). Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles Forest Remote Sensing—A Systematic Review. Part II: Research Applications. *Forests*, *12*(4). https://doi.org/10.3390/f12040397

De Luca, G., Silva, J. M. N., Cerasoli, S., Araújo, J., Campos, J., Di Fazio, S., y Modica, G. (2019). Object-Based Land Cover Classification of Cork Oak Woodlands using UAV Imagery and Orfeo ToolBox. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 1238*, *11*(10), 1238. https://doi.org/10.3390/RS11101238

FAO. (2021, octubre). *Marco estratégico para 2022-2031*. https://openknowledge.fao.org/items/b9ad3bb8-39c5-447f-8eec-6a333e003cf7

Franklin, S. E. (2018). Pixel-and object-based multispectral classification of forest tree species from small unmanned aerial vehicles. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, *6*(4), 195–211. https://doi.org/10.1139/JUVS-2017-0022

Gallardo-Salazar, J. L., y Pompa-García, M. (2020). Detecting Individual Tree Attributes and Multispectral Indices Using Unmanned Aerial Vehicles: Applications in a Pine Clonal Orchard. *Remote Sensing*, *12*(24). https://doi.org/10.3390/rs12244144

Han, S., Kim, H., y Lee, Y. S. (2020). Double random forest. *Machine Learning*, *109*(8), 1569–1586. https://doi.org/10.1007/S10994-020-05889-1/TABLES/8

Hao, Z., Lin, L., Post, C. J., Jiang, Y., Li, M., Wei, N., Yu, K., y Liu, J. (2021). Assessing tree height and density of a young forest using a consumer unmanned aerial vehicle (UAV). *New Forests*, *52*(5), 843–862. https://doi.org/10.1007/s11056-020-09827-w

Hernando, A., Puerto, L., Mola-Yudego, B., Manzanera, J., Abril, A., Maltamo, M., y Valbuena, R. (2019). Estimation of forest biomass components using airborne LiDAR and multispectral sensors. *IForest - Biogeosciences and Forestry*, *12*, 207–213. https://doi.org/10.3832/ifor2735-012

Hinojosa-Espinoza, S. I., Gallardo-Salazar, J. L., Hinojosa-Espinoza, F. J. C., y Meléndez-Soto, A. (2021). Evaluation of segmentation parameters in OBIA for classification of land covers from UAV images. *Revista de Teledetección*, *2021*(58), 89–103. https://doi.org/10.4995/RAET.2021.14782

Immitzer, M., Vuolo, F., y Atzberger, C. (2016). First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sensing 2016, Vol. 8, Page 166*, *8*(3), 166. https://doi.org/10.3390/RS8030166

Islami, M. M., Rusolono, T., Setiawan, Y., Rahadian, A., Hudjimartsu, S. A., y Prasetyo, L. B. (2021). Height, diameter and tree canopy cover estimation based on unmanned aerial vehicle (UAV) imagery with various acquisition height. *Media Konservasi*, *26*(1 SE-Research Articles), 17–27. https://doi.org/10.29244/medkon.26.1.17-27

Juan-Ovejero, R., Elghouat, A., Navarro, C. J., Reyes-Martín, M. P., Jiménez, M. N., Navarro, F. B., Alcaraz-Segura, D., y Castro, J. (2023). Estimation of aboveground biomass and carbon stocks of *Quercus ilex* L. saplings using UAV-derived RGB imagery. *Annals of Forest Science*, *80*(1), 1–14. https://doi.org/10.1186/S13595-023-01210-X/FIGURES/3

Ke, Y., y Quackenbush, L. J. (2011). A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, *32*(17), 4725–4747. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.494184

Komárek, J., Klouček, T., y Prošek, J. (2018). The potential of Unmanned Aerial Systems: A tool towards precision classification of hard-to-distinguish vegetation types? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *71*, 9–19. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.003

Kwong, I. H. Y., y Fung, T. (2020). Tree height mapping and crown delineation using LiDAR, large format aerial photographs, and unmanned aerial vehicle photogrammetry in subtropical urban forest. *International Journal of Remote Sensing*, *41*(14), 5228–5256. https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1731002

Landis, J. R., y Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, *33*(1), 159. https://doi.org/10.2307/2529310

López Serrano, P. M., Vega Nieva, D. J., Ramírez Aldaba, H., García Montiel, E., Corral Rivas, J. J. (2021). Estimation of forest parameters using Sentinel 2A data in Pueblo Nuevo, state of Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *12*(68), 81–106. https://doi.org/10.29298/RMCF.V12I68.1075

Martínez, R. G., Bañuelos, L. A. L., Jiménez, J. C. M., y Calixto, M. T. (2025). Almacén de carbono en las plantaciones forestales como estrategia para la mitigación del cambio climático. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *9*(1), 6762–6778. https://doi.org/10.37811/CL_RCM.V9I1.16368

Mohan, M., Silva, C. A., Klauberg, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A. T., y Dia, M. (2017). Individual Tree Detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Canopy Height Model in an Open Canopy Mixed Conifer Forest. *Forests*, *8*(9). https://doi.org/10.3390/f8090340

Morales, E. A. F., Calderón, O. A. A., Barraza, G. Q., Tagle, M. A. G., y Pérez, J. J. (2019). Estimación del diámetro normal, altura y volumen de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en función del diámetro del tocón. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *10*(55). https://doi.org/10.29298/RMCF.V10I55.547

Nanos, N., y Sjöstedt de Luna, S. (2017). Fitting diameter distribution models to data from forest inventories with concentric plot design. *Forest Systems*, *26*(2 se-special section mediterranean silviculture: homage to gregorio montero), e01S. https://doi.org/10.5424/fs/2017262-10486

Nasiri, V., Darvishsefat, A. A., Arefi, H., Pierrot-Deseilligny, M., Namiranian, M., y Le Bris, A. (2021). Unmanned aerial vehicles (UAV)-based canopy height modeling under leaf-on and leaf-off conditions for determining tree height and crown diameter (case study: Hyrcanian mixed forest). *Canadian Journal of Forest Research*, *51*(7), 962–971. https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0125

Nesbit, P. R., y Hugenholtz, C. H. (2019). Enhancing UAV–SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 239*, *11*(3), 239. https://doi.org/10.3390/RS11030239

Novo-Fernández, A., Franks, S., Wehenkel, C., López-Serrano, P. M., Molinier, M., y López-Sánchez, C. A. (2018). Landsat time series analysis for temperate forest cover change detection in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *73*, 230–244. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.015

Ortiz, D., Hernandez, F., y Hernandez, F. (2019). Análisis de la influencia de los puntos de control terrestre en la exactitud posicional de ortofotomosaicos generados por medio de un vuelo fotogramétrico realizado por un vehículo aéreo no tripulado (VANT). *Revista de Topografía AZIMUT*, *10*(1 SE-Artículos). https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/14972

Palacios-Cruz, D., De Los Santos-Posadas, H. M., Ángeles-Pérez, G., Fierros, A., y Santiago-García, W. (2020). Sistema de crecimiento y rendimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. Et Cham. bajo aprovechamiento

Recibido:
16/diciembre/2024

Aceptado:
9/junio/2025

forestal (Growth and yield system to evaluate carbon sinks in managed *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. FORESTS). *Agrociencia*, *45*, 241–257.

Popescu, S. C., y Wynne, R. H. (2004). Seeing the trees in the forest: Using lidar and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *70*(5), 589–604. https://doi.org/10.14358/PERS.70.5.589

Quiñonez-Barraza, G., Pompa-García, M., Vivar-Vivar, E. D., Gallardo-Salazar, J. L., Hernández, F. J., Rodríguez-Flores, F. de J., Solís-Moreno, R., Bretado-Velázquez, J. L., Valdez-Cepeda, R. D., Hernández-Díaz, J. C. (2023). Modeling Biometrie Attributes from Tree Height Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) in Natural Forest Stands. *Ingeniería e Investigación*, *43*(2), 1-. https://doi.org/10.15446/ING.INVESTIG.98945

Rosas-Chavoya, M., López-Serrano, P. M., Vega-Nieva, D. J., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, C., y Corral-Rivas, J. J. (2023). Estimating Above-Ground Biomass from Land Surface Temperature and Evapotranspiration Data at the Temperate Forests of Durango, Mexico. *Forests 2023, Vol. 14, Page 299*, *14*(2), 299. https://doi.org/10.3390/F14020299

Rosenfield, G. H., y Fitzpatrick-Lins, K. (1986). A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *52*(2), 223–227.

Sanaa, F., Imane, S., Mohamed, B., Kenza, A. E., Souhail, K., Lfalah, H., y Khadija, M. (2022). Biomass and Carbon Stock Quantification in Cork Oak Forest of Maamora Using a New Approach Based on the Combination of Aerial Laser Scanning Carried by Unmanned Aerial Vehicle and Terrestrial Laser Scanning Data. *Forests*, *13*(8). https://doi.org/10.3390/f13081211

Seifert, E., Seifert, S., Vogt, H., Drew, D., van Aardt, J., Kunneke, A., y Seifert, T. (2019). Influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images. *Remote Sensing 2019, Vol. 11, Page 1252*, *11*(10), 1252. https://doi.org/10.3390/RS11101252

Shteto, G., Werden, L. K., Villa, M., Tiburcio, J., y Cherif, E. (2025). *Assessing UAV direct-seeding for tropical forest restoration: carbon sequestration potential and cost efficiency*. https://doi.org/10.32942/X2N041

Vargas-Larreta, B., López-Sánchez, C. A., Corral-Rivas, J. J., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., y Álvarez-González, J. G. (2017). Allometric equations for estimating biomass and carbon stocks in the temperate forests of North- Western Mexico. *Forests*, *8*(8). https://doi.org/10.3390/F8080269

Vega, A. A., Corral-Rivas, S., Corral-Rivas, J. J., y Diéguez-Aranda, U. (2022). Modelación de las estructuras diamétricas en bosques naturales de Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *13*(73 SE-Artículo Científico), 75–101. https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i73.1187

Wu, X., Shen, X., Cao, L., Wang, G., y Cao, F. (2019). Assessment of Individual Tree Detection and Canopy Cover Estimation using Unmanned Aerial Vehicle based Light Detection and Ranging (UAV-LiDAR) Data in Planted Forests. *Remote Sensing*, *11*(8). https://doi.org/10.3390/rs11080908

Yang, K.; Zhang, H.; Wang, F.; Lai, R., Marino, A., Rizzoli, P. (2022). Extraction of Broad-Leaved Tree Crown Based on UAV Visible Images and OBIA-RF Model: A Case Study for Chinese Olive Trees. *Remote Sensing 2022, Vol. 14, Page 2469*, *14*(10), 2469. https://doi.org/10.3390/RS14102469

Young, D. J. N., Koontz, M. J., y Weeks, J. (2022). Optimizing aerial imagery collection and processing parameters for drone-based individual tree mapping in structurally complex conifer forests. *Methods in Ecology and Evolution*, *13*(7), 1447–1463. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13860

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

VARIACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESPACIAL DE TRES ESPECIES ARBÓREAS EN FUNCIÓN DEL ANCHO DE CAMELLÓN EN CALLES DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

MORPHOMETRIC AND URBAN SPATIAL VARIATION OF THREE TREE SPECIES IN RELATION TO STREET MEDIAN WIDTH IN THE CITY OF SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO

Candia, L.A., C. R. Ramos Palacios, J.H. González Lugo, F. Alvarado

VARIACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESPACIAL DE TRES ESPECIES ARBÓREAS EN FUNCIÓN DEL ANCHO DE CAMELLÓN EN CALLES DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

MORPHOMETRIC AND URBAN SPATIAL VARIATION OF THREE TREE SPECIES IN RELATION TO STREET MEDIAN WIDTH IN THE CITY OF SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 199-227 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.12

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 199-227 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Variación morfométrica y espacial urbana de tres especies arbóreas en función del ancho de camellón en calles de la ciudad de San Luis Potosí, México

Morphometric and urban spatial variation of three tree species in relation to street median width in the city of San Luis Potosí, Mexico

Andrea Candia Lomelí / candia.lomeli@gmail.com
https://orcid.org/0009-0000-9982-5480
Maestría Interdisciplinaria en Ciudades Sostenibles
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Carlos Renato Ramos Palacios https://orcid.org/0000-0002-3390-364X
Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Fredy Alvarado https://orcid.org/0000-0002-6724-4064
División de Ciencias Ambientales
Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica

Jonathan Hammurabi González Lugo https://orcid.org/0000-0001-6883-5950
Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Candia, L.A.
C. R. Ramos Palacios,
J.H. González Lugo,
F. Alvarado

VARIACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESPACIAL DE TRES ESPECIES ARBÓREAS EN FUNCIÓN DEL ANCHO DE CAMELLÓN EN CALLES DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

MORPHOMETRIC AND URBAN SPATIAL VARIATION OF THREE TREE SPECIES IN RELATION TO STREET MEDIAN WIDTH IN THE CITY OF SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 199-227. Julio 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.60.12

RESUMEN: Las condiciones físicas y ambientales del sistema urbano, generalmente, se contraponen al desarrollo de las especies arbóreas tanto por sus dimensiones como por las funciones y beneficios ambientales. Dentro de la variedad de hábitats urbanos para árboles —como bosques urbanos, parques de barrio, jardines vecinales y glorietas—, los árboles con mayor exposición a agentes adversos son los que se encuentran en calles, siendo más comunes los ubicados en banquetas o camellones. En el presente estudio la interrogante fue analizar la influencia de la variación en el ancho del camellón sobre la morfometría y las funciones ambientales indirectas de tres especies de árboles urbanos. Se evaluaron las variables alométricas de la altura del árbol (Aa), área de proyección de copa (APC) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de 127 fresnos, 99 laureles de la India y 80 pirules, seleccionadas por su abundancia en camellones y por presentar copas sin podas severas recientes ni daños visible. Las mediciones se realizaron en 179 camellones de tres categorías según su ancho (≤1.8 m, >1.8–5 m, y >5 m) en 3 distritos centrales de la ciudad de San Luis Potosí, México. También, se utilizó el programa libre de i-Tree Eco para estimar de forma indirecta el valor de importancia (VI), el área foliar (AF) y el secuestro bruto de carbono (SBC) como variables estrechamente asociadas a la morfometría del arbolado, con el objetivo de analizar su variación en relación con el ancho del camellón. Asimismo, se consideraron características del entorno urbano —orientación de la calle, proporción altura del edificio–ancho de calle (AE–AC) y tipo de tránsito vehicular— por su posible influencia en las condiciones de desarrollo del arbolado. En los resultados, el pirul mostró los valores más grandes de alometría entre APC y Aa (R^2=0.74) y promedio de AF (236.2 m^2), pero sin distinción por un tipo de camellón. En laurel de la India la respuesta indicó valores medios y preferentemente en camellón mediano y estrecho. Por su parte, el fresno presentó los valores promedio más bajos en las variables morfométricas (12.7m de Aa, 165m^2 de APC y 41.7 cm de DAP) y el mayor promedio en general de SBC (10.2 kg/año), con mayor contribución en camellón amplio (12.6 kg/año). Por lo tanto, la morfometría varió en función del ancho del camellón, destacando la alta adaptación morfológica del pirul y una mayor estimación de secuestro de carbono en el caso del fresno. La evidencia obtenida sugiere que la configuración urbana y la

respuesta morfológica pueden ser de utilidad en la planeación de infraestructura verde en las calles buscando aumentar los beneficios ambientales para la ciudad.
Palabras clave: ancho de camellón, arbolado urbano, configuración urbana, morfometría arbórea, servicios ambientales.

ABSTRACT: The physical and environmental conditions of urban systems often conflict with the development of tree species due to spatial constraints and limitations in ecological functions and benefits. Among urban tree habitats—such as urban forests, neighborhood parks, community gardens, and traffic circles—street trees, particularly those planted in sidewalks or median strips, face the most exposure to adverse factors. This study aimed to analyze how variations in median width influence the morphometry and indirectly estimated environmental functions of three urban tree species. Allometric variables, including tree height (TH), crown projection area (CPA), and diameter at breast height (DBH), were measured for 127 ash trees, 99 Indian laurels, and 80 Peruvian peppers. These species were selected for their abundance in medians and crowns showing no recent severe pruning or visible damage. Data were collected from 179 median strips categorized by width (≤1.8 m, >1.8–5 m, and >5 m) in three central districts of San Luis Potosí, Mexico. The open-source software i-Tree Eco was used to model importance value (IV), leaf area (LA), and gross carbon sequestration (GCS)—variables closely linked to tree morphometry—to analyze their variation in relation to median width. Urban context variables, such as street orientation, building height–street width ratio (BH–SW), and vehicular traffic type, were also assessed for their potential influence on tree development. Results showed that peruvian pepper exhibited the strongest allometric relationship between CPA and TH ($R^2 = 0.74$) and the highest average LA (236.2 m²), though these values did not differ significantly across median types. Indian laurel displayed intermediate values, with a preference for medium and narrow medians. The ash recorded the lowest average morphometric values (12.7 m TH, 165 m² CPA, and 41.7 cm DBH) but the highest overall GCS (10.2 kg/year), peaking in wide medians (12.6 kg/year). Morphometric variation was thus influenced by median width, highlighting peruvian pepper morphological adaptability and the ash superior carbon sequestration potential. This evidence suggests that urban design parameters and species-specific morphological responses can inform green infrastructure planning in streetscapes to enhance environmental benefits for cities.
Key words: environmental services, street median width, tree morphometry, urban configuration, urban trees.

INTRODUCCIÓN

Los árboles son un componente fundamental en los sistemas urbanos, por los servicios ambientales que ofrecen y su belleza en el paisaje de la ciudad. Por el tipo de habito de crecimiento, el árbol sobresale en forma, tamaño y altura en diversos espacios verdes de las urbes, los cuales pueden variar debido a su entorno donde se encuentra. Generalmente, los parques urbanos ofrecen las condiciones más adecuadas para el desarrollo de los árboles, por el contrario, las vialidades son espacios más restrictivos, caracterizados por limitaciones físicas. Al ser las calles un lugar donde es posible la incorporación de infraestructura verde (Rodríguez-Valencia y Ortiz-Ramírez, 2021) los árboles deben crecer en un medio donde es más alta su exposición a los agentes ambientales urbanos como el aumento de temperatura por efecto de isla de calor, contaminación atmosférica, escasez de agua o cambios en la circulación del viento urbano. Ante este escenario los árboles pueden mostrar signos observables en su morfología y efectos ecológicos y ambientales importantes.

La abundancia de follaje, así como las dimensiones y volumen de copa son aspectos morfológicos fundamentales que definen el tipo y la función de sombra de un árbol. Además, mientras mayor ramificación en la copa y área foliar presenten los árboles mayores cantidades de radiación solar podrán absorber (Tochaiwat k, 2023). Así, la densidad de su follaje permite regular la energía

radiante y disminuir la velocidad del viento a nivel del suelo (McPherson y Simpson, 1995, Ren *et al.*, 2023). Al mismo tiempo, es probable una mayor absorción de bióxido de carbono del aire, cuya disminución en la atmósfera es prioritaria en el ámbito urbano (Díaz-Porras *et al.*, 2014; Liang y Huang, 2023; Rasoolzadeh *et al.*, 2024). La capacidad de secuestro bruto de CO_2 en árboles urbanos, cuantificada como flujo neto de carbono asimilado, presenta una dependencia directa de atributos morfométricos foliares y estructurales, particularmente del índice de área foliar y la densidad de biomasa en la copa, que modulan la eficiencia fotosintética y la capacidad de almacenamiento (Jin *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024). La optimización de este servicio ambiental requiere trascender el enfoque individual hacia un análisis comunitario mediante el valor de importancia (VI), un índice sintético que pondera la abundancia relativa, frecuencia y dominancia de las especies (Thomas *et al.*, 2022; A. K. Singh *et al.*, 2023).

A través de esta interacción con el ambiente los árboles pueden ser elementos naturales con efectos micro climáticos favorables. Tales propiedades son especialmente importantes en las calles, por ser una fuente de alta carga de gases contaminantes debido a la constante carga vehicular en una ciudad (Rakowska *et al.*, 2014, Mansour y Aljamil, 2022). No obstante, y a pesar de tales beneficios, el espacio que brindan las calles es muy limitado para el desarrollo de los árboles (Mullaney *et al.*, 2015). Por tanto, los dos tipos de área verde que frecuentemente se localizan en la calle son la franja verde de banqueta o el camellón. Cuando este último está habilitado como área verde a lo largo de la calle plantea ciertas condiciones urbanas y ambientales que pueden influir tanto en la morfología como en las funciones de los árboles. Además, otros factores que pueden influir en la variación de los árboles son las propiedades genéticas, morfológicas de cada especie, así como los efectos ambientales derivados del clima urbano, el suelo antrópico y la limitación de espacio subterráneo.

En cuanto al camellón, sus características propias del diseño como el uso y otras particularidades del entorno son importantes para determinar el grado de influencia en el arbolado. Por ejemplo, es necesario saber el tipo de flujo de tráfico que va a separar el camellón, el nivel de seguridad vial de la calle en cuestión (ODOT, 1996; Fitzpatrick *et al.*, 2004; Findley, 2016) o los estándares de tipo y diseño de calles (City of Melbourne, 2010; National Association of City Transportation Officials, 2012). Otros factores son la configuración urbana y la disposición de edificaciones circundantes que pueden afectar el crecimiento de los árboles (Czaja *et al.*, 2020). Un aspecto importante de la configuración urbana es la orientación de la calle al variar la energía solar aprovechable en el suelo y otras superficies, especialmente en latitudes entre 20° y 40° (Boeters *et al.*, 2012; Cedano Billini, 2013). La orientación de una calle puede marcar el grado de exposición solar que recibe el árbol establecido en el espacio urbano (Shashua-Bar y Hoffman, 2003; Zielonko-Jung y Janiak, 2022). Además, el grado de exposición de luz solar también depende de la proporción altura de edificio - ancho de calle. La proporción entre la altura del edificio y el ancho de calle (AE–AC) es un fenómeno que permite identificar configuraciones urbanas contrastantes, como calles amplias con edificaciones bajas o calles estrechas con edificios altos (Oke, 1988b). Estas condiciones modifican la disponibilidad de radiación solar, influyendo en la fisiología del arbolado urbano. En especies adaptadas a alta luminosidad, la reducción de luz puede disminuir la fotosíntesis máxima, reducir el punto de compensación lumínica y generar hojas más delgadas (Kjelgren y Clark, 1992). En cambio, en especies tolerantes a la sombra, la restricción de luz puede favorecer su desempeño fotosintético (Takagi y Gyokusen 2004).

La configuración del medio construido es importante para conocer las condiciones que enfrenta el área verde. El arreglo de los elementos construidos puede condicionar las características del espacio de la calle (Guzzetti *et al.*, 2019; Wan Ismail *et al.*, 2020; Fang *et al.*, 2021). Generalmente, la creación de un camellón depende del espacio disponible, el tipo de calle y su función en la zona urbana (ODOT, 1996; City of Melbourne, 2010; DOT, 2015), y a su vez esto define las dimensiones y el ancho del mismo (SEDATU, 2019), afectando el espacio disponible de área verde. Entonces, la función de la vialidad también puede influir en las dimensiones de los camellones. Según IMPLAN de Hermosillo (2017) si el camellón forma parte de la infraestructura verde de la ciudad, su amplitud variará según el tipo de técnica, como jardín de lluvia (máximo 15 m), jardín de microcuenca (mínimo 2 m), pozo de infiltración (mínimo 15 m)

o drenaje francés (mínimo 0.5 m). Por otro lado, el reglamento de parques y jardines del Ayuntamiento de San Luis Potosí (2002) menciona en los artículos 37 a 40 del Reglamento de Parques y Jardines Públicos de la ciudad establece categorías de amplitud de camellones, especificando el tamaño de las franjas de tierra según el tipo de especies vegetales, indicando que en camellones de 30-40 cm (Art. 37) y ≥41 cm (Art. 38) se permiten especies como camelia, mezquite o ciprés de Arizona, y en camellones de 76-120 cm (Art. 39) y 121-200 cm (Art. 40) se autorizan árboles de mayor porte como liquidámbar, fresno o palma washingtonia.

Otro factor fundamental es el manejo de los árboles en la calle, ya que este puede afectar el desarrollo de los mismos y los beneficios ambientales que ofrecen. Por tanto, las dimensiones de los árboles experimentan limitaciones en el espacio verde, tanto en el desarrollo radicular como en la ramificación aérea. Una de las causas más notorias de alteración en la morfología del arbolado urbano son las podas mal aplicadas. Estas prácticas pueden inducir el desarrollo de brotes excesivos que modifican la estructura natural de la copa y afectan el patrón de crecimiento del árbol (Suchocka *et al.*, 2021). La poda en el nivel de copa reduce sus funciones en cuanto a los servicios ecosistémicos que proporcionan (Tan *et al.*, 2021). Prácticas de manejo inadecuadas no solo alteran la estructura del árbol, sino que también disminuyen su valor de importancia y su capacidad de secuestro de carbono, afectando directamente beneficios como la mitigación del cambio climático y la calidad del aire (Muscas et al., 2024; Speak y Salbitano, 2023).

Una práctica de manejo inadecuado (desmoche) o de afectación mecánica puede generar diferentes efectos, desde el estrés fisiológico (Cox, 2011) hasta el debilitamiento de la estructura del árbol (Suchocka *et al.*, 2021). En contraste, la conformación de espacios de vialidad con arbolado en buenas condiciones permite servicios ambientales favorables en zonas de tránsito vehicular (Langenheim *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2020), así como mayor protección y confort para los peatones (Sanusi *et al.*, 2017; Srivanit y Jareemit, 2020; Eisenman *et al.*, 2021).

Finalmente, las formas, funciones y condiciones de los árboles urbanos pueden experimentar constantes afectaciones debido al entorno urbano. El presente estudio analiza cómo la amplitud del camellón influye en la morfología de tres especies arbóreas y, consecuentemente, en su valor de importancia (VI) y secuestro bruto de carbono (SBC), métricas clave para evaluar su contribución ambiental al entorno urbano. Se plantea que, ante una mayor amplitud del camellón, los atributos morfométricos de los árboles permitirán reflejar mayores beneficios ambientales. A este respecto, los árboles de camellón bajo condiciones de menor condición de manejo y morfología inalterada fueron claves para el estudio. De esta manera, en esta investigación se determinó la variación morfométrica de tres especies de árboles bajo tres diferentes anchos de camellón en calles de la ciudad de San Luis Potosí,

MATERIALES Y MÉTODO

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la ciudad de San Luis Potosí, México, que se localiza entre las coordenadas 22° 01' 34" - 22° 13' 06" Latitud Norte y 101° 02' 39" - 100° 53' 21" Longitud Oeste. Su altitud promedio es de 1,863 m s.n.m; los climas dominantes son árido templado con inviernos secos (BWkw), semiárido templado con inviernos secos (BS_0kw) y semiseco templado (BS_1w) (García, E.2004; INEGI, 2017). Noyola-Medrano et al . (2009) señalan que la precipitación anual promedio es inferior a 400 mm, mientras que la temperatura media anual es de 17 °C, con máximas de 34 °C y mínimas de 0 °C. La época cálida se presenta de marzo a octubre, y la fría, de noviembre a febrero. Por otro lado, Tejeda-Martínez y Gómez-Azpeitia (2015) indican que San Luis Potosí es una de las regiones del país con mayores horas de insolación anual estimada a través de la frecuencia de días nublados, la nubosidad media y la cantidad de días despejados.

Definición de sitios y especies de árboles objeto de estudio

Selección de las áreas de estudio

La metodología empleada se fundamenta en un enfoque de análisis espacial urbano que incorpora herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), las cuales permiten integrar

múltiples capas temáticas provenientes de distintas fuentes y escalas bajo un mismo sistema de coordenadas. Esta capacidad facilita la realización de operaciones espaciales complejas y la generación automatizada de mapas derivados (Correa, 2018; Hernández López y Montalvo Vargas, 2020). En este estudio, la metodología se fundamenta en un enfoque de análisis espacial urbano que integra herramientas SIG de uso nacional con delimitaciones institucionales locales. En particular, se utilizó un mapa base (Figura 1) sobre el cual se integraron datos vectoriales que delimitan la ciudad de San Luis Potosí y su estructura urbana, obtenidos del Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020b), así como de las manzanas del Inventario Nacional de Vivienda (INEGI, 2020a). Posteriormente, se incorporaron los límites distritales de la zonificación secundaria del centro de población definidos por el Programa de Desarrollo Urbano (IMPLAN SLP, 2021). La estructura específica de capas vectoriales fue adaptada al contexto local con el fin de representar con mayor precisión la configuración urbana del área de estudio.

Para efectos de este estudio, se entiende por camellón a la franja central ubicada entre carriles de circulación vial con funciones de separación del tránsito vehicular y, en muchos casos, con presencia de cobertura vegetal (National Academies of Sciences, 2023; SEDATU, 2023). Con base en esta definición, el estudio se llevó a cabo en tres de los cinco distritos en que se divide la ciudad, cuya selección fue por el alto número de calles con presencia de camellones. A continuación, al mapa base se incorporaron los datos vectoriales del Servicio e Información Complementaria de Tipo de Área, incluidos en el Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020b), los cuales detallan la ubicación de los camellones en la ciudad. A partir de esta información, se identificó un total de 1,033 camellones en los 3 distritos mencionados, de los cuales se seleccionaron únicamente aquellos que presentaron cubierta arbórea, resultando en un conjunto de 179 camellones considerados para el estudio.

Selección de especies

A partir de los 179 camellones seleccionados (Figura 1) se hizo un conteo mediante recorridos de campo, en el que se identificaron las especies arbóreas con un total de 2,134 individuos. De este total, el 47.5% correspondió a diversas especies, entre ellas eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.), casuarina (*Casuarina equisetifolia* L.), araucaria (*Araucaria heterophylla* (Salisb.) Franco), álamo canadiense (*Populus* × *canadensis*), trueno (*Ligustrum lucidum* W.T. Aiton), mezquite (*Prosopis laevigata* (Willd.) M.C. Johnst.), ciprés (*Cupressus sempervirens* L.), jacaranda (*Jacaranda mimosifolia* D. Don) y pirul brasileño (*Schinus terebinthifolia* Raddi). El 52.5 % restante estuvo conformado principalmente por laurel de la India (*Ficus microcarpa* L.f.), fresno (*Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh.) y pirul (*Schinus molle* L.). Estas tres últimas especies fueron seleccionadas como objeto de estudio por constituir el grupo mayoritario del arbolado registrado, superando en abundancia relativa a las demás especies identificadas.

Con base en dicho grupo mayoritario se contabilizó un total de 817 árboles, que a su vez se debieron seleccionar debido las condiciones de salud, afectaciones por manejo y acercamiento entre individuos. Así, los criterios fueron seleccionar ejemplares de etapa adulta, con fisonomía y salud aparentemente favorables, sin signos visibles de deterioro estructural, con copas completas sin interferencia entre individuos y afectación por manejo intensivo (desmoches) (Pokorny *et al.*, 2003; City of Shenandoh, 2006; Roberts *et al.*, 2006). Bajo estos criterios, resultó una muestra de 306 árboles, compuesta por 127 fresnos, 99 laureles de la India y 80 pirules. El tamaño de muestra fue de 133, 102 y 71 en ancho de camellón estrecho, mediano y amplio, respectivamente.

Núm. 60: 199-227 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

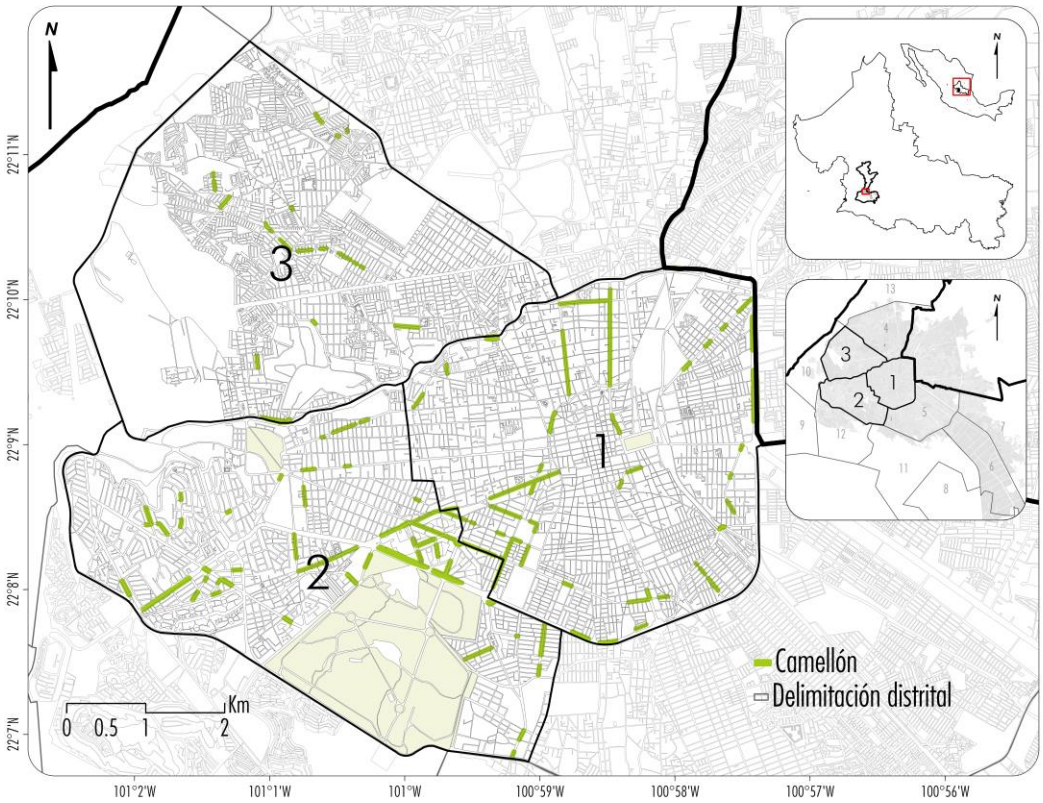


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio en camellón localizados en tres distritos de la ciudad de San Luis Potosí.
Figure 1. Location of the study sites on median strips in three districts of the city of San Luis Potosí.

Mediciones morfométricas

Una vez determinada la muestra de árboles en los distintos tratamientos de camellón, cada individuo fue georreferenciado en campo mediante un GPS eTrex 10 de la marca Garmin. De manera simultánea, se realizó la evaluación morfométrica de cada ejemplar, conforme a los criterios establecidos en la metodología del estudio y alineado con las pautas de (USDA Forest Service, 2021). para la estimación de servicios ambientales, las cuales requieren datos morfométricos arbóreos para obtener resultados precisos y representativos de los beneficios que ofrece el arbolado. En este sentido, se registraron las variables de diámetro normal o a la altura del pecho (DAP), la altura total del árbol (Aa), el área de proyección de copa (APC) y la altura de la base de la copa medida a 1.30 metros del suelo (ASC). Dichas variables son reconocidas en la literatura (Tan *et al.*, 2021; Amer *et al.*, 2023; Hintural *et al.*, 2024; Sharma *et al.*, 2025) como indicadores clave para evaluar la estructura del arbolado urbano y su capacidad para proporcionar servicios ambientales.

El DAP se midió con una cinta métrica alrededor del tronco y a la altura del pecho, cuyo cálculo se apoyó en Agriculture, Fisheries and Conservation Department (2006) mediante la siguiente fórmula:

$$D = c/\pi$$

donde D representa el DAP (cm), c corresponde a la circunferencia (cm) y π es el valor constante de 3.1416. En el caso de árboles con múltiples troncos esta variable se estimó mediante el cálculo de Swiecki y Bernhardt (2001) mediante la fórmula:

$$D = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_n^2}$$

donde D representa el diámetro total a la altura del pecho (DAP) del árbol, y d_1, d_2, ..., d_n corresponden a los DAP individuales de cada tronco, medidos por separado. La altura de cada árbol se midió con un clinómetro de altura tangente (Forestry Suppliers, 2007). Para determinar la cobertura o diámetro de copa se empleó la proyección ortogonal, cuyo valor se basa en el grado de sombra vertical (Benavides-Meza y Young-Fernández Grandizo, 2012). Otra variable fue la altura del suelo a la copa, representada como la distancia vertical desde el suelo hasta el punto más bajo del follaje vivo de la copa. Si la base de la copa estuvo en contacto con el suelo se acepta la asignación de un valor cero de acuerdo con USDA Forest Service (2017) (Figura 2). La altura del suelo a la copa se utilizó exclusivamente para evaluar la estructura del árbol y los servicios ambientales asociados, los cuales se detallan más adelante.

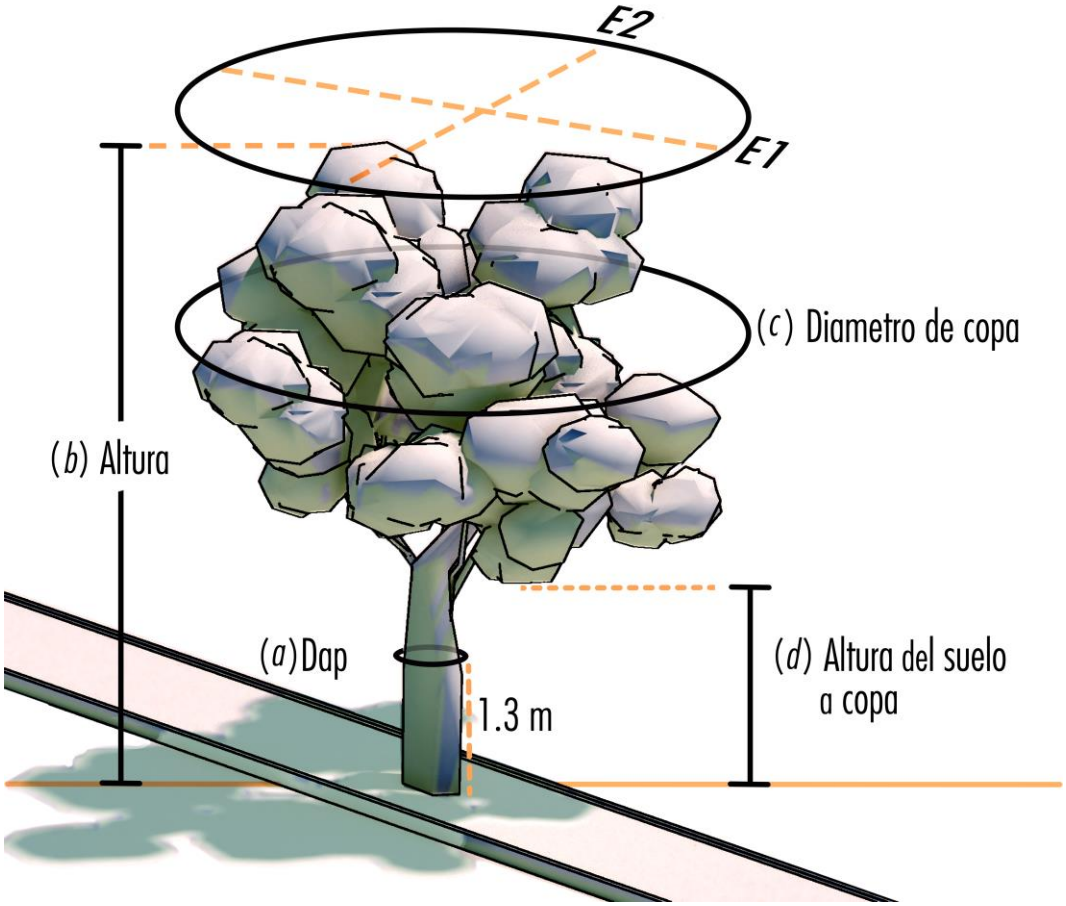


Figura 2. Medidas morfométricas realizadas a cada árbol de camellón.
Figure 2. Morphometric measurements taken for each tree on the median strip.

Con los datos morfométricos se hizo una evaluación entre datos de las variables para determinar relaciones entre sí y con el ancho de camellón. Esta evaluación incluyó gráficos de caja para valorar el DAP, Aa y APC de las tres especies de árboles, análisis de regresión lineal para determinar las relaciones entre tales variables, y gráficos de barras para comparar las medidas morfométricas según el tipo de ancho de camellón y especie.

Núm. 60: 199-227 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Configuración urbana en relación con la morfometría

Para determinar el ancho de camellón se utilizó una cinta métrica de 50 m (marca Cadena, modelo FG 5001) cuyas medidas se agruparon en tres intervalos (≤1.8 m, >1.8 - 5 m, y >5 m) (Figura 3a). Para este valor se tomó la distancia entre paramentos de la calle y perpendicular a cada camellón, con el cual se determinó el ancho de calle. La medida de altura de los edificios se determinó a partir de la altura promedio de la altura de un piso. Este cálculo sirvió como medida base al considerar los edificios de uno o más pisos en sentido perpendicular al camellón. Se obtuvo este valor en ambos lados de la calle y después se calculó el promedio, por lo que este resultado fue el que se empleó en la relación altura de edificio - ancho de calle (AE-AC).

Para evaluar la orientación de las calles con los camellones se evaluó en grados decimales considerando el 0° como el Norte, mediante el programa Google Earth Pro. De esta manera, se definieron las cuatro direcciones Norte-Sur (N-S), Este-Oeste (E-O), Noreste-Suroeste (NE-SO) y Noroeste-Sureste (NO-SE) (Figura 3b). También, de acuerdo con la función dentro del sistema urbano (INEGI, 2013) se definieron las categorías de calles primaria, secundaria y terciaria. Las calles primarias o avenidas principales cumplen la función de arterias de mayor tránsito y facilitan la movilidad urbana. Las calles secundarias representan vialidades de menor tránsito que funcionan como conectores locales y las terciarias son de tránsito local, con acceso directo a las zonas residenciales y comerciales. Con base en estas categorías la relación AE-AC se estimó en ≤0.3, 0.3 – 1 y ≥ 1 para las calles primarias, secundarias y terciarias, respectivamente (Figura 3c). Por lo tanto, la configuración urbana se define por el ancho del camellón, el tipo y la orientación de la calle, así como la proporción AE-AC para cada especie estudiada. Las figuras resultantes reflejan los valores promedio más altos encontrados para cada variable morfométrica.

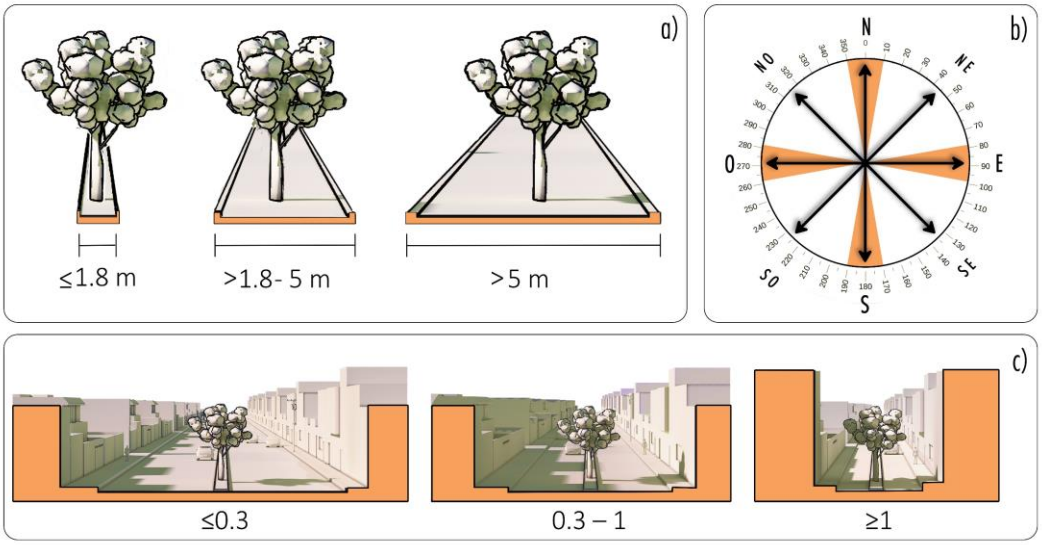


Figura 3. Categorías del ancho de camellón (a), la determinación de los cuatro tipos de orientación del camellón (b) y la relación altura de edificio – ancho de la calle (c).

Figure 3. Classification of median strip width categories (a), identification of the four types of median strip orientation (b), and the building height-to-street width ratio (c).

Valores ambientales y estimaciones a través de i-TREE eco

El software i-Tree Eco™ versión 6 se utilizó para cuantificar y modelar el valor ambiental y funcional del arbolado urbano a partir de los datos morfométricos recopilados. A través de este análisis se estimaron variables indirectas que reflejan la importancia y los servicios ambientales proporcionados por las especies estudiadas. A partir de esta herramienta se calculó el Valor de Importancia (VI), un índice que sintetiza la relevancia ecológica y estructural de cada especie

basado en su frecuencia, densidad y dominancia relativa. Otra variable estimada fue el Área Foliar (AF), que corresponde a la superficie total proyectada de las hojas expresada en metros cuadrados y que está relacionada con la capacidad fotosintética. Así mismo, se evaluó el Secuestro Bruto de Carbono (SBC), que representa la cantidad estimada de carbono fijado por los árboles en kilogramos por año, cuyo indicador es clave para determinar el servicio ambiental en cuanto a su mitigación. Estas variables fueron seleccionadas por su estrecha relación con la aportación ambiental del arbolado en la ciudad, particularmente en la vialidad, donde contribuyen a mejorar la calidad del aire, regular la temperatura y mitigar emisiones de carbono, favoreciendo así la sustentabilidad urbana.

Análisis estadístico

Para valorar las diferencias estadísticas entre las variables morfométricas (DAP, Aa y APC) y el ancho de camellón entre especies se utilizó el software libre RStudio™ versión 4.4.2. mediante un análisis de varianza (ANOVA). Además, se empleó una prueba pos-hoc de Tukey para determinar qué grupos presentaban diferencias significativas entre sí. Este análisis permitió identificar las relaciones y discrepancias específicas entre las especies estudiadas, proporcionando una base sólida para interpretar las variaciones en las variables morfométricas en función del ancho de camellón.

Para evaluar la relación entre las características morfométricas de los árboles (DAP, Aa y APC) y el ancho del camellón, se realizó un análisis de Escalado Multidimensional No Métrico (NMDS, por sus siglas en inglés) mediante el software libre RStudio. Este análisis empleó la distancia de Bray-Curtis para generar una matriz de disimilitud entre individuos, ajustando los datos en dos dimensiones (k = 2). Las coordenadas obtenidas del NMDS se asociaron a las especies de los árboles mediante una codificación por color. La visualización de los resultados se realizó con el paquete ggplot2, graficando los dos ejes principales (NMDS1 y NMDS2) y con elipses que reflejan la varianza dentro de cada grupo de especies. Este enfoque permitió identificar diferencias o similitudes en la morfometría de los árboles según su especie y el ancho del camellón, proporcionando una representación visual de los patrones de agrupación entre especies.

RESULTADOS

Variables morfométricas en función de la especie

El valor promedio del DAP más alto fue el de pirul (67.2 cm) y el menor de fresno (33.9 cm). No obstante, el rango intercuartílico más bajo resulto en fresno (23.9 a 40.5 cm) y el más alto en pirul (42.2 a 83.5 cm). Más allá de este rango se presentaron tres valores atípicos en fresno y uno en pirul (Figura 4a). En cuanto a la altura (Aa) el valor promedio más alto fue el del pirul con 12.5 m y el más bajo fue del fresno con 10.2 m. En estas mismas especies, el rango intercuartílico más alto fue del pirul (9.7 m a 15.2 m) y el más bajo del fresno (8.7 a 11.2 m), presentando seis valores atípicos en fresno fuera de este rango (4b). En la variable ACP el valor promedio más alto fue del pirul (193 m²) y el menor en fresno (95.5 m²), con un rango intercuartílico mayor (98.4 m² a 277 m²) y menor (13.9 m² a 194.4 m²), respectivamente. En este último parámetro, más allá del rango intercuartílico se presentaron seis y tres valores atípicos en fresno y laurel de la India, respectivamente (Figura 4c).

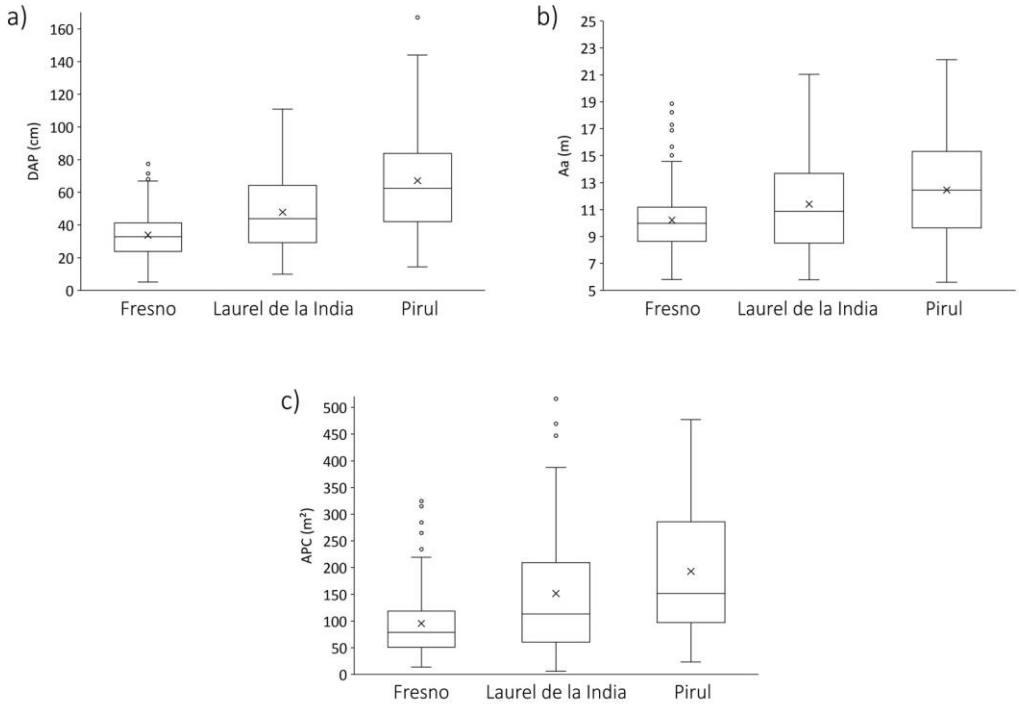


Figura 4. Variación del diámetro a la altura de pecho (DAP) (a), altura del árbol (Aa) (b) y área de proyección de copa (APC) (c) en las especies estudiadas.
Figure 4. Variation in diameter at breast height (DAP) (a), tree height (Aa) (b), and crown projection area (APC) (c) among the studied species.

En las pruebas de regresión lineal la fuerza de asociación entre Aa con DAP y APC con DAP no indicó resultados significativos en las tres especies. En tales pruebas la nube de puntos fue más compacta en fresno, pero más dispersa en las otras especies, por lo que la relación entre variables resultó débil para que los datos se ajusten a una línea recta (5a y 5b). Por el contrario, en la asociación entre APC y Aa, la respuesta de pirul indicó un R^2 de 0.74 (F=2.2, P=0.00) y valores de residuales simétricos en el análisis de varianza, lo que indica que el modelo fue significativo. En fresno y laurel de la India, si bien el valor de R^2 fue de 0.73 (F=351.4, P=0.00) y 0.75 (F=293, P=0.00), respectivamente, los residuales fueron asimétricos. Por lo tanto, la altura del árbol mostró proporcionalidad con el área de proyección de copa en fresno y laurel de la India, pero con una respuesta de menor significancia estadística (Figura 5c).

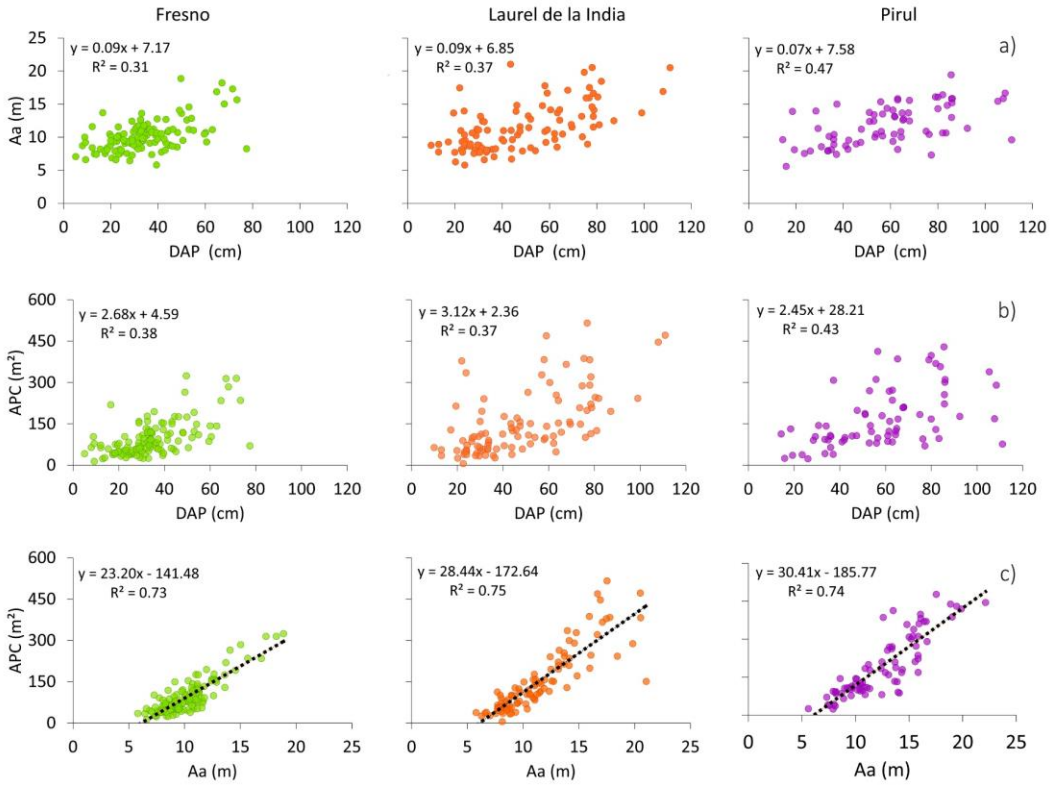


Figura 5. Regresión lineal de la altura del árbol y el DAP en (a), el área de proyección de copa y el DAP (b) y el área de proyección de copa con la altura del árbol (c) en fresno, laurel de la India y pirul.
Figure 5. Linear regression between tree height and DAP (a), crown projection area and DAP (b), and crown projection area and tree height (c) for ash, Indian laurel, and Peruvian pepper trees.

En cuanto a la variación de cada medida morfométrica en función de los tratamientos el pirul fue la especie con el valor más alto de DAP (75.3 cm) en el camellón estrecho. En esta especie el ANOVA mostró diferencias significativas entre todas las categorías de camellón ($F = 4.039$, $P = 0.021$) y para la prueba de Tukey fue significativo entre camellón mediano y amplio con respecto al estrecho ($P = 0.016$) y también entre el amplio con el estrecho ($P = 0.048$). En segundo lugar, el laurel de la India alcanzó un máximo de 56.5 cm en el camellón mediano, con diferencias significativas entre camellón mediano y estrecho ($p = 0.016$) en la prueba de Tukey. Por último, el valor más alto del fresno fue de 40.5 cm y sin significancia estadística entre los tres tipos de camellón. Estos resultados indican que la categoría camellón amplio y mediano fueron más favorables para pirul y laurel de la India, mientras que para fresno el DAP respondió de manera indistinta (Figura 6a).

De las tres especies el pirul alcanzó la altura de 13.4 m en camellón estrecho y laurel de la India de 12.2 m en camellón mediano. Ambos sin diferencias significativas en las respuestas entre las categorías de camellón. Por el contrario, el fresno obtuvo un valor máximo de 12.2 m en camellón amplio y esta respuesta fue estadísticamente diferente del camellón mediano y estrecho ($F = 6.379$, $P = 0.002$) en el ANOVA. Así mismo, en la prueba de Tukey el análisis mostró diferencias significativas entre camellón amplio y estrecho ($P = 0.004$) y también entre amplio y mediano ($P = 0.002$). La altura más baja fue de 9.9 m correspondiente a fresno en el camellón mediano. Estos resultados indican que, en las especies pirul y laurel de la India, la variación en el ancho del camellón no tiene un efecto significativo sobre la altura de los árboles. Sin embargo, en el caso

del fresno, sí se observa un efecto positivo, con mayores alturas registradas en el camellón amplio (Figura 6b).

En cuanto a área de copa el valor más alto fue de pirul con 207.6 m^2 en camellón amplio y en segundo lugar laurel de la India con 157.8 m^2 en el camellón mediano. Al no encontrar diferencias estadísticas en las pruebas sugiere que el ancho de camellón no tiene efecto la medida del APC en estas dos especies. Por el contrario, el ANOVA mostró diferencias significativas en los valores de fresno entre el camellón amplio con respecto a los demás ($F = 8.429$, $P < 0.001$) y Tukey entre el mediano y amplio ($P<0.001$). En esta última especie el valor más alto fue de 156 m^2 en camellón amplio. Por lo tanto, una mayor dimensión del camellón si puede influir positivamente en el APC de fresno (Figura 6c).

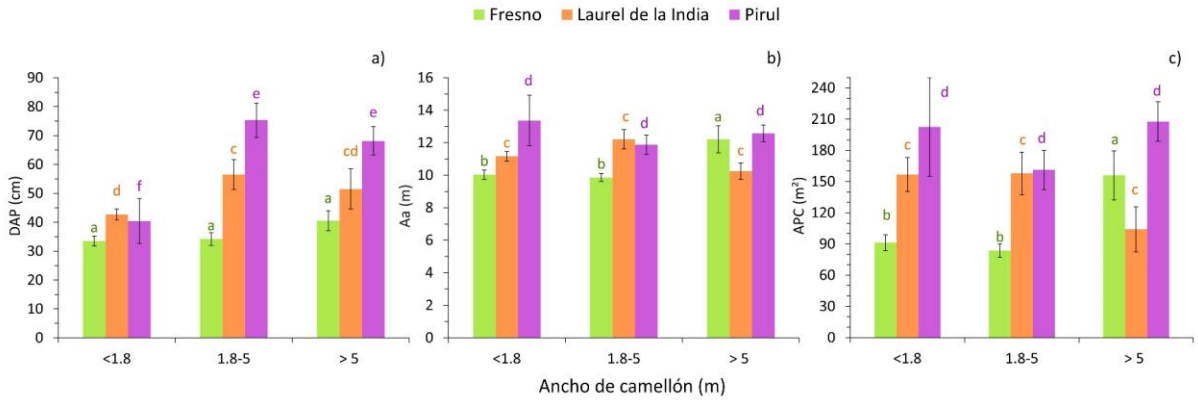


Figura 6. Variación del DAP (a), Aa (b) y APC (c) según las tres categorías de ancho del camellón. Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas entre las de medias, realizadas dentro de cada especie para cada variable, sin realizar comparaciones entre especies.

Figure 6. Variation in DAP (a), Aa (b), and APC (c) according to the three median strip width categories. Letters above the bars indicate statistically significant differences between means, assessed within each species for each variable, without comparisons across species.

Situación del arbolado en función de la configuración urbana

De acuerdo con la Figura 7 se muestra la situación del arbolado en camellón por especie en relación con la configuración urbana. El pirul mostró hasta tres variedades de configuración urbana, dos en laurel de la India y una sola para fresno. En esta última especie, y de acuerdo con los valores promedio de 41.7 cm de DAP, 12.7 m de Aa y 165 m^2 de APC, los árboles se encontraron preferentemente en una sola situación. Estos valores sobre la situación del fresno reflejaron una orientación noreste-suroeste, una proporción AE-AC menor a 0.3, por lo general de tipo terciarias y ancho de camellón amplio. En laurel de la India, con 65.9 cm de DAP, 14.4 m de Aa y 283.4 m^2 de APC, la situación se definió en dos tipos de calle. La primera fue orientación noreste-suroeste, proporción AE-AC menor a 0.3, de tipo secundaria y con ancho de camellón estrecho. La segunda resultó con orientación este-oeste, un intervalo de 0.3 a 1 en la proporción AE-AC, en calle secundaria y con ancho de camellón mediano. Por último, en pirul y con valores de 103.6 cm de DAP, 14.3 m de Aa y 259.3 m^2 de APC la situación resultó en tres variedades. En la primera, la orientación fue noreste-suroeste, con 0.3 a 1 de proporción AE-AC, calle primaria y camellón amplio. En la segunda variedad de situación fue de orientación y proporción iguales que la primera, pero con calle terciaria y de camellón estrecho. La última variedad para pirul fue de orientación norte-sur, con 0.3 de proporción AL, en calle primaria y camellón mediano (Figura 7).

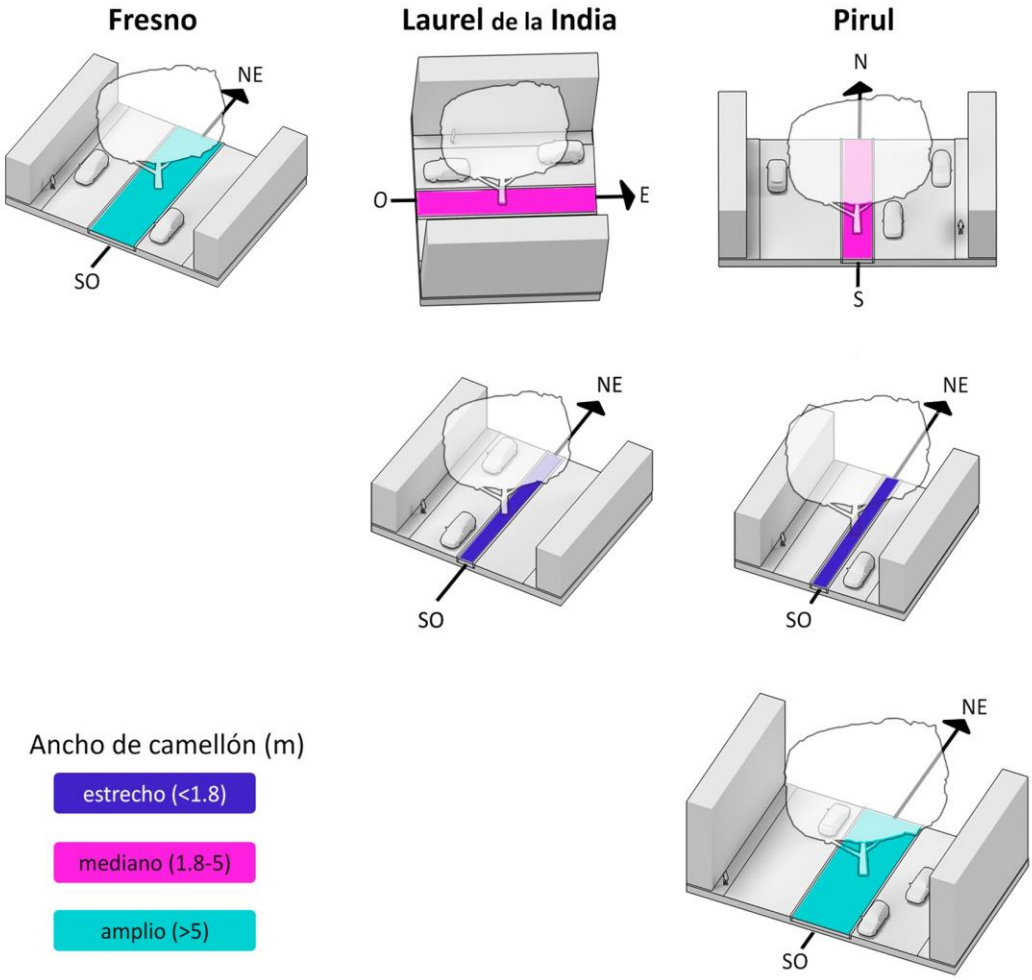


Figura 7. Situación del arbolado en camellón basados en el promedio máximo de DAP, Aa y APC por especie en función de la orientación, la proporción AE-AC y el tipo de vialidad.
Figure 7. Tree placement in median strips based on the maximum average DAP, Aa and APC per species, as a function of orientation, the proportion AE-AC and type of roadway.

Valores estimados mediante i-TREE Eco

De acuerdo con los valores estimados de i-TREE Eco la especie con mayor VI fue la de fresno con 70.8, después laurel de la India con 65.5 y pirul con 63.8. Al evaluar este parámetro en función del ancho de camellón el valor más alto fue laurel de la India con 39.9 y después fresno con 36.7, ambos en camellón estrecho, y por último pirul con 39 en camellón amplio (Figura 8a). Sobre el AF, el valor promedio más alto resultó en pirul con 236.2 m^2, le sigue el laurel de la India con 168 m^2 y por último el fresno con 115.8 m^2. En la variación de acuerdo con las categorías de camellón el pirul registró el mayor AF (252.6 m^2) en el camellón amplio y laurel de la India 181.4 m^2 en el camellón estrecho. En fresno, el valor más alto de AF fue de 145.4 m^2 en el camellón amplio. De esta manera, en AF destacó el pirul con el valor más alto de AF en todas las categorías de camellón y entre todas las especies, mientras que el fresno resultó con las estimaciones más bajas (Figura 8b). Acerca del SBC la especie con mayor respuesta fue el fresno al alcanzar un valor de 10.2 kg/año, después le sigue el laurel de la india con 4.9 kg/año y por último el pirul con 3.4 kg/año. En cuanto a la respuesta por sitio el fresno alcanzó 12.6 kg/año en el camellón amplio, que fue significativamente mayor que en los demás camellones y también

con respecto a las demás especies. Como segundo lugar se encuentra el laurel de la India con 6.4 kg/año en el camellón amplio y pirul con 4 kg/año en el mediano, pero sin diferenciación estadística en la muestra de datos por especie (Figura 8c).

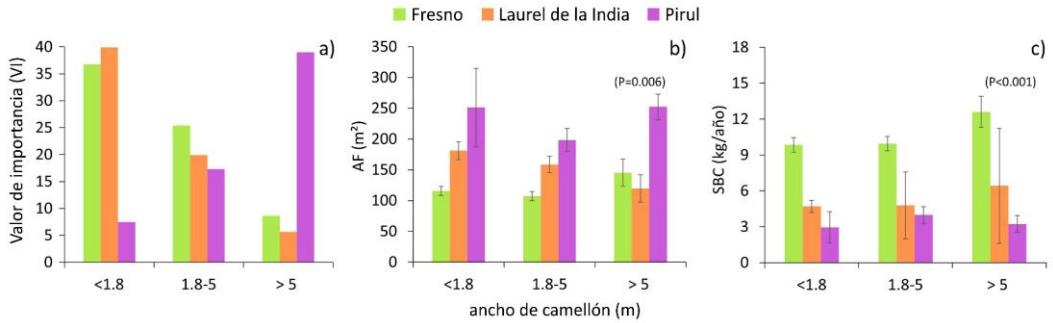


Figura 8. Valores promedio del valor de importancia (VI; a), área foliar (AF; b) y secuestro de carbono bruto (SBC; c) estimados a partir de I-TREE Eco en las tres especies de árboles estudiadas en función de las tres categorías de ancho de camellón.
Figure 8. Average values of importance value (VI; a), leaf area (AF; b), and gross carbon sequestration (SBC; c) estimated using i-Tree Eco for the three tree species studied, according to the three median strip width categories.

Análisis Escalado Multidimensional No Métrico

Los resultados del análisis NMDS indicaron que no hay variación significativa en la morfometría del arbolado en función del ancho del camellón, ya que los puntos correspondientes a las tres especies se solapan ampliamente en el espacio definido por los ejes NMDS1 y NMDS2 (0.054). Los ejemplares de fresno y laurel de la India se agrupan predominantemente cerca del centro de la gráfica (cercanos a 0 en ambos ejes). Esto sugiere que sus características morfométricas son similares y que el ancho del camellón no tiene una influencia significativa en ellas. Los ejemplares del pirul exhiben un ligero cambio en la distribución, con algunos puntos desplazados hacia la región inferior de la gráfica (valores negativos en NMDS2), lo que indica un efecto menor y negativo del ancho del camellón sobre su morfometría. Sin embargo, en general, no se observa evidencia significativa que agrupe la morfometría de las especies de árboles según el ancho del camellón, como lo refleja el solapamiento general de los puntos en el espacio NMDS (Figura 9).

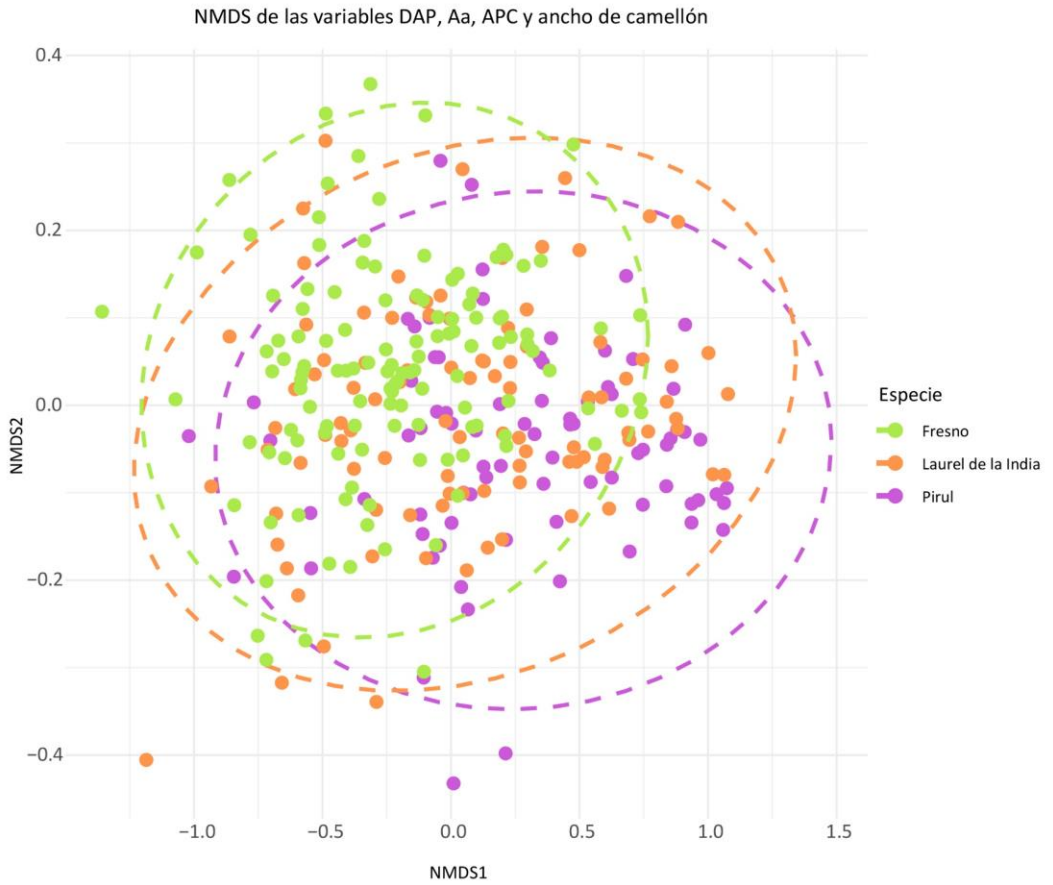


Figura 9. Gráfica del NMDS entre las relaciones entre las variables DAP (cm), Aa (m), APC (m²) y ancho del camellón (m).
Figure 9. NMDS plot showing the relationships among DAP (cm), Aa (m), APC (m²) and median strip width (m).

DISCUSIÓN

Variables morfométricas en función de la especie

Los valores promedio más altos del pirul en DAP, altura y área de proyección de copa, en comparación con el laurel de la India y fresno pueden deberse a algunos factores relacionados con las condiciones del ambiente. Probablemente, las condiciones son más adecuadas para el crecimiento del pirul en relación con las demás especies, debido a su mayor capacidad de adaptación a espacios restringidos, lo que explica su ventaja en las variables observadas. En otros estudios, se ha documentado que las características biológicas y los factores ambientales del hábitat en calles pueden ser más favorables para unas especies en relación con otras. Por ejemplo, en el trabajo de Stoffberg *et al.* (2008) destacan la altura y diámetro de copa en *Combretum erythrophyllum, Searsia lancea* y *Searsia penduline.* También, Dahlhausen *et al*. (2016) indican que los árboles de *Araucaria cunninghamii, Khaya senegalensis* y *Quercus nigra* sobresalieron en cuanto al DAP, altura del árbol y radio de copa, entre otras especies. Así mismo, Yang et al (2023) señala que algunas especies como *Ginkgo biloba, Koelreuteria paniculata,* y *Populus* spp. mostraron un mayor DAP, altura del árbol y dimensiones en general de copa en comparación con otras especies.

Algunos de los factores extrínsecos a la especie como los recursos disponibles también son de relevancia para determinar el desarrollo de una especie de árbol, como el caso del pirul. Uno de los recursos de peso puede ser el agua disponible para los árboles, especialmente en condiciones de espacios urbanos. Cabe señalar que en el presente estudio el suministro de riego no fue parte

de los programas de mantenimiento por parte del gobierno municipal. Por ejemplo, de acuerdo con McPherson *et al.* (2016) las prácticas de manejo como el riego pueden influir significativamente en el desarrollo arbóreo, especialmente en el tamaño de la copa. Por tanto, es posible que la ausencia de riego en los árboles estudiados puede estar asociada con una necesidad hídrica mayor en los ejemplares de climas templados y tropicales, como es el caso del fresno y el laurel de la India, respectivamente.

Si bien los tres árboles estudiados son de porte grande es importante notar que se trata de especies de diferente situación climática y también de variación morfométrica distinta. Otro factor que debemos señalar es la diferencia en el tamaño de muestra por especie, por ejemplo, lo que indicó las variaciones morfométricas en los gráficos de cajas y bigotes. No obstante, a pesar del tamaño de muestra del pirul solo se presentó un valor fuera de la caja y bigote del DAP y tres del laurel de la India en el área de proyección de copa. Mientras tanto, en fresno fueron tres, seis y cinco valores fuera de las cajas y bigotes en DAP, área de proyección de copa y altura, respectivamente. En relación con esto, las circunstancias de los árboles urbanos pueden generar tales diferencias en el análisis de los tamaños de muestra entre especies. Pretzsch *et al.* (2015) señala que en muestras de 26 árboles como mínimo puede ser suficiente para analizar la morfometría como el DAP o la altura del arbolado.

Relaciones alométricas

De acuerdo con el análisis de regresión lineal la respuesta significativa fue entre el área de proyección de copa y la altura del árbol en las tres especies, como muestra la Figura 5c. Si bien este resultado mostró una relación significativa en las tres especies solo en pirul los residuales fueron simétricos, lo que sugiere que el modelo explica de mejor manera la relación alométrica en la especie. A pesar de ser significativa la relación entre altura y área de proyección de copa en fresno y laurel de la India, los residuales asimétricos sugieren mayor variabilidad en las medidas de copa o alturas de ciertos ejemplares. Entre algunos factores pueden mencionarse las mismas fluctuaciones en crecimiento que presentan los árboles urbanos, en específico los que se establecen en vialidades. No obstante, en el presente estudio la relación significativa entre altura del árbol y área de proyección de copa también es observable en las proporciones alométricas reportadas en árboles urbanos (Vaz Monteiro *et al.*, 2016, Chatziathanasiou *et al.* 2023; 2024, Lin, *et al* 2024).

Para el análisis de regresión lineal entre altura de árbol con DAP y entre área de proyección de copa con DAP los resultados fueron no significativos en las tres especies. Esto puede indicar una desproporción de crecimiento entre el ancho del tronco y la altura del árbol o la dimensión de la copa. En los valores de la Figura 5a y 5b se muestra la no linealidad de los datos en los gráficos de las pruebas de regresión. Por lo tanto, el DAP para los árboles urbanos evaluados no mostró una relación alométrica habitual en el presente estudio. La falta de relación en los resultados entre DAP y las otras dos variables podrían indicar algún tipo de descompensación en el crecimiento en grosor o insuficiencia en la biomasa del tronco. Esto puede reflejar que en los árboles urbanos de vialidad redirijan la energía para el crecimiento de copa y altura en vez de aumentar la biomasa en términos del grosor del tronco. Aunque se requieren más estudios para demostrar dicho efecto en la respuesta del DAP un trabajo urbano relacionado puede sugerir algún aspecto en común. Hui *et al.*, (2020) indica que los árboles al borde de carretera pueden alterar su patrón de crecimiento por estar en espacio limitado y baja calidad del suelo para el desarrollo de sus raíces. Esto puede disminuir la fuerza de asociación entre la altura y el DAP en comparación con árboles de espacios verdes abiertos, donde el crecimiento y las relaciones alométricas suelen ser más favorables. Incluso, en un estudio sobre árboles urbanos de *Ficus* la falta de relación alométrica y variación morfológica se puede atribuir a limitaciones de espacio y del hábitat (Lin *et al.*, 2024). Además de tales circunstancias es probable que las copas de muchos tipos de árboles en calles se vean modificadas no por un evento de poda como tal, sino por la interferencia de diferentes agentes urbanos como el paso y roce de vehículos automotores de diferente tamaño. Por ejemplo, el tamaño de muestra de laurel de la India pudo haber sido mayor en ejemplares aislados de no ser por este efecto de modificación de copa.

Morfometría en relación con el ancho de camellón

De acuerdo con los resultados destacan los valores de DAP en pirul y laurel de la India, favorablemente en camellón mediano y amplio, mientras que en fresno la respuesta fue reducida y sin efecto alguno de acuerdo con el ancho de camellón. Es posible que en pirul y laurel de la India el espacio estrecho de un camellón pueda tener un efecto desfavorecedor en la respuesta del DAP y en fresno una respuesta indistinta. Aunque la literatura especializada de árboles urbanos no se ha documentado los efectos de las vialidades y camellones en la morfometría arbórea la explicación de estos resultados puede remitirse a ciertas observaciones. Este resultado del DAP también puede relacionarse con el hecho de que pirul y laurel de la India son dos árboles dominantes en cualquier tipo de espacio verde de la ciudad. Sin embargo, los ejemplares de fresno con mayor altura y DAP aparente se encuentran en situación de banqueta amplia (5 m) en una vialidad primaria de la ciudad. Esto puede sugerir que el crecimiento del fresno probablemente esté restringido a espacios de mayor extensión en el área verde de una calle. En una publicación de divulgación de la ciudad de San Luis Potosí, los árboles de porte grande más abundantes se encuentran asociados a franjas verdes de banquetas mayores a 3 m (Ramos-Palacios, 2019). Si bien las referencias sobre este resultado son del espacio de banqueta se puede tomar como un punto de referencia cualitativo en el espacio de vialidad, aunque no se trate del área de camellón. No obstante, las diferencias significativas en el DAP entre especies también pueden estar asociadas a sus particularidades morfológicas (Fatimah *et al.*, 2024; Peper *et al.*, 2001).

Si bien la altura de los árboles en pirul y laurel de la India no indicó una diferencia marcada entre los diferentes anchos de camellón se puede decir que el efecto es indistinto en ambas especies. Por el contrario, el efecto del camellón amplio se distinguió en la altura de los árboles de fresno, por lo que solo en esta especie parece importante el efecto de las dimensiones de esta área verde de calle. Aunque la literatura sobre la altura de árboles en calles es escasa, especialmente en áreas de camellón se pueden considerar trabajos bajo un contexto comparable. Sanders y Grabosky (2014) señalan que el tamaño y la configuración de las franjas de plantación pueden influir significativamente en el crecimiento de los árboles en espacios de estacionamiento 20 años después de su establecimiento. Tales autores indican que un aumento en el área de plantación está asociado con un mayor tamaño de los árboles después de un periodo de 18 a 23 años de crecimiento.

Sobre la respuesta del área de copa proyectada los árboles de pirul y de laurel de la India no parecen tener efecto alguno por la variación del ancho de camellón, aunque los valores de la primera especie fueron mayores que la segunda. Por el contrario, la respuesta de fresno, claramente mayor en el camellón amplio, por lo que la amplitud de la copa fue más favorable en esta condición espacial. Estos resultados sugieren que una superficie mayor de camellón es más favorable para la altura y copa del fresno, pero indistinto para los árboles de pirul y laurel de la India. Por lo tanto, el fresno muestra una mayor dependencia del espacio disponible en el camellón para el desarrollo de su altura y copa, a diferencia del pirul y el laurel de la India, cuyas dimensiones no parecen estar condicionadas por estas variables.

Es importante señalar que, durante el muestreo de datos, el fresno y laurel de la India mostraron brotes epicórmicos en la ramificación. Esto supone algún efecto de poda de sus copas en el pasado lejano, a pesar de su aparente falta de alteración en la selección de individuos evaluados. Al considerarse esta posibilidad es probable que tales especies sean más susceptibles a recibir manejo en situación de camellón que el pirul. Otro factor probable es la adaptación que esta especie tiene en un medio deficiente de espacio y recursos. Según Ramírez-Albores *et al.* (2015) el pirul en etapa adulta es capaz de aprovechar de manera eficiente el agua, la luz y los minerales, incluso en suelo alterados o compactados. Además, al inhibir el establecimiento de otras especies circundantes debido a su capacidad alelopática se reduce la competencia por los recursos y esto favorece su crecimiento.

Situación del arbolado en función de la configuración urbana

Aunque la traza urbana ofrece diferentes orientaciones de calles las especies evaluadas a partir de los promedios de morfometría preferentemente se localizaron en la orientación noreste-suroeste. Así, excepto la orientación este-oeste de laurel de la India y norte-sur de pirul la mayoría

de los árboles mostraron resultados más favorables en la noreste-suroeste. Esto puede obedecer a que los árboles en orientación noreste-suroeste la radiación solar adquirida la reciban sea intermedia en lugar de una condición de mayor exposición a lo largo del día en este-oeste o casi nula en la norte-sur. Por lo tanto, estas condiciones ambientales si pudieron afectar la muestra de árboles estudiados. Por otro lado, este efecto puede estar relacionado con las condiciones microclimáticas de las calles, pero también con la optimización de la absorción solar y el sombreado de los árboles de acuerdo con diferentes estudios (Bourbia y Boucheriba, 2010; Ahmadi Chatzidimitriou y Axarli, 2017; Venhari *et al.*, 2019).

Por otro lado, los resultados indican que los árboles evaluados se localizan en la proporción altura de edificio – ancho de calle (AE-AC) menor a 0.3 o de 0.3 a 1, es decir en las calles angostas con edificios altos no se localizaron árboles de camellón. Cabe mencionar que este tipo de calles mantiene arbolado en camellón, pero los ejemplares no fueron parte del estudio. Si bien la ciudad se encuentra en una región con alta frecuencia de horas de insolación anual y pocos días nublados la morfología de los árboles fue favorable en calles amplias y con edificios bajo. A pesar de la alta exposición a los rayos solares es probable que estas características en los árboles se compensen por su ubicación en calles con orientación noreste-suroeste, preferentemente, como se mencionó arriba.

Además, de acuerdo con el promedio de las variables morfométricas evaluadas, los árboles de las tres especies se localizaron preferencialmente en calles secundarias, después en terciarias y al final en primarias. Al evaluar con respecto a la especie, el fresno se encontró fundamentalmente en calles secundarias y menos en terciarias, pirul más en primarias que en terciarias y laurel de la India solo en terciarias. Esta observación cualitativa puede indicar la adaptación de los árboles al grado de tránsito vehicular por el tipo de calle. Así, los árboles de pirul y fresno fueron más tolerantes a las calles primarias de alto tránsito vehicular y las secundarias de mediano tránsito, respectivamente. Con respecto a laurel de la India los árboles tuvieron un mejor desempeño morfológico a las calles de tipo secundarias. Esto significa que los árboles presentaron, en su mayoría, signos de morfología favorable en calles de mediano tránsito vehicular.

Por lo tanto, en términos morfométricos los árboles de laurel de la India mostraron valores más altos en camellones estrechos y medios en comparación con lo encontrado en fresno. Aunque los resultados en laurel de la India fueron favorables en estos dos tipos de camellón por lo general esta especie requiere de espacios amplios para su desarrollo, además de tomar esto en cuenta para toda propuesta al planear las plantaciones urbanas. En contraste, mientras el fresno mostró mejor desempeño morfométrico en camellones amplios en pirul la respuesta fue indistinta, es decir que se desarrolló bien en las tres categorías de camellón. Esto puede indicar una amplia plasticidad espacial y morfológica del pirul a los diferentes anchos de camellón. Se puede decir que el pirul fue la especie cuya morfología y dimensiones se pueden adaptar de manera favorable a las condiciones de camellón sin importar la amplitud del mismo. En este mismo orden el laurel de la India resultó con una adaptación media, en la que su morfometría se favorece incluso en los camellones estrechos. En contraste, la morfología del fresno requiere de espacios amplios de camellón, por lo que esta especie muestra mayores restricciones espaciales y ambientales. La utilidad de este tipo de resultados puede incidir en los proyectos de diseño y planeación urbana. En un estudio sobre la configuración de calles en relación con el arbolado urbano en Grecia, Rantzoudi y Georgi, (2017) identificaron que los árboles de gran porte son particularmente adecuados para espacios de camellón de 30 m de ancho con orientación este-oeste, ya que favorecen las condiciones bioclimáticas y proporcionan un mayor sombreado. En otra investigación se precisa la relevancia de una fila central de árboles en calles con cierta orientación y proporción altura de edificio – ancho de calle al aprovechar la máxima radiación solar y producir sombreado varias horas del día (Mballo *et al.*, 2021).

La configuración urbana regula el microclima y la disposición del arbolado, aspectos clave para evaluar sus beneficios ambientales. En un meta-análisis se indica que los efectos de enfriamiento de los árboles urbanos son más significativos cuando se tienen en cuenta las características de la configuración urbana y el clima local (Li *et al.*, 2024). Esto viene determinado por las condiciones del clima urbano y en específico de la zona climática local de acuerdo con su composición y área en la ciudad (Stewart y Oke, 2012). Aunque tales estudios abordan la relación entre el arbolado

y la configuración urbana, son pocos los que se centran específicamente en cómo las características físicas de la calle influyen directamente en el desarrollo de los árboles urbanos. Por lo general, los diferentes estudios se enfocan en el efecto contrario, es decir en cómo las propiedades del arbolado impactan en el entorno urbano. Esto puede generar un vacío en como la orientación, el ancho de camellón y tipo de calle influyen en el crecimiento y características morfométricas de los árboles, por lo que se torna difícil la comparación con investigaciones previas.

Valores indirectos estimados en i-TREE Eco

Los resultados obtenidos a partir de la estimación de i-TREE Eco muestran que el fresno presentó un valor de importancia más alto y pirul el valor más bajo. El valor de importancia mide la relevancia de una especie arbórea en la ciudad según su cantidad de ejemplares y área foliar, reflejando su aporte a los servicios ambientales. Como lo reporta Hernández-López *et al.*, (2023), la presencia de *F. uhdei* con un alto valor de importancia es un aspecto positivo, ya que se trata de una especie nativa de México. El uso de especies nativas es altamente recomendado debido a sus ventajas en términos de adaptación al entorno y mejor desempeño en crecimiento.

Por otro lado, se observó que el pirul fue la especie de mayor promedio de área foliar y el fresno la de menor valor en el presente estudio. Estas diferencias pueden estar asociadas con las características morfológicas foliares propias de cada especie. El pirul posee hojas compuestas con 20 a 40 foliolos que miden entre 2 y 5 cm de largo (Martínez-Millán y Cevallos-Ferriz, 2005), mientras en el fresno tiene hojas compuestas de 5 a 9 foliolos con una longitud de 15 a 30 cm (Pasiecznik, 2022). Esto puede indicar que a pesar de lo pequeño de sus hojas el pirul tiene mayor unidad de área foliar que las hojas de fresno, ya que estas últimas son más amplias y largas.

El desarrollo foliar de un árbol varía según su grado de adaptación al entorno, reflejando ajustes en su estructura morfológica. Según señala Ramírez-Albores y Badano (2013), el pirul se establece naturalmente en climas secos y semiáridos y ha sido catalogada en México como una especie oportunista, capaz de colonizar rápidamente áreas alteradas por actividades humanas. Asimismo, Pires *et al.*, (2015) observaron que las hojas de esta especie presentan características escleromórficas en las posiciones superiores de la copa, lo que les confiere una notable adaptación a entornos con alta radiación solar y escasa disponibilidad de agua. Además, documentaron que el pirul tolera ciertas concentraciones de contaminantes, lo que se refleja en la formación de hojas más gruesas y resistentes (Pereira *et al.*, 2016).

En relación con los resultados del laurel de la India, aunque su área foliar es menor en comparación con el pirul, supera la del fresno, por lo que esta especie puede resultar de gran utilidad por su capacidad de sombreado. Un estudio en Guangzhou reveló que el laurel de la India alcanzó hasta un 91.9% de densidad del dosel y por lo tanto mayor proporción de humedad y capacidad de refrescar el ambiente en relación con otras especies arbóreas de la ciudad (Feng *et al.*, 2023). Los resultados sobre el área foliar son especialmente relevantes en el contexto urbano, ya que permiten inferir las ventajas ambientales del arbolado urbano. Según Livesley *et al.*, (2016), los beneficios ambientales están estrechamente vinculados a la superficie foliar, la cual depende directamente del tamaño y del crecimiento vegetativo. Así mismo, todo el conjunto de hojas que comprende una copa tiene la capacidad de mitigar las altas temperaturas del aire hasta en un 60% de varias especies de árboles (Morakinyo *et al.*, 2018). Incluso el fresno, cuyo valor de área foliar fue menor, es una especie con propiedades ambientales importantes al mostrar un potencial transpirativo y ecofisiológico eficiente como árbol urbano (Ballinas y Barradas, 2016; Barradas *et al.*, 2016).

En cuanto al secuestro bruto de carbono, el fresno resultó con el valor promedio más alto entre las especies estudiadas y de menor valor en pirul. En fresno (*Fraxinus uhdei*) las amplias reservas de carbohidratos le permiten recuperarse de múltiples eventos de defoliación, por lo que el secuestro de carbono resulta favorable y más estable, incluso en condiciones ambientales no ideales (Gleason y Ares, 2004). Además, al ser semicaducifolia la especie de fresno puede presentar renuevos y brotes foliares que incrementen la absorción del bióxido de carbono atmosférico.

Los árboles en entornos urbanos contribuyen a la disminución del bióxido de carbono en la atmósfera para mitigar el cambio climático a nivel local. La eficacia de este proceso varía según la especie arbórea (Ajayi, 2021; Du *et al.*, 2024), incluso en un estudio señalan el alto potencial de las especies nativas para el secuestro de carbono (Vasagadekar *et al.*, 2023). Además, para maximizar el secuestro de carbono, es necesaria una gestión estratégica y la expansión de la infraestructura verde en las zonas urbanas (Kim *et al.*, 2024; Rasoolzadeh *et al.*, 2024).
El arbolado urbano en las calles desempeña un papel crucial en el secuestro de carbono, contribuyendo a la reducción de las emisiones de CO_2 en las ciudades. Sin embargo, este beneficio puede verse limitado por factores antropogénicos. Según (Guo *et al.*, 2024), la poda inapropiada y la falta de un mantenimiento adecuado de los árboles en las vialidades pueden reducir su eficacia en la captura de carbono. Además, al tratarse de árboles ubicados en calles, las dimensiones diamétricas y de altura tienden a modificarse, lo que repercute de manera directa en su capacidad para capturar carbono (Osseni *et al.*, 2022). Según Drolen *et al.* (2023), los árboles en calle con alta capacidad de crecimiento, mayor follaje y baja mortalidad son más eficientes en secuestrar carbono. Estos pueden lograr su máximo potencial a una densidad baja, lo que optimiza la gestión del arbolado urbano al requerir menos árboles para obtener un mayor beneficio en captura de carbono.

Análisis Escalado Multidimensional No Métrico

Los resultados obtenidos a partir del análisis NMDS indican que no se encontró una variación significativa en la morfometría del arbolado urbano en función del ancho del camellón. Esto se refleja en el amplio sobrelapamiento de los puntos que representan a las tres especies de árboles analizadas en el espacio definido por los ejes NMDS1 y NMDS2. Los resultados indican que la mayoría de los ejemplares se agrupan cerca del centro de la gráfica, lo que sugiere que sus características morfométricas no están fuertemente influenciadas por el ancho del camellón. Sin embargo, el desplazamiento del fresno hacia la parte superior izquierda sugiere un posible efecto del ancho de camellón sobre su morfometría, lo que podría estar relacionado con restricciones en el espacio disponible para su desarrollo. En contraste, los ejemplares de pirul presentan un ligero desplazamiento hacia valores negativos en el eje NMDS2, lo que puede decir que el ancho del camellón tiene una menor influencia en su morfometría, posiblemente debido a su mayor adaptación a condiciones limitantes del espacio.
Los resultados del análisis NMDS pueden mostrar diferencias debido a las diversas variaciones en el entorno urbano. Además, las condiciones ambientales y la configuración del espacio urbano podrían estar influyendo de manera distinta en el crecimiento y morfología de las especies. En el presente estudio las respuestas por variable morfométrica señalaron diferencias entre las especies, sin embargo, en el análisis NMDS la combinación de las dimensiones a partir de la interacción entre variables no mostró diferencias entre las tres especies. Esto no necesariamente es contradictorio, más bien indica que tanto la respuesta morfométrica como el efecto de camellón no resultaron de estadísticamente favorables para el NMDS. Según Alberti *et al.*, (2020), los paisajes urbanos muestran una heterogeneidad única debido a la combinación de elementos naturales y diseñados. Este mismo autor señala que los árboles urbanos son un claro ejemplo del patrón emergente en la ciudad, que se desarrollan de manera desigual debido a factores naturales y humanos.
Por lo tanto, a partir de la formulación de la pregunta de esta investigación se puede decir que el efecto del ancho de camellón en la morfometría fue diferencial en las tres especies evaluadas. Es decir, el fresno mostró un mayor crecimiento en los camellones amplios en comparación con los estrechos y medianos. En laurel de la India, se observó que las variables morfométricas evaluadas fueron más altas en camellones estrechos. Si bien esto podría sugerir que el desempeño morfológico y de crecimiento del laurel de la India fue favorable en camellón estrecho no necesariamente implica que este sea el espacio más adecuado para este árbol de porte grande. Esto mismo puede aplicar a los resultados del pirul, aunque su morfometría fue indistinta de acuerdo con el ancho de camellón. Así mismo, los beneficios ambientales fueron marcadamente distintos entre las especies, ya que los valores indirectos ubican al fresno como la especie de mayor secuestro bruto de carbono y el pirul con la mayor área foliar sin importar el ancho de

camellón. En cambio, la respuesta ambiental del laurel de la India siempre se mantuvo en valores medios. De esta manera, mientras el fresno puede ser una especie nativa de gran utilidad para el secuestro de carbono, el pirul figura como una especie con amplia adaptación a las condiciones ambientales y la propiedad documentada del laurel de la India por el sombreado de su copa. Finalmente, este conjunto de respuestas puede fundamentar las estrategias, programas y planeación de mantenimiento y plantación de árboles en situación de camellón.

CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio mostraron que la morfometría fue variable en función del ancho de camellón y de la configuración del espacio urbano en calles. A partir de las medidas morfométricas evaluadas en ejemplares adultos con copa completa y aislada, logramos vincular las variaciones observadas con factores físicos urbanos como ancho de camellón, orientación y proporción AE-AC. En términos de mayor desarrollo morfométrico, el pirul mostró mayor adaptabilidad a los distintos anchos de camellón, el fresno fue favorable en camellones amplios y el laurel de la India presentó una respuesta intermedia en camellones estrechos. En cuanto a la alometría, el modelo de regresión lineal indicó una relación positiva entre la altura y el área de proyección de copa en las tres especies (más consistentemente en pirul). Por otro lado, el DAP no se asoció significativamente con las demás variables, sugiriéndose algún tipo de descompensación en el crecimiento en grosor o insuficiencia en la biomasa del tronco. Respecto a los beneficios ambientales, el fresno tuvo mayor potencial de secuestro de carbono y el pirul presentó mayor área foliar, lo que resalta la importancia de que estos hallazgos pueden ser relevantes al seleccionar especies adecuadas según las características urbanas para maximizar los beneficios ambientales.

De acuerdo con las pruebas estadísticas que se analizaron en las diferentes respuestas del presente estudio se puede decir que puede ser más clara la respuesta encontrada con tamaños de muestra más grandes, además de continuar estudiando el efecto de los factores espaciales en la morfometría de estas especies. Estos resultados también pueden evidenciar las limitaciones del entorno urbano en la morfometría de árboles de porte grande, pero quizá las dimensiones de los camellones estudiados pueden ser más favorables para arbolado de porte mediano a pequeño. De acuerdo con la incógnita formulada para esta investigación se puede decir que la variación morfométrica varió en cuanto al ancho de camellón, aunque la réplica de estos estudios en más sistemas urbanos puede servir para validar dichos resultados.

Si bien el presente estudio muestra resultados del arbolado en camellones de una ciudad semiárida de México cabe señalar la importancia de ampliar este tipo de trabajos en sistemas urbanos de otros climas y latitudes. Además de que este tipo de resultados puede contribuir con las tomas de decisión en la planeación urbana el conocimiento de la variación morfométrica del arbolado en calles puede mostrar ciertos indicadores sobre el espacio óptimo para las especies y sus posibles beneficios ambientales.

AGRADECIMIENTOS

A CONACHYT por el apoyo brindado a través de la beca 826697 de posgrado, la cual fue esencial para la realización de esta investigación.

LITERATURA CITADA

Agriculture Fisheries and Conservation Department. (2006). *Nature Conservation Practice Note*.

Ahmadi Venhari, A., Tenpierik, M., & Taleghani, M. (2019). The role of sky view factor and urban street greenery in human thermal comfort and heat stress in a desert climate. *Journal of Arid Environments*, *166*, 68–76. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.04.009

Ajayi, E. (2021). *Assessment of Carbon Sequestration Potential of some Selected Urban Tree Species*. https://doi.org/10.1101/2021.08.19.457022

Alberti, M., Palkovacs, E. P., Roches, S. Des, De Meester, L., Brans, K. I., Govaert, L., Grimm, N. B., Harris, N. C., Hendry, A. P., Schell, C. J., Szulkin, M., Munshi-South, J., Urban, M. C., & Verrelli, B. C. (2020). The Complexity of Urban Eco-evolutionary Dynamics. En *BioScience* (Vol. 70, Número 9, pp. 772–793). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/biosci/biaa079

Amer, A., Franceschi, E., Hjazin, A., Shoqeir, J. H., Moser-Reischl, A., Rahman, M. A., Tadros, M., Pauleit, S., Pretzsch, H., & Rötzer, T. (2023). Structure and Ecosystem Services of Three Common Urban Tree Species in an Arid Climate City. *Forests*, *14*(4). https://doi.org/10.3390/f14040671

Ayuntamiento de San Luis Potosí, S. L. P. (2002). *Reglamento de parques y jardines públicos del municipio libre de San Luis Potosí, S.L.P.*

Ballinas, M., & Barradas, V. L. (2016). Transpiration and stomatal conductance as potential mechanisms to mitigate the heat load in Mexico City. *Urban Forestry and Urban Greening*, *20*, 152–159. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.08.004

Barradas, V. L., Ruiz-Cordova, J. P., & Esperón-Rodríguez, M. (2016). Microclimatology and ecophysiology of the urban vegetation of a city with tropical climate modified by altitude in Mexico. *Botanical Sciences*, *94*(4), 775–786. https://doi.org/10.17129/botsci.627

Benavides-Meza, H. M., & Young-Fernández Grandizo, D. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera Bosques*, *18*(2), 51–71. https://doi.org/10.21829/myb.2012.182352

Bourbia, F., & Boucheriba, F. (2010). Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). *Renewable Energy*, *35*(2), 343–347. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.017

Cedano Billini, S. C. (2013). *Análisis de la radiación en calles de latitud 20°N* [Máster Arquitectura, Energía y Medio Ambiente]. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona.

Chatziathanasiou, S., Kitikidou, K., & Milios, E. (2023). Allometries of Acer negundo for a better space management in two cities of northeastern Greece. *Folia Oecologica*, *50*(1), 89–96. https://doi.org/10.2478/foecol-2023-0008

Chatziathanasiou, S., Kitikidou, K., & Milios, E. (2024). Crown Width–Tree Height Models for Magnolia grandiflora, Prunus cerasifera, and Acer negundo Growing in Cities in Northeastern Greece. *Land*, *13*(10). https://doi.org/10.3390/land13101579

Chatzidimitriou, A., & Axarli, K. (2017). Street Canyon Geometry Effects on Microclimate and Comfort; A Case Study in Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*, *38*, 643–650. https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.144

City of Melbourne. (2010). *Landscape treatment policy for nature strips and medians in streets, avenues and boulevards*.

City of Shenandoh. (2006). *Urban forest technical manual*.

Correa, R. N. (2018). Análisis de metodologías para la localización de microcentrales hidroeléctricas utilizando SIG. Caso aplicativo: tres cuencas del valle de Aburran, Medellín. *Revista Científica en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad (CAS)*, *4*(1), 1–31.

Cox, S. (2011). *Urban trees: A practical management guide.* The Crowood Press.

Czaja, M., Kołton, A., & Muras, P. (2020). The complex issue of urban trees-stress factor accumulation and ecological service possibilities. En *Forests* (Vol. 11, Número 9). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/F11090932

Dahlhausen, J., Biber, P., Rötzer, T., Uhl, E., & Pretzsch, H. (2016). Tree species and their space requirements in six urban environments worldwide. *Forests*, *7*(6). https://doi.org/10.3390/f7060111

Díaz-Porras, D. F., Gaston, K. J., & Evans, K. L. (2014). 110 Years of change in urban tree stocks and associated carbon storage. *Ecology and Evolution*, *4*(8), 1413–1422. https://doi.org/10.1002/ece3.1017

DOT (2015). Planted Raised Median Design Guidelines. Vision zero great streets. NYC Street Design Manual.

Drolen, J., Brandt, L., Wei, Y., & Dybzinski, R. (2023). Modeling Management-Relevant Urban Forest Stand Characteristics to Optimize Carbon Storage and Sequestration. *Forests*, *14*(11). https://doi.org/10.3390/f14112207

Du, H., Bao, Z., & Zhou, F. (2024). Carbon Sequestration of Common Garden Tree Species under the Carbon Neutrality Target in East China. *Forests*, *15*(10). https://doi.org/10.3390/f15101692

Eisenman, T. S., Coleman, A. F., & LaBombard, G. (2021). Street Trees for Bicyclists, Pedestrians, and Vehicle Drivers: A Systematic Multimodal Review. En *Urban Science* (Vol. 5, Número 3). MDPI. https://doi.org/10.3390/urbansci5030056

Fang, K., Wang, X., Zhang, W., Zhang, Z., Xie, Y., Chen, L., Zhu, G., & Furuya, N. (2021). Characteristics of space network system formed by the constituent elements in urban streets: Tianzifang in Shanghai as a case study. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *20*(6), 627–639. https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1803078

Fatimah, H., Farooq, S., Anwar, T., Qureshi, H., Hashmi, F., Ahmad, T., Ullah, N., Munazir, M., Naseem, M. T., & Soufan, W. (2024). Assessment of growth, biomass, and carbon sequestration potential of urban tree species in greenbelts. *BMC Plant Biology*, *24*(1). https://doi.org/10.1186/s12870-024-05935-3

Feng, X., Wen, H., He, M., & Xiao, Y. (2023). Microclimate effects and influential mechanisms of four urban tree species underneath the canopy in hot and humid areas. *Frontiers in Environmental Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1108002

Findley, D. J. (2016). Part 4 - Highway Geometric Design. En D. J. Findley, B. J. Schroeder, C. M. Cunningham, & T. H. Brown (Eds.), *Highway Engineering: Planning, Design, and Operations* (pp. 167–253). Butterworth-Heineman. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801248-2.00004-6

Fitzpatrick, K., Wooldridge, M. D., & Blaschke, J. D. (2004). *Urban intersection design guidece*.

Forestry Suppliers, Inc. (2007). *Forestry Suppliers Tangent Height Gauge*. https://www.forestry-suppliers.com/p/36953/12751/forestry-suppliers-tangent-height-gauge

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana.*

Gleason, S. M., & Ares, A. (2004). Photosynthesis, carbohydrate storage and survival of a native and an introduced tree species in relation to light and defoliaton. *Tree Physiology*, *24*, 1087–1097.

Guo, C., Hu, Y., Qin, J., Wu, D., Xu, L., & Wang, H. (2024). Comparison of Crown Volume Increment in Street Trees among Six Cities in Western Countries and China. *Horticulturae*, *10*(3). https://doi.org/10.3390/horticulturae10030300

Guzzetti, F., Anyabolu, K. L. N., D'Ambrosio, L., & Marchetti, G. (2019). Built environment: Modelling the urban space. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *42*(2/W11), 595–600. https://doi.org/10.5194/isprs-Archives-XLII-2-W11-595-2019

Heisler, G. (1986). Energy Savings with Trees. *Arboriculture & Urban Forestry*, *12*(5), 113–125. https://doi.org/10.48044/jauf.1986.026

Hernández López, P. I., & Montalvo Vargas, R. (2020). Suelo intraurbano vacante para vivienda en la ciudad de Tlaxcala, México. Una aproximación espacial. *Región y sociedad*, *32*, e1279. https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1279

Hernández-López, P., Martínez-Trinidad, T., de la Rosa, P. H., Mohedano-Caballero, L., & de Guillén, M. J. G. (2023). Ecological characterization of trees at Molino de Flores Netzahualcóyotl National Park. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *29*(3), 93–108. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.01.002

Hintural, W. P., Jeon, H. J., Kim, S. Y., Go, S., & Park, B. B. (2024). Quantifying Regulating Ecosystem Services of Urban Trees: A Case Study of a Green Space at Chungnam National University Using i-Tree Eco. *Forests*, *15*(8). https://doi.org/10.3390/f15081446

Hui, L. C., Jim, C. Y., & Zhang, H. (2020). Allometry of urban trees in subtropical Hong Kong and effects of habitat types. *Landscape Ecology*, *35*(5), 1143–1160. https://doi.org/10.1007/s10980-020-01006-8

IMPLAN de Hermosillo. (2017). *Manual de lineamientos de Diseño de Infraestructura Verde para Municipios Mexicanos*.

IMPLAN SLP. (2021). Distritos del PDCUCP-SLP. Mapa 61. En *Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de San Luis Potosí, SLP*.

INEGI. (2013). *Diccionario de datos topográficos escala 1: 50 000 versión 2*.

INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017*. www.inegi.org.mx

INEGI. (2020a). *Inventario Nacional de Viviendas*. archivo SHP.

INEGI. (2020b). *Marco Geoestadístico del Censo de Población y Vivienda*. archivo SHP.

Jin, S., Zhang, E., Guo, H., Hu, C., Zhang, Y., & Yan, D. (2023). Comprehensive evaluation of carbon sequestration potential of landscape tree species and its influencing factors analysis: implications for urban green space management. *Carbon Balance and Management*, *18*(1). https://doi.org/10.1186/s13021-023-00238-w

Kim, J., Kang, Y., Kim, D., Son, S., & Kim, E. J. (2024). Carbon Storage and Sequestration Analysis by Urban Park Grid Using i-Tree Eco and Drone-Based Modeling. *Forests*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/f15040683

Kjelgren, R. K., & Clark, J. R. (1992). Photosynthesis and leaf morphology of Liquidambar styraciflua L. under variable urban radiant-energy conditions. *Int J Biometeorol*, *36*, 165–171.

Langenheim, N., White, M., Tapper, N., Livesley, S. J., & Ramirez-Lovering, D. (2020). Right tree, right place, right time: A visual-functional design approach to select and place trees for optimal shade benefit to commuting pedestrians. *Sustainable Cities and Society*, *52*. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101816

Li, H., Zhao, Y., Wang, C., Ürge-Vorsatz, D., Carmeliet, J., & Bardhan, R. (2024). Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree trait. *Communications Earth and Environment*, *5*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-024-01908-4

Liang, D., & Huang, G. (2023). Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. En *Land* (Vol. 12, Número 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/land12091699

Lin, W., Guo, W., Huang, S., Wei, J., Wei, Y., Zhou, J., & Lai, C. (2024a). Effects of growth space limitation on allometry of Ficus spp. In urban habitats. *Journal of Cleaner Production*, *471*, 143413. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143413

Lin, W., Guo, W., Huang, S., Wei, J., Wei, Y., Zhou, J., & Lai, C. (2024b). Effects of growth space limitation on allometry of Ficus spp. In urban habitats. *Journal of Cleaner Production*, *471*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143413

Livesley, S. J., McPherson, E. G., & Calfapietra, C. (2016). The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution Cycles at the Tree, Street, and City Scale. *Journal of Environmental Quality*, *45*(1), 119–124. https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0567

Mansour, A. I., & Aljamil, H. A. (2022). Investigating the Effect of Traffic Flow on Pollution, Noise for Urban Road Network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *961*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/961/1/012067

Martínez-Millán, M., & Cevallos-Ferriz, S. R. S. (2005). Arquitectura foliar de Anacardiaceae. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *76*(2). https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2005.002.308

Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., & Bournet, P. E. (2021). Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Climate*, *37*. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844

McPherson, E. G., van Doorn, N. S., & Peper, P. J. (2016). Urban tree database and allometric equations. En *Forest Service Research Data Archive*. Forest Service Research Data Archive. https://doi.org/10.2737/RDS-2016-0005

McPherson, G., & Simpson, J. R. (1995). Shade trees as a demand-side resource. *Home Energy*, *12*(3).

Morakinyo, T. E., Lau, K. K. L., Ren, C., & Ng, E. (2018). Performance of Hong Kong's common trees species for outdoor temperature regulation, thermal comfort and energy saving. *Building and Environment*, *137*, 157–170. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.012

Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. (2015). A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. En *Landscape and Urban Planning* (Vol. 134, pp. 157–166). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.013

Muscas, D., Orlandi, F., Petrucci, R., Proietti, C., Ruga, L., & Fornaciari, M. (2024). Effects of urban tree pruning on ecosystem services performance. *Trees, Forests and People*, *15*. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100503

National Academies of Sciences, E. and M. (2023). *Long-Term Vegetation Management Strategies for Roadsides and Roadside Appurtenances*. The National Academies Press. https://doi.org/https://doi.org/10.17226/26876.

National Association of City Transportation Officials. (2012). *Urban street design guide*.

Noyola-Medrano, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L. F., López-Loera, H., & Carbajal, N. (2009). Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *26*(2), 395–410.

ODOT (1996, febrero). Medians (Discussion Paper No. 4). Transportation Research Institute. Oregon State University.

Oke, T. R. (1988). Street Design and Urban Canopy Layer Climate. En *Energy and Buildings* (Vol. 11).

Osseni, A. A., Gbesso, G. H. F., & Assongba, Y. F. (2022). Phytodiversity, structure and carbon sequestered by avenue trees in the Municipality of Sèmè-Podji, Southern Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *16*(6), 2857–2868. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v16i6.30

Pasiecznik, N. (2022). Fraxinus uhdei (tropical ash). *CABI Compendium*. https://doi.org/10.1079/cabicompendium.24559

Paz-Kagan, T., Zaady, E., Shachak, M., & Karnieli, A. (2016). Transformation of shrublands to forests: The role of woody species as ecosystem engineers and landscape modulators. *Forest Ecology and Management*, *361*, 257–268. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.11.021

Peper, P. J., Mcpherson, E. G., & Mori, S. M. (2001). predictive equations for dimensions and leaf area of coastal Southern California street trees. En *Journal of Arboriculture* (Vol. 27, Número 4).

Pereira, M. P., Rodrigues, L. C. de A., Corrêa, F. F., de Castro, E. M., Ribeiro, V. E., & Pereira, F. J. (2016). Cadmium tolerance in Schinus molle trees is modulated by enhanced leaf anatomy and photosynthesis. *Trees - Structure and Function*, *30*(3), 807–814. https://doi.org/10.1007/s00468-015-1322-0

Pires, M. F., Pereira, M. P., de Castro, E. M., Barbosa, S., & Pereira, F. J. (2015). Micromorfometria foliar de *Schinus molle* L. (Anarcadiaceae) em diferentes alturas na copa. *Cerne*, *21*(1), 17–25. https://doi.org/10.1590/01047760201521011530

Pokorny, J., O'Brien, J., Hauer, R., Johnson, G., Albers, J., Bedker, P., & Mielke, M. (2003). *Urban Tree Risk Management:A Community Guide to Program Design and Implementation.* USDA Forest Service Northeastern Area State and Private Forestry. 1992 Folwell Ave. St. Paul, MN 55108.

Pretzsch, H., Biber, P., Uhl, E., Dahlhausen, J., Rötzer, T., Caldentey, J., Koike, T., van Con, T., Chavanne, A., Seifert, T., Toit, B. du, Farnden, C., & Pauleit, S. (2015). Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban Forestry and Urban Greening*, *14*(3), 466–479. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.04.006

Rakowska, A., Wong, K. C., Townsend, T., Chan, K. L., Westerdahl, D., Ng, S., Močnik, G., Drinovec, L., & Ning, Z. (2014). Impact of traffic volume and composition on the air quality and pedestrian exposure in urban street canyon. *Atmospheric Environment*, *98*, 260–270. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.073

Ramírez-Albores, J., & Badano, E. (2013). *Perspectiva histórica, sociocultural y ecológica de una invasión biológica: el caso del Pirúl (Schinus molle L., Anacardiaceae) en México (Boletín de la RLEEI - Actualmente Revista Bioinvasiones)*. *4*, 4–15.

Ramírez-Albores, J. E., Avendaño-Gonzáles, M., & Badano, E. I. (2015, febrero). El Pirul, el árbol que vino del sur. *CONABIO. Biodiversitas*, *117*, 6–11.

Ramos-Palacios C.R. 2019. Guía del arbolado y otras formas vegetales en situación de banqueta Ciudad de San Luis Potosí. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. UASLP-SEGAM. San Luis Potosí, S.LP. 347 p. ISBN 978-607-535-120-9

Rantzoudi, E. C., & Georgi, J. N. (2017). Correlation between the geometrical characteristics of streets and morphological features of trees for the formation of tree lines in the urban design of the city of Orestiada, Greece. *Urban Ecosystems*, *20*(5), 1081–1093. https://doi.org/10.1007/s11252-017-0655-4

Rasoolzadeh, R., Mobarghaee Dinan, N., Esmaeilzadeh, H., Rashidi, Y., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Carbon Sequestration and Storage of Urban Trees in a Polluted Semiarid City. *Forests*, *15*(9), 1488. https://doi.org/10.3390/f15091488

Ren, X., Zhang, G., Chen, Z., & Zhu, J. (2023). The Influence of Wind-Induced Response in Urban Trees on the Surrounding Flow Field. *Atmosphere*, *14*(6). https://doi.org/10.3390/atmos14061010

Roberts, J., Jackson, N. A., & Smith, D. M. (2006). *Tree Roots in the Built Environment*. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:128659297

Rodriguez-Valencia, A., & Ortiz-Ramirez, H. A. (2021). Understanding green street design: Evidence from three cases in the U.S. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(4), 1–19. https://doi.org/10.3390/su13041916

Sanders, J. R., & Grabosky, J. C. (2014). 20 years later: Does reduced soil area change overall tree growth? *Urban Forestry and Urban Greening*, *13*(2), 295–303. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.12.006

Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J. (2017). Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, *157*, 502–511. https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010

SEDATU. (2019). *Manual de calles: diseño vial para ciudades mexicanas*.

SEDATU. (2023). *NOM-004-SEDATU-2023, Estructura y diseño para vías urbanas. Especificaciones y aplicación.* https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.

Sharma, G., Morgenroth, J., Richards, D. R., & Ye, N. (2025). Advancing urban forest and ecosystem service assessment through the integration of remote sensing and i-Tree Eco: A systematic review. En *Urban Forestry and Urban Greening* (Vol. 104). Elsevier GmbH. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128659

Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2003). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. *Energy and Buildings*, *35*, 61–68.

Singh, A. K., Singh, J. S., Singh, H., & Mishra, R. K. (2023). Quantifying carbon Stock and tree species diversity of green infrastructure of Varanasi, India. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PLANT AND ENVIRONMENT*, *9*(01), 15–23. https://doi.org/10.18811/ijpen.v9i01.03

Singh, H., Yadav, M., Kumar, N., Kumar, A., & Kumar, M. (2020). Assessing adaptation and mitigation potential of roadside trees under the influence of vehicular emissions: A case study of *Grevillea robusta* and *Mangifera indica* planted in an urban city of India. *PLoS ONE*, *15*(1). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227380

Speak, A. F., & Salbitano, F. (2023). The impact of pruning and mortality on urban tree canopy volume. *Urban Forestry & Urban Greening*, *79*, 127810. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127810

Srivanit, M., & Jareemit, D. (2020). Modeling the influences of layouts of residential townhouses and tree-planting patterns on outdoor thermal comfort in Bangkok suburb. *Journal of Building Engineering*, *30*. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101262

Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(12), 1879–1900. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1

Stoffberg, G. H., van Rooyen, M. W., van der Linde, M. J., & Groeneveld, H. T. (2008). Predicting the growth in tree height and crown size of three street tree species in the City of Tshwane, South Africa. *Urban Forestry and Urban Greening*, *7*(4), 259–264. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2008.05.002

Suchocka, M., Swoczyna, T., Kosno-Jonczy, J., & Kalaji, H. M. (2021). Impact of heavy pruning on development and photosynthesis of Tilia cordata Mill. trees. *PLoS ONE*, *16*(8 August). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256465

Swiecki, T. J., & Bernhardt, E. A. (2001). *Guidelines for Developing and Evaluating Tree Ordinances Site Map*. http://www.isa-arbor.com/tree-ord/

Takagi, M., & Gyokusen, K. (2004). Light and atmospheric pollution affect photosynthesis of street trees in urban environments. *Urban Forestry & Urban Greening*, *2*(3), 167–171. http://www.elsevier-deutschland.de/ufug

Tan, X., Hirabayashi, S., & Shibata, S. (2021). Estimation of ecosystem services provided by street trees in Kyoto, Japan. *Forests*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/f12030311

Tejeda-Martínez, A., & Gómez-Azpeitia, G. (2015). *Prontuario solar de México.*

Thomas, O., Stephen, O. E., Aondofa, A. B., & Felicia, I. E. (2022). Carbon credit assessment and importance value indices of trees in urban parks: a case study of Benue State Secretariat, Makurdi. En *FUW Trends in Science & Technology Journal, www.ftstjournal.com e-ISSN* (Vol. 6, Número 3). https://www.researchgate.net/publication/362580434

Tochaiwat, K., Phichetkunbodee, N., Suppakittpaisarn, P., Rinchumphu, D., Tepweerakun, S., Kridakorn Na Ayutthaya, T., & Sittisom, P. (2023). Eco-Efficiency of Green Infrastructure on Thermal Comfort of Outdoor Space Design. *Sustainability (Switzerland)*, *15*(3). https://doi.org/10.3390/su15032566

USDA Forest Service. (2017). *i-Tree ECO Manual de toma de datos*. www.itreetools.org

USDA Forest Service. (2021). *i-Tree Eco field guide (v6)*.

Vasagadekar, P. R., Gargate, A. V., Patil, Y. Y., & Raut, P. D. (2023). Carbon sequestration potential of trees from urban green spaces of Kolhapur city, Maharashtra, India. *Environmental and Socio-Economic Studies*, *11*(3), 22–32. https://doi.org/10.2478/environ-2023-0014

Vaz Monteiro, M., Doick, K. J., & Handley, P. (2016). Allometric relationships for urban trees in Great Britain. *Urban Forestry and Urban Greening*, *19*, 223–236. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.07.009

Recibido:
18/febrero/2025

Aceptado:
8/junio/2025

Wan Ismail, W. N., Ja'afar, N. H., & Harun, N. Z. (2020). Physical qualities and elements of streets in the context of royal town in Malaysia. *Rupkatha Journal on Interdisciplinary Studies in Humanities*, *12*(1), 1–13. https://doi.org/10.21659/rupkatha.v12n1.21

Yang, J., Zhang, M., Zhang, J., Lu, H., & Hauer, R. J. (2023). Allometric Growth of Common Urban Tree Species in Qingdao City of Eastern China. *Forests*, *14*(3). https://doi.org/10.3390/f14030472

Zhang, X., Huang, H., Tu, K., Li, R., Zhang, X., Wang, P., Li, Y., Yang, Q., Acerman, A. C., Guo, N., & Liu, Y. (2024). Effects of plant community structural characteristics on carbon sequestration in urban green spaces. *Scientific Reports*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-57789-2

Zielonko-Jung, K., & Janiak, J. (2022). Trees as a solar control measure for southern-oriented street frontages. Analysis of a selected street model for a humid continental climate. *Urban Ecosystems*, *25*, 111–119. https://doi.org/10.1007/s11252-021-01128-0/Published

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

DESCRIPCIÓN INICIAL DE LA FENOLOGÍA DE *Quercus durifolia* Seemen, ÁRBOL ENDÉMICO DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

INITIAL DESCRIPTION OF THE PHENOLOGY OF *Quercus durifolia* Seemen, ENDEMIC TREE OF THE SIERRA MADRE OCCIDENTAL

Madrid Aispuro, R.E., J.A. Prieto Ruíz, A. Aldrete, S. Salcido Ruiz, E.D. Vivar Vivar, L.E. Martínez Nevárez

DESCRIPCIÓN INICIAL DE LA FENOLOGÍA DE *Quercus durifolia* Seemen, ÁRBOL ENDÉMICO DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL
INITIAL DESCRIPTION OF THE PHENOLOGY OF *Quercus durifolia* Seemen, ENDEMIC TREE OF THE SIERRA MADRE OCCIDENTAL

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 229-244 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.13

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 229-244 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Descripción inicial de la Fenología de *Quercus durifolia* Seemen, árbol endémico de la Sierra Madre Occidental

Initial description of the Phenology of *Quercus durifolia* Seemen, endemic tree of the Sierra Madre Occidental

Rosa Elvira Madrid-Aispuro https://orcid.org/0000-0001-8080-0689
José Ángel Prieto-Ruíz / jprieto@ujed.mx
https://orcid.org/0000-0002-2954-535X
Arnulfo Aldrete https://orcid.org/0000-0002-6995-8490
Posgrado en Ciencias Forestales, Colegio de postgraduados.
Campus Montecillo Carretera Federal México-Texcoco
Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México

Silvia Salcido-Ruiz https://orcid.org/0000-0001-9945-9732
Eduardo Daniel Vivar-Vivar https://orcid.org/0000-0002-2052-0404
Laura Elena Martínez-Nevárez http://orcid.org/0000-0001-6443-3305
Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,
Universidad Juárez del estado de Durango. Río Papaloapan y Blvd. Durango S/N.
Col. Valle del Sur, C.P. 34120, Durango, Dgo., México

Madrid Aispuro, R.E., J.A. Prieto Ruíz, A. Aldrete, S. Salcido Ruiz, E.D. Vivar Vivar, L.E. Martínez Nevárez

DESCRIPCIÓN INICIAL DE LA FENOLOGÍA DE *Quercus durifolia* Seemen, ÁRBOL ENDÉMICO DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

INITIAL DESCRIPTION OF THE PHENOLOGY OF *Quercus durifolia* Seemen, ENDEMIC TREE OF THE SIERRA MADRE OCCIDENTAL

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 229-244. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.13

RESUMEN: Los estudios fenológicos han demostrado ser valiosos para comprender la dinámica de los ecosistemas y pueden desempeñar un papel crucial en la conservación de especies vegetales. En el caso de los encinos, son escasas las investigaciones que evalúan la fenología reproductiva y vegetativa, en particular sobre *Quercus durifolia* Seemen ex Loes., especie endémica que se distribuye principalmente en zonas de transición de la Sierra Madre Occidental. El objetivo fue describir los cambios biológicos que muestra esta especie, ante la variación estacional y climática en un periodo de nueve meses. Se seleccionaron al azar seis árboles adultos, en cada uno se marcaron seis ramas y se observó el avance fenológico cada 15 días. Lo anterior, se realizó con la toma de imágenes fotográficas, el registro y caracterización de cada cambio biológico; además, se monitoreó la temperatura y precipitación. Los resultados mostraron que *Quercus durifolia* tuvo seis fases fenológicas definidas durante el periodo de evaluación: defoliación, brotación, floración, fructificación, desarrollo de hojas y ramas, y dispersión de bellotas; dichas fases no se presentaron de manera homogénea en los árboles evaluados, donde solo 50 % produjeron bellotas. Este estudio resalta la complejidad y diversidad de los ciclos de vida de los encinos, incluso entre individuos de la misma especie y ubicación geográfica.
Palabras clave: crecimiento de bellotas, crecimiento vegetativo, cronobiología vegetal, encino, floración.

ABSTRACT: Phenological studies have proven to be valuable for understanding ecosystem dynamics and can play a crucial role in the conservation of plant species. In the case of oaks, there are few studies that evaluate reproductive and vegetative phenology, particularly on *Quercus durifolia* Seemen ex Loes., an endemic species that is mainly distributed in transition zones of the Sierra Madre Occidental. The objective was to describe the biological changes that this species shows, in response to seasonal and climatic variation over a nine-month period. Six adult trees were randomly selected, six branches were marked on each one and the phenological progress was observed every 15 days. The above was carried out by taking photographs, recording and characterizing each biological change, and monitoring temperature and precipitation. The results showed that *Quercus durifolia* had six defined phenological phases during the evaluation

period: defoliation, sprouting, flowering, fruiting, leaf and branch development, and acorn dispersion. It was also observed that these phases did not occur homogeneously in the evaluated trees, where only 50 % of the total produced acorns. This study highlights the complexity and diversity of the life cycles of oaks, even among individuals of the same species and geographic location.
Key words: acorn growth, vegetative growth, plant chronobiology, oak, flowering.

INTRODUCCIÓN

En México, los bosques de pino-encino tienen alta importancia ecológica para los ecosistemas templados debido a su alta diversidad y amplia distribución de especies (Méndez Osorio *et al.*, 2018). Los encinos son un componente que destacan en los ecosistemas forestales por la gran cantidad de funciones ecosistémicas que desempeñan, como la conservación del suelo y el agua, regulación del clima, provisión de alimento y hábitat a una amplia variedad de fauna silvestre; además, son especies adecuadas para recuperar sitios degradados (Sánchez-González, 2008). También, ocupan el segundo lugar nacional en aprovechamiento forestal, principalmente para la producción de carbón y la construcción de vivienda (Hernández Quiroz & Badano, 2017); sin embargo, se carece de programas integrales para su aprovechamiento.

La Sierra Madre Occidental posee una de las mayores riquezas de diversidad biológica, los bosques de encino cubren casi el 14 % de la superficie, y alberga 54 especies del género *Quercus* (34 % del total nacional) (González-Elizondo *et al.*, 2012). En los últimos 15 años se han realizado diversos estudios sobre la ecología de encinos, enfocados principalmente a investigar su diversidad, estructura, caracterización, distribución y composición florística (Aguilar-Romero *et al.*, 2016; Block & Meave, 2015; Bravo-Bolaños *et al.*, 2020; Encina-Domínguez *et al.*, 2011; Olvera-Vargas & Figueroa-Rangel, 2012; Rosaliano Evaristo *et al.*, 2022; Rubio-Licona *et al.*, 2011; Ruiz-Aquino *et al.*, 2015; Sabás-Rosales *et al.*, 2015), pero existen otros campos del conocimiento pocos explorados, como su fenología.

La fenología de las plantas describe los periodos de aparición y duración de las diferentes etapas en el ciclo de vida, como brotación, floración, fructificación y foliación durante el año (Saveanu & Murray, 2014), procesos relacionados directamente con los factores ambientales, esenciales para entender las interacciones entre las plantas, los animales y el medio ambiente (Maldonado, 2011). La temporalidad y distribución de la floración y fructificación de las plantas son importantes, porque favorecen la biodiversidad, la disponibilidad de alimento para la fauna, la regeneración de la vegetación, la adaptación y la permanencia de las especies (Zárate Cuevas *et al.*, 2022).

Las especies arbóreas han implementado estrategias de adaptación a las variaciones climáticas a través del desarrollo de sus estructuras vegetativas y reproductivas (Zárate Cuevas *et al.*, 2022); por ejemplo, la temperatura, la irradiancia, la precipitación y el fotoperiodo son desencadenantes de la brotación en algunas especies de árboles, las cuales pueden variar dependiendo de las especies, provocando que se adelante o se atrase alguna fenofase (Tang *et al.*, 2016), como sucede en el género *Quercus*, sensible a las señales ambientales en los patrones fenológicos, como la formación de hojas, la floración y el crecimiento vegetativo (Gerst *et al.*, 2017); por ello, son considerados como un grupo altamente susceptible al cambio climático (Hernández Quiroz & Badano, 2017).

En encinos, la formación de frutos está relacionada con aves y mamíferos que se alimentan de ellos a través de las bellotas y las dispersan, por lo que es importante conocer el periodo que comprenden esta fase (Ramírez-Martínez & Mondragón Chaparro, 2020), debido a que la duración de la fructificación varía ampliamente entre especies y entre años (Gallinat *et al.*, 2018), es importante conocer con precisión cuándo existe suficiente disponibilidad de semillas en cantidad y calidad para su recolección, antes de que sean consumidas por la fauna silvestre, ya que aproximadamente el 99 % son depredadas (Díaz-Pontones & Reyes-Jaramillo, 2009). Lo anterior permite planificar de mejor manera su colecta para reproducirlas en vivero con el fin de

cubrir programas de restauración, reforestación y conservación forestal (Rivas Romero *et al.*, 2021).

El objetivo de la presente investigación fue describir la fenología inicial de *Quercus durifolia* Seemen ex Loes., especie que se distribuye principalmente en zonas de transición de la Sierra Madre Occidental. La generación de información en este ámbito contribuirá a la recolección oportuna de semilla, para su posterior propagación en viveros y así obtener plantas de calidad para programas de reforestación y restauración forestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el ejido Otinapa, municipio de Durango, Durango, México, en las coordenadas 24°03'27" N y 105°00'54" O, a una altitud de 2.397 m. La vegetación que predomina está compuesta por especies del género *Pinus* (*P. engelmannii* Carr., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. cooperi* C.E. Blanco y *P. teocote* Schltdl. & Cham.), *Quercus* sp., *Juniperus* sp., así como *Arbutus* sp. (González-Elizondo *et al.*, 2012); el sitio se ubica en medio de un bosque de transición de zonas semiáridas a un bosque de clima templado (Figura 1).

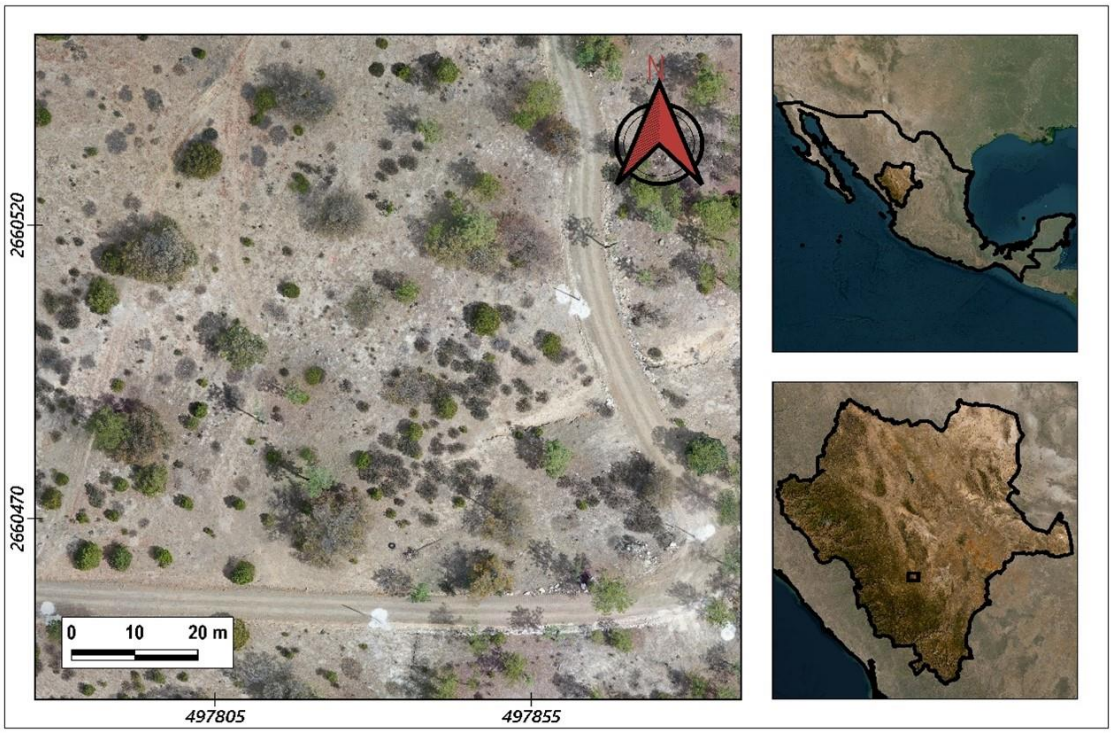


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.
Figure 1. Geographical location of the study area.

El clima es marcadamente estacional, con una estación fría que comprende los meses de octubre a marzo, y una estación calurosa de abril a septiembre, con un período con precipitación baja o escasa de diciembre a junio; la temporada de lluvias ocurre entre julio y septiembre, y en ocasiones se alarga hasta noviembre, con su pico máximo en julio. Para el presente estudio los

Núm. 60: 229-244 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

datos de temperatura y precipitación, correspondiente al período 2010 a 2023, fueron obtenidos de la página web Climate Explorer (https://climexp.knmi.nl/start.cgi) y extraídos a una resolución de 0.5° de la base de datos CRU TS v. 4.04.

Selección de árboles monitoreados

En un rodal natural se seleccionaron al azar seis árboles de *Quercus durifolia*, buscando que existiera una distancia mínima de 50 m entre sí; los mismos se numeraron del uno al seis, a cada uno se les escogieron seis ramas con presencia de yemas, ubicadas entre la parte media y baja de la copa, por la facilidad del seguimiento del proceso fenológico y considerando que los encinos tienen estructuras reproductivas en toda la copa del árbol (Figura 2). En promedio, los árboles tenían una altura de 12.5 m y un diámetro a la altura del pecho de 36.3 cm.

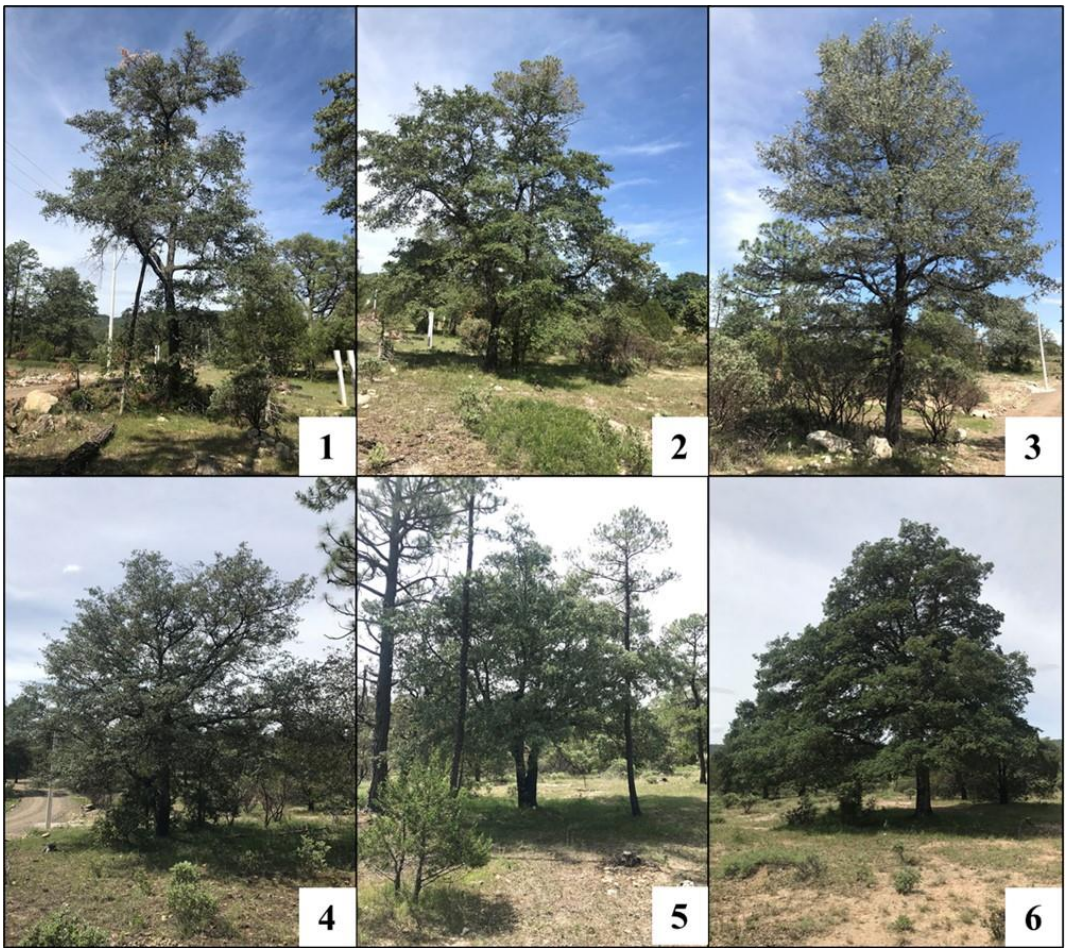


Figura 2. Ejemplares de *Quercus durifolia* donde se hicieron las observaciones fenológicas.
Figure 2. Specimens of *Quercus durifolia* where phenological observations were made.

Las observaciones del estadío fenológico se realizaron cada 15 días, a partir de la visualización de las estructuras reproductivas en las yemas (inicio de la floración), las observaciones se hicieron cada cinco días hasta que las estructuras femeninas dejaron de recibir polen e inició el crecimiento de la bellota; lo anterior, se realizó mediante observaciones directas y toma de imágenes fotográficas; esto permitió que de cada árbol se pudiera determinar: periodo de caída de hojas, de

Núm. 60: 229-244 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

brotación y de floración masculina y femenina, fecha de inicio y desarrollo de bellotas, tiempo durante el cual ocurrió el crecimiento de las hojas y ramas, y período de aparición de nuevas yemas y de dispersión de bellotas.

El trabajo se realizó mediante una descripción de las etapas fenológicas señalando el tiempo de inicio y el final de cada fenofase de los árboles monitoreados; además, se realizó una comparación del desarrollo de las fenofases con relación a los elementos climáticos a través del tiempo (Mejía Gutiérrez, 1990). El periodo de seguimiento se hizo de marzo a noviembre de 2023. Debido a que este trabajo fue descriptivo, solo se registraron observaciones directas en forma periódica, mediante imágenes y registro de los tiempos en que ocurrió cada fenofase; además, se cuidó que el registro de la información fuera representativo de la especie evaluada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calendario fenológico

Durante el periodo 2010 a 2023, el promedio en la precipitación anual fue 616 mm, siendo el año 2011 el de menor precipitación (251 mm) y 2021 el que tuvo la mayor cantidad de lluvia (839 mm); la temperatura promedio máxima fue 32.2 °C y la mínima -6.4 °C (Figura 3a). Durante el periodo de observaciones fenológicas (marzo a noviembre de 2023) el promedio anual de precipitación fue 408 mm, la temperatura media 18.0 °C, la mínima promedio 4.2 °C y la máxima promedio 31.0 °C (Figura 3b).

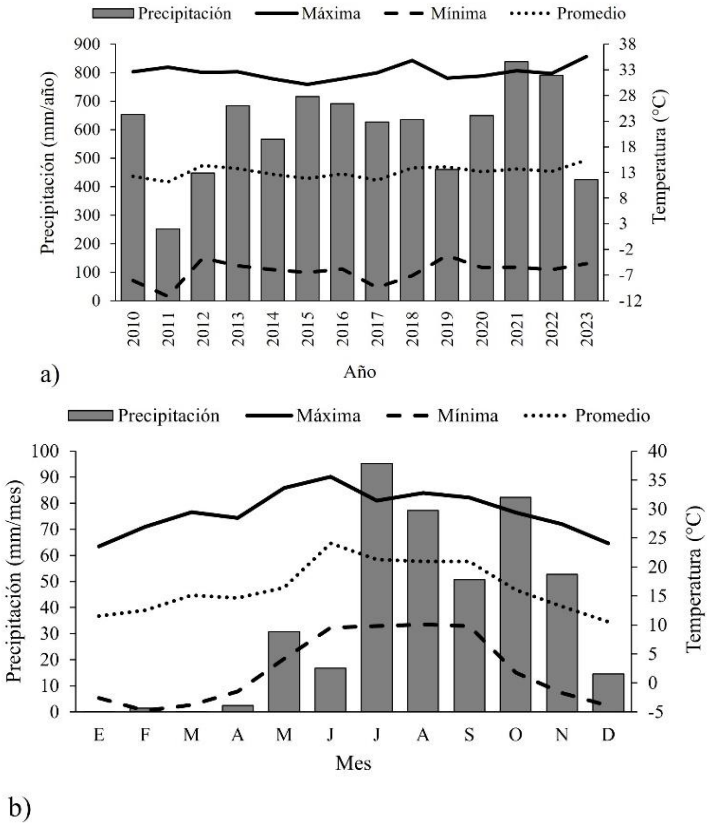


Figura 3. Temperatura y precipitación anual promedio registradas en el área de estudio: a) en un período de más de 10 años; b) durante el período de estudio.

Figure 3. Average annual temperature and precipitation recorded in the study area: a) over a period of more than 10 years; b) during the study period.

La caída de hojas ocurrió en los meses de marzo y abril, quedando los árboles totalmente defoliados, donde las condiciones promedio de temperatura máxima fueron de 28.9 °C, de temperatura media de 14.9 °C y de temperatura mínima de -2.7 °C, con una precipitación de 2.53 mm. El inicio de la brotación ocurrió en los meses de abril y mayo, con temperatura máxima promedio de 30.0 °C, de temperatura mínima de 4.5 °C y precipitación de 33.2 mm. También, en los mismos meses se presentó la fase fenológica de floración masculina, en tanto que la floración femenina solo ocurrió en el mes de mayo. El inicio y desarrollo de las bellotas ocurrió en los meses de junio a septiembre con condiciones promedio de temperatura máxima de 32.3 °C, de temperatura mínima de 10.0 °C y con una precipitación de 322 mm; en este mismo período se presentó la fase fenológica de crecimiento de hojas y ramas. La dispersión de bellotas ocurrió entre finales de septiembre y durante el mes de octubre, cuando las temperaturas empezaron a descender (1.0 °C); con esas mismas condiciones comenzaron a producirse yemas indicando el cese de crecimiento (Figura 4).

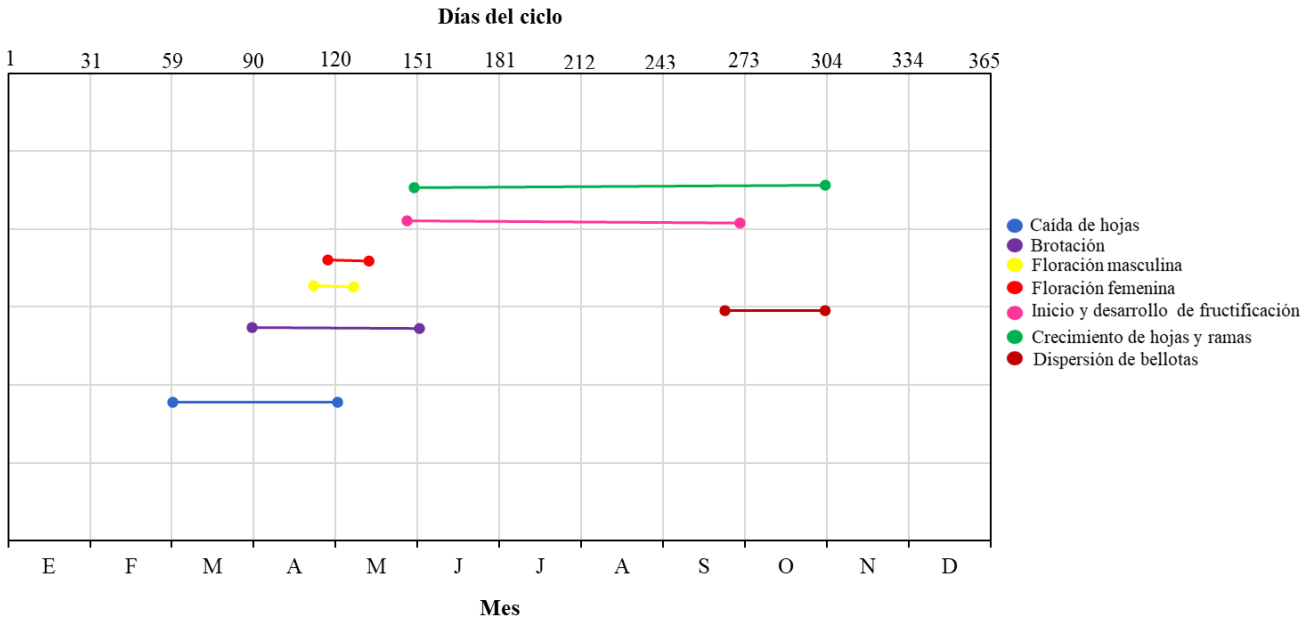


Figura 4. Calendario fenológico de *Quercus durifolia* en Otinapa, Durango, México en 2023.
Figure 4. Phenological calendar of *Quercus durifolia* in Otinapa, Durango, México in 2023.

Los factores ambientales como la temperatura, la luz y la humedad influyen en la floración, ya sea acelerándola o retrasándola (Pérez López *et al.*, 2013). Por ejemplo, las temperaturas bajas pueden inhibir la floración o ralentizar el desarrollo de los granos de polen (Rodríguez-Rajo *et al.*, 2000). En ese sentido, Gerst *et al.* (2017) mencionan que las temperaturas máximas de primavera influyeron en el inicio de las fenofases de brotación y floración de *Q. alba* L. y *Q. rubra* L., mientras que en *Q. agrifolia* Née y *Q. lobata* Née influyeron las temperaturas mínimas. La duración de cada fenofase puede variar entre las mismas especies a lo largo de temporadas de crecimiento, como sucedió en este estudio.

Descripción de cada fase fenológica

Caída de hojas

El periodo de esta etapa fenológica comprendió de marzo a abril; al inicio del mismo los árboles aún conservaban sus hojas con un tono verde amarillento, las ramillas presentaban yemas mixtas,

yemas axilares (entre las hojas) y terminales (al final de la rama); sin embargo, para el mes de abril las hojas adquirieron un color amarillo-café y se desprendieron por completo en 50 % de los árboles monitoreados (Figura 5).

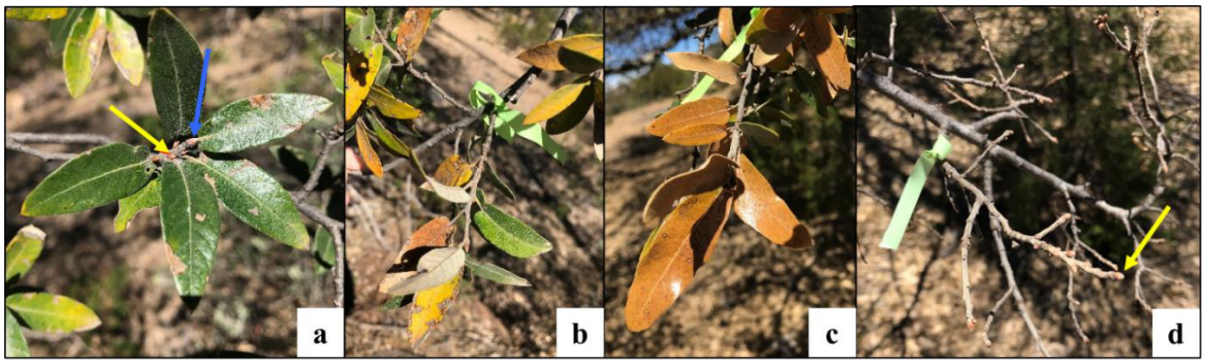


Figura 5. a) hojas de color verde oscuro con presencia de yemas axilares (flecha amarilla) y yema terminal (flecha azul), b) hojas amarillentas, c) hojas de color café y, d) ramas sin hojas con presencia de yemas vegetativas más grandes (flecha amarilla).
Figure 5. a) dark green leaves with the presence of axillary buds (red arrow) and terminal bud (blue arrow), b) yellowish leaves, c) brown leaves and, d) leafless branches with the presence of larger vegetative buds (yellow arrow).

A pesar de que todos los árboles pertenecían a la misma especie y se encontraban en áreas cercanas, la variabilidad fue significativa en la temporalidad y secuencia del desprendimiento de hojas. Este proceso comenzó a finales de marzo, primero en los árboles que florecieron y, posteriormente, en aquellos que solo generaron brotes (Figura 6).

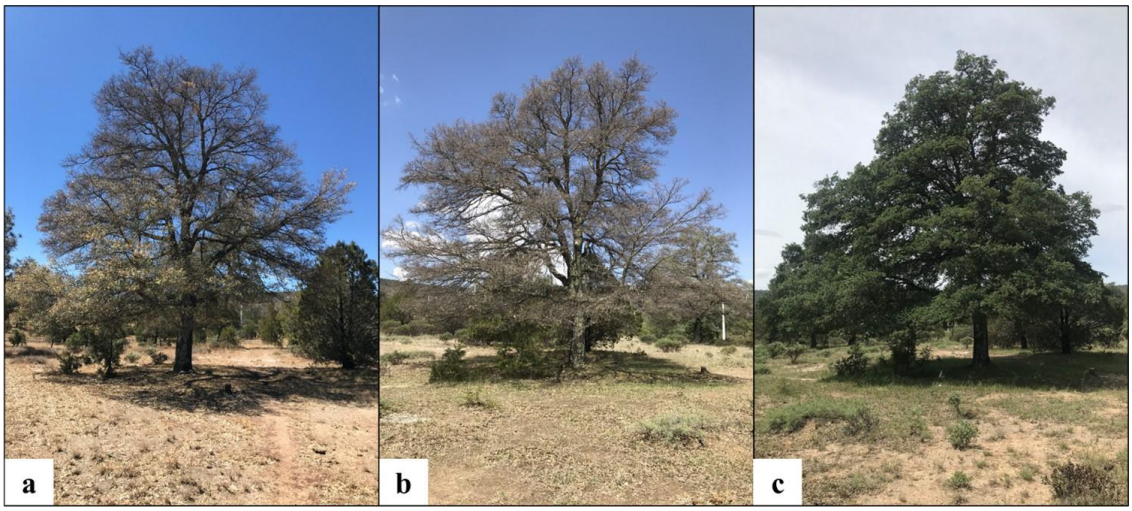


Figura 6. Árbol de *Quercus durifolia* en diferente época del año. a) árbol con hojas maduras y envejecidas en tono amarillo-café (marzo-abril), b) árbol sin hojas (abril-mayo) y c) árbol cubierto con hojas nuevas (junio-julio).
Figure 6. *Quercus durifolia* tree at different times of the year. a) tree with mature and aged yellow-brown leaves (March-April), b) tree without leaves (April-May) and c) tree covered with new leaves (June-July).

Brotación

Esta etapa fenológica se observó de abril a mayo; después de la caída de hojas las yemas quedaron expuestas y presentaron un mayor crecimiento, Meger *et al.* (2024) mencionan que en *Quercus robur* el momento de la brotación está fuertemente relacionado con los regímenes de temperatura. Además, las yemas eran mixtas ya que dieron origen a hojas y a flores de manera conjunta o por separado. Aunado a esto, solo 50 % de los árboles florecieron y el resto solo exhibió crecimiento de brotes; en el primer caso, existió una coincidencia temporal entre el desprendimiento de las hojas y la floración, lo que sugiere una interacción estrecha entre ambos procesos; en particular, típicamente en las especies anemófilas, la floración ocurre antes de la foliación, de modo que el follaje no interfiere en la polinización (Cortés-Flores *et al.*, 2011). En contraste, en el segundo caso, el brote de hojas nuevas tuvo lugar una vez que los árboles se encontraban completamente desprovisto de follaje, donde se observó que la pérdida de hojas se extendió hasta finales de mayo, teniendo un proceso de brotación más lento, caracterizado por la aparición de nuevas hojas únicamente en las yemas terminales, con 4 a 10 hojas, de color verde claro, tanto en la superficie adaxial como abaxial, con color rosado en el borde (Figura 7).

En el caso de los árboles que florecieron, durante esta etapa, las yemas comenzaron a abrirse para generando flores masculinas y nuevos brotes de hojas, que presentaban un tono verde claro en la superficie adaxial y un tono grisáceo en la superficie abaxial con los bordes rosados y blandas al tacto, en todas las ramas del árbol. Para mayo, ya se habían formado las nuevas ramillas con hojas en crecimiento, algunas con hasta 12 hojas; además, se observó un crecimiento simultáneo de hojas y flores. Algunas ramas emitidas de las yemas terminales tuvieron un considerable crecimiento, llegando a generar hasta 21 hojas (Figura 7).

Figura 7. Brotación de ramas: a) ramas con yemas axilares y terminal, b) yema terminal en desarrollo hinchada, c) apertura de yema terminal, d) inicio de despliegue de hojas, e) despliegue de hojas.
Figure 7. Sprouting of branches: a) branches with axillary and terminal buds, b) swollen terminal bud in development, c) opening of terminal bud, d) beginning of leaf unfolding, e) leaf unfolding.

Crecimiento de hojas y ramas

Esta etapa fenológica comprendió un periodo de cinco meses (junio-octubre), el crecimiento se limitó principalmente a las hojas, con la aparición de algunas ramas que aún no habían madurado completamente. Las ramas crecieron entre 2 y 26 cm de largo, portando entre 5 y 21 hojas de 4 a 5.5 cm de largo. En julio y agosto se produjo el crecimiento mayor, en las hojas el color verde se intensificó a un tono más oscuro en la superficie adaxial y la superficie abaxial se puso blanquecino. Dichos meses coinciden con el valor más alto de precipitación (Figura 3b), aumentando la disponibilidad de recursos, lo que asegura grandes cantidades de fotosintatos disponibles para, a su vez, generar tejido fotosintético (Garcia-Barreda *et al.*, 2021). Después de estos meses no se registró un aumento significativo en su tamaño, sólo se intensificó el color verde en la superficie adaxial de las hojas, mientras que el color grisáceo continuó en la superficie abaxial y estaban duras al tacto. Finalmente, en septiembre y octubre, todas las ramas nuevas presentaban yemas axilares y terminales más pronunciadas de 2 a 4 mm, indicando el cese del crecimiento (Figura 8).

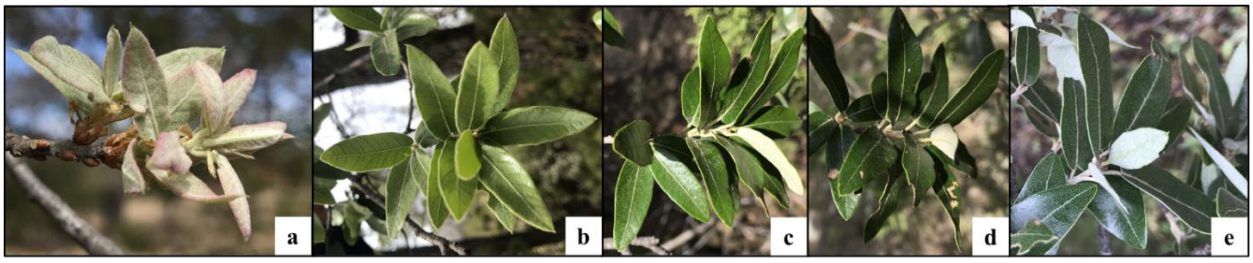


Figura 8. Crecimiento y desarrollo de hojas con tonalidades desde verde opaco a verde oscuro: a) 2.5 GY 5/4, b) 5 GY 6/6, c) 5 GY 4/8, d) 7.5 GY 5/2 y, e) superficie abaxial (2.5G 7/8) y superficie adaxial (7.5 GY 8/2), de acuerdo al Sistema de notación Munsell.
Figure 8. Growth and development of leaves with shades from light green to dark green: a) 2.5 GY 5/4, b) 5 GY 6/6, c) 5 GY 4/8, d) 7.5 GY 5/2 and, e) abaxial surface (2.5G 7/8) and adaxial surface (7.5 GY 8/2), according to the Munsell notation system.

Un estudio en varias especies arbóreas reporta que la temperatura está fuertemente correlacionada con la fecha de inicio de la brotación (Basler & Körner, 2012). En *Quercus robur* se encontró que la relación entre la temperatura primaveral y las primeras hojas fue significativa (Askeyev *et al.*, 2005). Asimismo, Gerst *et al.* (2017) indican que el inicio de las hojas y la floración en cuatro especies de *Quercus* se produce antes en los últimos años, aparentemente en respuesta a temperaturas más altas en invierno y primavera. Entre individuos de una misma población de *Quercus* se encontraron diferencias en las fechas de comienzo de la brotación y floración (Chesnoiu *et al.*, 2009); en este caso algunos árboles brotaron al inicio de la primavera, mientras que otros lo hicieron en el verano. Bertin (2008) menciona que la aparición de hojas y la floración en los encinos se llega adelantar varias semanas, debido a las altas temperaturas en primavera.

Floración

Los encinos son árboles monoicos, producen flores masculinas en amentos, encargadas de la producción de polen y las femeninas emergen en brotes axilares en las hojas de la nueva rama. El desarrollo floral masculino y femenino siguió patrones similares en 50 % de los árboles monitoreados. Esta etapa fenológica ocurrió a finales del mes de abril y principios de mayo, inició cuando se cayeron las hojas de los árboles, quedando las yemas cerradas y expuestas, no pudiendo diferenciarse de las reproductivas. El desarrollo de flores y ramas ocurrió de manera simultánea; durante este proceso los árboles se cubrieron primero de flores masculinas y ramillas jóvenes. La floración tuvo un inicio muy incipiente en cada árbol, extendiéndose después a toda la copa. De las mismas yemas múltiples brotaron tanto flores masculinas como hojas, siendo común que la mayoría de las yemas primero produjeran las flores y luego la rama, aunque en algunos casos se presentaron exclusivamente flores o ramas. La floración masculina duró aproximadamente 15 días, período en el cual las flores liberaron polen (dehiscencia de las anteras), mientras que la floración femenina duró tres semanas. Las yemas reproductivas masculinas desarrollaron de dos a seis amentos. Hacia finales de mayo las flores comenzaron a marchitarse después de la liberación de polen, cambiando de color amarillo claro a un tono más blanco, señalando el final de la etapa de floración. Mientras las flores masculinas emergían directamente de las yemas, las femeninas se desarrollaban entre el crecimiento de las nuevas hojas, haciéndose evidentes una vez que estaban fecundadas (mes de mayo) (Figura 9).

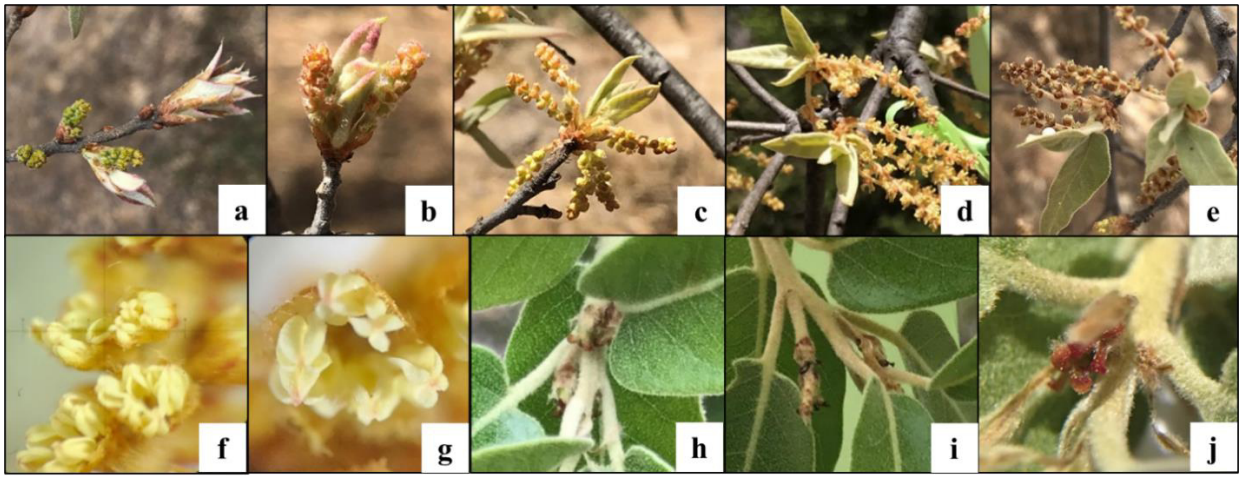


Figura 9. Floración: a) amentos iniciando el desarrollo, b y c) amentos en sucesivos estadios de crecimiento, con las anteras aún no dehiscentes, d) dispersión del polen (dehiscencia de anteras), e) marchitamiento de los amentos (amento marchito y seco, previamente a la abscisión), f) detalle de flores masculinas con algunas anteras cerradas y otras abiertas, g) flores masculinas con todas las anteras abiertas, h) flores femeninas receptivas en las axilas de nuevas ramillas, i) flor femenina con ovario fecundado y estigmas marchitos (secos y de color negruzco) y, j) flor femenina con estigmas receptivos, turgentes y rojizos.
Figure 9. Flowering: a) catkins beginning to develop, b and c) catkins in successive stages of growth, with the anthers not yet dehiscent, d) pollen dispersion (anther dehiscence), e) wilting of the catkins (withered and dry catkin, prior to abscission), f) detail of male flowers with some anthers closed and others open, g) male flowers with all anthers open, h) receptive female flowers in the axils of new twigs, i) female flower with fertilized ovary and withered stigmas (dry and blackish), and j) female flower with receptive, turgid and reddish stigmas.

La floración se produjo en época de escasa precipitación y aumento de la temperatura en el área de estudio. En este período los brotes de las hojas son pequeños; por lo tanto, la polinización se beneficia debido a que ocurre mediante el viento, favoreciéndose durante estos meses (Coombes, 2020). Cortés-Flores *et al.* (2011) reportaron periodos de un mes de floración en especies como *Quercus candicans* Née, *Q. castanea* Née, *Q. crassipes Bonpl., Q. obtusata* Bonpl., y *Q. rugosa* Née. El inicio del periodo de floración está ligado al desarrollo de brotes vegetativos, es decir, el retraso o adelanto en la brotación conlleva un retraso o adelanto en la floración (Bogdziewicz *et al.*, 2020). En este caso, aunque existió una abundante cantidad inicial de flores masculinas, no necesariamente existió una alta producción de semilla. Gómez-Casero *et al.* (2004) mencionan que las condiciones climáticas del invierno y primavera influyen en la dehiscencia y la densidad de las flores, también en la cantidad de polen producido. También, Schermer *et al.* (2020) indican que temperaturas altas en primavera favorecen la sincronización fenológica entre árboles; es decir, se reduce el período de floración, lo que a su vez aumenta el éxito de la polinización por la cantidad de polen en el aire que puede movilizarse y las flores femeninas reciban el polen y sean fecundadas, produciéndose las bellotas.

Fructificación y dispersión de bellotas

La fructificación ocurrió a finales de mayo y el tamaño mayor de los frutos se alcanzó en el mes de julio y agosto, coincidiendo con los meses más cálidos (Figura 3b) y el desarrollo de la temporada de lluvias. La producción de bellotas puede variar año tras año, fenómeno conocido como masting (Coombes, 2020): los encinos producen muchas semillas cada dos años o más de manera sincronizada con otros árboles; este patrón de fructificación alternado puede tener implicaciones importantes para la ecología del bosque y para las comunidades de animales que dependen de los encinos como fuente de alimento.

Núm. 60: 229-244 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

De los seis árboles monitoreados, sólo la mitad produjo bellotas, de los cuales uno tuvo una producción escasa. El principio de la formación de las bellotas indicó que a finales del mes de mayo había tenido lugar la fecundación de las flores femeninas; para el mes de junio las bellotas ya tenían la forma redonda, entre 3 y 5 mm de longitud (Figura 10). En julio, la nuez comenzó a emerger de la cúpula, y durante agosto y septiembre ocurrió un crecimiento tanto en el diámetro como en la longitud de la cúpula y la nuez; en ese periodo, aproximadamente el 50 % de la nuez ya se encontraba fuera de la cúpula (Figura 10). Para el mes de octubre las bellotas alcanzaron 1.5 a 2 cm de longitud, con 0.81 cm de diámetro, llegando a su madurez, indicada por el cambio de tonalidad de verde a café, tanto en la cúpula como en la nuez; además, la nuez se desprendía de la cúpula con facilidad, iniciando su liberación, facilitada por el movimiento de las ramas debido a la acción del viento. La fecha de inicio de la caída de la bellota ocurrió al mismo tiempo en los tres árboles evaluados que produjeron bellotas.

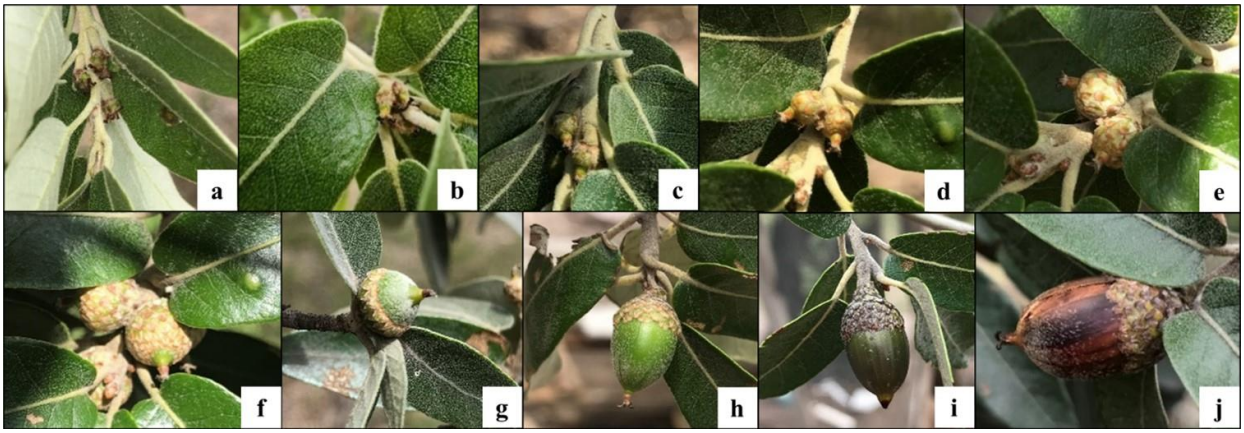


Figura 10. Proceso de crecimiento de la bellota: a) flor femenina fecundada, b y c) ovario en desarrollo de color verde, d y e) pequeña cúpula escamosa redondeada con ovario en color café, f) nuez emergiendo de la cúpula, g) longitud de la bellota igual a la longitud de la cúpula, h) longitud de la bellota mayor a la longitud de la cúpula, aún verde, i) bellota a punto de madurar, tono verde-café y, j) bellota madura, color café.
Figure 10. Acorn growth process: a) fertilized female flower, b and c) developing green ovary, d and e) small rounded scaly dome with brown ovary, f) nut emerging from the dome, g) acorn length equal to dome length, h) acorn length greater than dome length, still green, i) acorn about to mature, green-brown tone, and j) mature acorn, brown color.

Un aspecto a destacar es que, pese a que los árboles estuvieron cubiertos con flores masculinas, la producción de bellotas fue notablemente escasa. Se han reportado pérdidas previas a la dispersión debido al aborto causado por condiciones climáticas desfavorables durante la etapa de floración y desarrollo de bellotas (Díaz-Fernández *et al.*, 2004). La producción de bellotas se correlaciona con la lluvia o la temperatura en primavera (Bogdziewicz *et al.*, 2017a); por lo tanto, en gran parte el aborto de bellotas se debe a la escasez de agua. Gręda *et al.* (2022) mencionaron el aborto de bellotas en *Q. rubra* L., debido a eventos climáticos extremos que inhibieron la reproducción. Otro factor adverso que influye es el consumo de bellotas por insectos, aves y especialmente roedores antes de desprenderse del árbol (Aguilar-Peralta *et al.*, 2016). En el área se observaron algunos pájaros carpinteros y ardillas, quienes pudieron haber consumido las bellotas previo a su liberación de los árboles, en general se observó una baja producción de bellotas en los encinos cercanos al área de estudio.

Otra causa del déficit de bellotas es el consumo de las flores femeninas por orugas de lepidópteros, lo cual tiene un impacto directo y significativo en la producción de frutos (Pulido, 2002). La pérdida de flores femeninas de *Quercus suber* L. durante el verano fue atribuido a una intensa sequía (Díaz-Fernández *et al.*, 2004). La floración temprana en las especies de encinos de

zonas templadas da como resultado que normalmente se libere polen durante condiciones climáticas desfavorables y, con frecuencia, resulta en fallas reproductivas (Schermer *et al.*, 2020). Sin embargo, la capacidad de fructificación entre especies del género *Quercus* es variable, independientemente de las condiciones ambientales (Díaz-Pontones & Reyes-Jaramillo, 2009).
Según Coombes (2020), la variación anual en la producción de bellotas, de manera sincronizada y masiva cada dos años, se debe a que el polen es escaso en los intervalos bianuales; en contrapartida, se considera una estrategia reproductiva común en poblaciones de encino, debido a que producen más semillas de las que pueden ser consumidas por los depredadores (Cortés-Flores *et al.*, 2011), como se ha registrado en *Quercus ilex* L. (Bogdziewicz *et al.*, 2017b). Incluso existen marcadas variaciones en la producción de bellotas entre individuos dentro del mismo año, las cuales oscilan entre 0.5 y 150 kg/árbol (García-Mozo *et al.*, 2007). *Quercus robur* L. mostró fluctuaciones anuales, tendiendo a alternarse años de mayor producción con años de baja producción (Askeyev *et al.*, 2005). Al parecer este comportamiento está asociado con la variación anual en las condiciones climáticas y la capacidad de los árboles para almacenar recursos después de la última producción de bellotas (García-Mozo *et al.*, 2007).
Garcia-Barreda *et al.* (2021) menciona tres hipótesis que vinculan el clima y las reservas almacenadas con la producción de bellotas; la primera es que la alta producción de bellotas ocurre en los años en que existen más recursos disponibles, prediciendo así una relación positiva entre reproducción y crecimiento. La segunda es que la producción de bellotas no puede ocurrir todos los años porque la reproducción es costosa y el árbol debe acumular recursos más allá de un cierto umbral, con grandes esfuerzos reproductivos que agotan las reservas. Y la tercera es que un árbol invierte una cantidad relativamente constante de recursos del año en curso en crecimiento o reproducción, prediciendo así compensaciones de asignación entre reproducción y crecimiento.
El comportamiento fenológico varía de un año a otro, ya que las condiciones climáticas varían (Gómez-Casero *et al.*, 2007); por lo tanto, las observaciones fenológicas deben llevarse a cabo a lo largo de varios años, con el fin de obtener una visión general del comportamiento de este fenómeno.

CONCLUSIONES

Quercus durifolia tuvo fases fenológicas definidas durante el periodo de evaluación (nueve meses), pese a que existieron diferencias entre los individuos evaluados. La defoliación comenzó a finales de marzo, primero en los árboles que florecieron y, posteriormente, en aquellos que solo generaron brotes. El crecimiento vegetativo se inició durante la época seca del año (abril y mayo). Las yemas dieron origen a ramas y flores de manera simultánea, y en algunos casos solo generaron ramas o flores. El 50 % de los árboles monitoreados produjeron bellotas, las cuales se desarrollaron de mayo a septiembre y culminaron su dispersión en octubre. Futuros estudios deberían abordar variaciones interanuales, en el contexto del cambio climático y de las variaciones típicas periódicas en este género.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada al primer autor, derivada de la convocatoria “Estancias Posdoctorales por México 2022 (3)”. A la Dra. María del Socorro González Elizondo del CIIDIR-IPN unidad Durango, por el apoyo en la identificación de *Quercus durifolia* Seemen ex Loes.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Peralta, J. S., González-Rodríguez, A., González-Esquivel, J. G., & Cuevas-Reyes, P. (2016). Patrones de depredación de bellotas en especies del género *Quercus* (Fagaceae) a lo largo de un gradiente altitudinal en el Volcán de Tequila, Jalisco. *Biológicas*, *18*, 1–9.

Aguilar-Romero, R., García-Oliva, F., Pineda-García, F., Torres, I., Peña-Vega, E., Ghilardi, A., & Oyama, K. (2016). Patterns of distribution of nine *Quercus* species along an environmental gradient in a fragmented landscape in central Mexico. *Botanical Sciences*, *94*(3), 471–482. https://doi.org/10.17129/botsci.620

Askeyev, O. V., Tischin, D., Sparks, T. H., & Askeyev, I. V. (2005). The effect of climate on the phenology, acorn crop and radial increment of pedunculate oak (*Quercus ro*bur) in the middle Volga region, Tatarstan, Russia. *International Journal of Biometeorology*, *49*(4), 262–266. https://doi.org/10.1007/s00484-004-0233-3

Basler, D., & Körner, C. (2012). Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*, *165*, 73–81. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.001

Bertin, R. I. (2008). Plant phenology and distribution in relation to recent climate change. *The Journal of the Torrey Botanical Society*, *135*(1), 126–146. https://doi.org/10.3159/07-RP-035R.1

Block, S., & Meave, J. A. (2015). Structure and diversity of oak forests in the El Tepozteco National Park (Morelos, Mexico). *Botanical Sciences*, *93*(3), 429–460. https://doi.org/10.17129/botsci.150

Bogdziewicz, M., Fernández-Martínez, M., Bonal, R., Belmonte, J., & Espelta, J. M. (2017). The Moran effect and environmental vetoes: phenological synchrony and drought drive seed production in a Mediterranean oak. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *284*(1866), 20171784. https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1784

Bogdziewicz, M., Szymkowiak, J., Bonal, R., Hacket-Pain, A., Espelta, J. M., Pesendorfer, M., Grewling, L., Kasprzyk, I., Belmonte, J., Kluska, K., De Linares, C., Penuelas, J., & Fernandez-Martinez, M. (2020). What drives phenological synchrony? Warm springs advance and desynchronize flowering in oaks. *Agricultural and Forest Meteorology*, *294*, 108140. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108140

Bogdziewicz, M., Szymkowiak, J., Kasprzyk, I., Grewling, Ł., Borowski, Z., Borycka, K., Kantorowicz, W., Myszkowska, D., Piotrowicz, K., Ziemianin, M., & Pesendorfer, M. B. (2017). Masting in wind-pollinated trees: system-specific roles of weather and pollination dynamics in driving seed production. *Ecology*, *98*(10), 2615–2625. https://doi.org/10.1002/ecy.1951

Bravo-Bolaños, O., López-García, J., & Sánchez-González, A. (2020). Estructura y composición florística de los bosques de *Quercus* del Volcán Sanganguey, Nayarit, México. *Botanical Sciences*, *98*(3), 441–452. https://doi.org/10.17129/botsci.2490

Chesnoiu, E. M., Sofletea, N., Curtu, A. L., Toader, A., Radu, R., & Enescu, M. (2009). Bud burst and flowering phenology in a mixed oak forest from Eastern Romania. *Annals of Forest Research*, *52*, 199–206.

Coombes, A. J. (2020). Colecta y almacenamiento de bellotas. Aspectos claves. . In *Manual para la propagación de Quercus: una guía fácil y rápida para cultivar encinos en México y América Central.* (1st ed., pp. 21–27). Jardín Botánico Universitario de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Cortés-Flores, J., Cornejo-Tenorio, G., & Ibarra-Manríquez, G. (2011). Fenología reproductiva de las especies arbóreas de un bosque neotropical. *Interciencia*, *36*(8), 608–613.

Díaz-Fernández, P. M., Climent, J., & Gil, L. (2004). Biennial acorn maturation and its relationship with flowering phenology in Iberian populations of Quercus suber. *Trees*, *18*(6), 615–621. https://doi.org/10.1007/s00468-004-0325-z

Díaz-Pontones, D., & Reyes-Jaramillo, I. (2009). Producción y almacenamiento de bellotas de *Quercus hintonii* Warburg (Fagaceae) de la Depresión del Balsas, México. *Polibotánica*, *27*, 131–143.

Encina-Domínguez, J. A., Mata Rocha, E., Meave, J. A., & Zárate-Lupercio, A. (2011). Community structure and floristic composition of *Quercus fusiformis* and Carya illinoinensis forests of the Northeastern Coastal Plain, Coahuila, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *82*(2), 607–622. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.2.466

Gallinat, A. S., Primack, R. B., Willis, C. G., Nordt, B., Stevens, A., Fahey, R., Whittemore, A. T., Du, Y., & Panchen, Z. A. (2018). Patterns and predictors of fleshy fruit phenology at five international botanical gardens. *American Journal of Botany*, *105*(11), 1824–1834. https://doi.org/10.1002/ajb2.1189

Garcia-Barreda, S., Sangüesa-Barreda, G., Madrigal-González, J., Seijo, F., González de Andrés, E., & Camarero, J. J. (2021). Reproductive phenology determines the linkages between radial growth, fruit production and climate in four Mediterranean tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*, *307*, 108493. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108493

García-Mozo, H., Gómez-Casero, M. T., Domínguez, E., & Galán, C. (2007). Influence of pollen emission and weather-related factors on variations in holm-oak (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) acorn production. *Environmental and Experimental Botany*, *61*(1), 35–40. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.02.009

Gerst, K. L., Rossington, N. L., & Mazer, S. J. (2017). Phenological responsiveness to climate differs among four species of *Quercus* in North America. *Journal of Ecology*, *105*(6), 1610–1622. https://doi.org/10.1111/1365-2745.12774

Gómez-Casero, M. T., Galán, C., & Domínguez-Vilches, E. (2007). Flowering phenology of Mediterranean *Quercus* species in different locations (Córdoba, SW Iberian Peninsula). *Acta Botanica Malacitana*, *32*, 127–146. https://doi.org/10.24310/abm.v32i0.7033

Gómez-Casero, M. T., Hidalgo, P. J., García-Mozo, H., Domínguez, E., & Galán, C. (2004). Pollen biology in four Mediterranean *Quercus* species. *Grana*, *43*(1), 22–30. https://doi.org/10.1080/00173130410018957

González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: una síntesis. *Acta Botanica Mexicana*, *100*, 351–403. https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40

Gręda, A., Woziwoda, B., Dyderski, M. K., Jagodziński, A. M., & Frelich, L. E. (2022). Acorn production of introduced *Quercus rubra* is more strongly impacted by the weather than by the forest site (a case study from Poland). *Agricultural and Forest Meteorology*, *327*, 109228. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109228

Hernández Quiroz, N. S., & Badano, E. I. (2017). Cambio climático y bosques de encinos. *Ciencia*, *68*(4), 70–75.

Maldonado, M. J. (2011). *Estudio fenológico de seis especies forestales con potencial maderable en el bosque universitario del Valle del Sacta – Cochabamba*.

Meger, J., Ulaszewski, B., Chmura, D. J., & Burczyk, J. (2024). Signatures of local adaptation to current and future climate in phenology-related genes in natural populations of *Quercus robur*. *BMC Genomics*, *25*(1), 78. https://doi.org/10.1186/s12864-023-09897-y

Mejía Gutiérrez, M. (1990). *Fenología: Fundamentos y métodos*.

Méndez Osorio, C., Mora Donjuán, C. A., Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., Treviño Garza, E. J., & Pequeño Ledezma, M. A. (2018). Fitodiversidad y estructura de un bosque de pino-encino en la Sierra Madre del Sur, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *9*(50), 35–53. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.236

Olvera-Vargas, M., & Figueroa-Rangel, B. L. (2012). Caracterización estructural de los bosques montanos dominados por encinos en el centro-occidente de México. *Ecosistemas*, *21*(1–2), 74–84.

Pérez López, P., López Barrera, F., García Oliva, F., Cuevas Reyes, P., & González Rodríguez, A. (2013). Procesos de regeneración natural en bosques de encinos: factores facilitadores y limitantes. *Biológicas*, *15*, 18–24.

Recibido:
29/octubre/2024

Aceptado:
9/junio/2025

Pulido, F. J. (2002). Biología reproductiva y conservación: el caso de la regeneración de bosques templados y subtropicales de robles (*Quercus* spp.). *Revista Chilena de Historia Natural*, *75*(1), 5–15. https://doi.org/10.4067/S0716-078X2002000100002

Ramírez-Martínez, A., & Mondragón Chaparro, D. (2020). La fenología de bromelias y orquídeas epífitas en un bosque de encino estacional. *Desde El Herbario CICY*, *12*, 1–5.

Rivas Romero, J. A., Alvarez-Requena, J. J., & Bravo-Santizo, V. (2021). Fenología reproductiva de *Prunus lundelliana* Standl. (Rosaceae), un árbol en peligro de extinción con potencial para restaurar bosques nubosos de Mesoamérica. *Ciencia, Tecnología y Salud*, *8*(1), 43–56. https://doi.org/10.36829/63CTS.v8i1.857

Rodríguez-Rajo, J., Méndez, J., & Jato, M. V. (2000). Influencia de la temperatura en la floración de *Quercus* en el sur de Galicia (Ourense y Vigo, 1994-98). *Acta Botanica Malacitana*, *25*, 153–163. https://doi.org/10.24310/abm.v25i0.8480

Rosaliano Evaristo, R., Ávila-Akerberg, V., Franco-Maass, S., Valencia-A., S., & López Mathamba, L. A. (2022). Estructura y diversidad arbórea en bosques de encino del centro de México. *Madera y Bosques*, *28*(2), e2822449. https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822449

Rubio-Licona, L. E., Romero-Range, S., & Rojas-Zenteno, E. C. (2011). Estructura y composición florística de dos comunidades con presencia de *Quercus* (Fagaceae) en el estado de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, *XVII*(1), 77–90. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.03.014

Ruiz-Aquino, F., Valdez-Hernández, J. I., Romero-Manzanares, A., Manzano-Méndez, F., & Fuentes-López, M. E. (2015). Distribución espacial de dos especies de encinos y atributos ecológicos del bosque de pino-encino en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, *21*(1), 67–80. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.05.023

Sabás-Rosales, J. L., Sosa-Ramírez, J., & Luna-Ruiz, J. D. J. (2015). Diversidad, distribución y caracterización básica del hábitat de los encinos (*Quercus*: Fagaceae) del Estado de San Luis Potosí, México. *Botanical Sciences*, *93*(4), 881–897. https://doi.org/10.17129/botsci.205

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

Saveanu, L., & Murray, M. G. (2014). Fenología de la floración de *Ulmus pumila* L. (Ulmaceae) en la ciudad de Bahía Blanca (Argentina). *Polibotánica*, *38*, 113–127.

Schermer, É., Bel-Venner, M., Gaillard, J., Dray, S., Boulanger, V., Le Roncé, I., Oliver, G., Chuine, I., Delzon, S., & Venner, S. (2020). Flower phenology as a disruptor of the fruiting dynamics in temperate oak species. *New Phytologist*, *225*(3), 1181–1192. https://doi.org/10.1111/nph.16224

Tang, J., Körner, C., Muraoka, H., Piao, S., Shen, M., Thackeray, S. J., & Yang, X. (2016). Emerging opportunities and challenges in phenology: a review. *Ecosphere*, *7*(8). https://doi.org/10.1002/ecs2.1436

Zárate Cuevas, L., Núñez López, N. M., Cuevas Guzmán, R., Morales Arias, J. G., Sánchez Rodríguez, E. V., Guzmán Hernández, L., & Solís Magallanes, J. A. (2022). Fenología reproductiva de árboles en una zona montañosa del occidente de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *13*(69), 155–176. https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i69.1176

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

REGISTRO POLÍNICO EN MIEL DE *Apis mellifera* L. DE DOS LOCALIDADES DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA DE MANANTLÁN, JALISCO, MÉXICO

POLLEN RECORD ON HONEY OF *Apis mellifera* L. OF SIERRA DE MANANTLÁN BIOSPHERE RESERVE, JALISCO, MÉXICO

Morales-Najarro, X.M., I.G. Galván-Escobedo, M. Vázquez-Sánchez, M. Medina-Acosta

REGISTRO POLÍNICO EN MIEL DE *Apis mellifera* L. DE DOS LOCALIDADES DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA DE MANANTLÁN, JALISCO, MÉXICO
POLLEN RECORD ON HONEY OF *Apis mellifera* L. OF SIERRA DE MANANTLÁN BIOSPHERE RESERVE, JALISCO, MÉXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 245-262 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.14

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 245-262 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Registro polínico en miel de *Apis mellifera* L. de dos localidades de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Jalisco, México

Pollen record on honey of *Apis mellifera* L. of Sierra de Manantlán Biosphere Reserve, Jalisco, México

Xochilt M. Morales-Najarro https://orcid.org/0000-0002-6900-0514
Posgrado en Botánica, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México

Iris G. Galván-Escobedo / sirigales@gmail.com
http://orcid.org/0000-0003-4250-4971
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Ciudad de México, México

Monserrat Vázquez-Sánchez http://orcid.org/0000-0002-2498-2833
Posgrado en Botánica, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, México

Montserrath Medina-Acosta[3] http://orcid.org/0000-0002-6244-7604
Doctorado en Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Iztapalapa, Ciudad de México, México

Morales-Najarro, X.M., I.G. Galván-Escobedo, M. Vázquez-Sánchez, M. Medina-Acosta

REGISTRO POLÍNICO EN MIEL DE *Apis mellifera* L. DE DOS LOCALIDADES DE LA RESERVA DE LA BIOSFERA SIERRA DE MANANTLÁN, JALISCO, MÉXICO

POLLEN RECORD ON HONEY OF *Apis mellifera* L. OF SIERRA DE MANANTLÁN BIOSPHERE RESERVE, JALISCO, MÉXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 245-262. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.14

RESUMEN: La Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM) se localiza en el sur del estado de Jalisco, México. Las comunidades indígenas que complementan sus actividades productivas con la apicultura. Sin embargo, la mieles que producen carecen de los análisis que establece la normativa mexicana para determinar su origen botánico. El objetivo de este trabajo fue establecer el origen botánico de las mieles producidas en las comunidades de San Miguel y Telcruz y, así, determinar los recursos vegetales importantes para la producción de miel en la región. Se utilizaron sistemas de información geográfica para establecer los tipos de vegetación circundantes a los apiarios. Se cuantificaron los tipos polínicos de 17 muestras de miel cosechadas en otoño de 2018 y 2019, para establecer su origen botánico con base en la NOM-004-SAG/GAN-2018, Producción de miel y especificaciones. Se estimó la riqueza y diversidad α de los tipos polínicos, así como la disimilitud en la composición de los conjuntos palinológicos de las mieles. Se detectaron geoecosistemas del tipo vegetación secundaria, bajo uso agropecuario y coberturas vegetales diversas como: bosques mixtos, bosque de pino-encino, matorral-pastizal, entre otros. El origen botánico de las mieles en San Miguel fue: una oligofloral, ocho biflorales y siete estrictamente multiflorales. En Telcruz la miel fue de origen monofloral. Por lo tanto, la composición de los conjuntos palinológicos fue diferente en las mieles de ambas localidades. La riqueza y diversidad α de los tipos polínicos en las mieles de San Miguel, determinó la variación en la clasificación del origen botánico entre las mieles de 2018 y 2019. Es necesario evaluar la contribución *Fraxinus* y *Quercus*, como recursos poliníferos en la región.
Palabras clave: origen botánico, melisopalinología, NOM-004-SAG/GAN-2018, monofloral, multifloral.

ABSTRACT: The Sierra de Manantlán Biosphere Reserve (RBSM) is located in the southern part of the state of Jalisco, Mexico. Indigenous communities in this area complement their productive activities with beekeeping. However, the honey they produce lacks the analyses required by Mexican regulations to determine its botanical origin. The objective of this study was to establish the botanical origin of the honey produced in the communities of San Miguel and Telcruz and, in doing so, identify the key plant resources for honey production in the region. Geographic information systems were used to determine the types of vegetation surrounding the

apiaries. The pollen types in 17 honey samples harvested in the fall of 2018 and 2019 were quantified to establish their botanical origin based on NOM-004-SAG/GAN-2018, Honey Production and Specifications. The richness and α-diversity of the pollen types were estimated, as well as the dissimilarity in the composition of the palynological assemblages of the honey samples. The identified geoecosystems included secondary vegetation, agricultural land use, and diverse plant cover types such as mixed forests, pine-oak forests, shrub-grassland, among others. The botanical origin of the honey from San Miguel was classified as follows: one oligofloral, eight bifloral, and seven strictly multifloral samples. In Telcruz, the honey was monofloral. Therefore, the composition of the palynological assemblages differed between the honey samples from both locations. The richness and α-diversity of pollen types in the honey from San Miguel influenced the classification of its botanical origin between the 2018 and 2019 samples. It is necessary to evaluate the contribution of *Fraxinus* and *Quercus* as pollen resources in the region.
Key words: botanical origin, melissopalynology, NOM-004-SAG/GAN-2018, monofloral, multifloral.

INTRODUCCIÓN

Los estudios melisopalinológicos se basan en el análisis de polen presente en las muestras de miel, para determinar la cantidad de tipos polínicos que contienen, reconocer los recursos florales que utilizan las abejas para elaborar la miel y validar, en cierta medida, que estas no son adulteradas (Abdulrahaman *et al.*, 2013). La identificación y cuantificación de los granos de polen de la miel son clave para conocer el origen botánico y geográfico de estas (Castañón Chavarría, 2009; Sánchez & Lupo, 2011). El origen botánico se establece a través de los porcentajes representativos de cada taxón identificado en las muestras, lo que determinará si la miel es monofloral o multifloral (Ramírez-Arriaga *et al.*, 2011; Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), 2020).

A nivel nacional existen algunos estudios melisopalinológicos en la Ciudad de México (Piedras Gutiérrez & Quiroz García, 2007), Durango (González-Castillo *et al*., 2017), Guerrero (González Sandoval *et al.*, 2016; Ramírez-Arriaga *et al*., 2016), Michoacán (Araujo-Mondragón & Redonda-Martínez, 2019), Oaxaca (Ramírez-Arriaga *et al*., 2011), Tabasco (Castellanos-Potenciano *et al*., 2012; Córdova-Córdova *et al*., 2013) y Yucatán (Alfaro Bates *et al*., 2010). Dichos estudios implementaron técnicas y parámetros estandarizados para el análisis de miel (Louveaux *et al*., 1970; Von Der Ohe *et al*., 2004), que obedecen a los criterios establecidos para la determinación del origen botánico de la miel europea. La información generada en estos estudios reveló una amplia diversidad de orígenes botánicos de la miel mexicana y la necesidad de establecer protocolos estandarizados para su análisis melisopalinológico, los cuales tomen en cuenta las particularidades de cada tipo de miel producida en las diferentes regiones mexicanas. En respuesta a esto, en el diario oficial de la federación se publicó la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SAG/GAN-2018, Producción de miel y especificaciones (SADER, 2020), la cual es un esfuerzo por estandarizar los protocolos para la caracterización física, química y botánica de miel producida por *Apis mellifera* L. en México y, así, clasificar los tipos de miel producidas en las diversas regiones apícolas de nuestro país.

En la región apícola del Pacífico de México, existe carencia de estudios que definan el origen botánico de la miel que se produce en ella. En este sentido, destaca el caso de Jalisco, considerado el mayor productor de miel en 2020 (SIAP, 2021) y que, en años anteriores, se encontró entre los tres primeros lugares de mayor producción de miel a nivel nacional (Castillo Cázares *et al*., 2016). En el sur del estado de Jalisco, se localiza parte de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (RBSM), cuya riqueza de especies silvestres y cultivadas, proveen potencial forestal y servicios ecológicos para toda la región (Instituto Nacional de Ecología (México) (INECOL), 2000).

En la Sierra de Manantlán, se reconoce a la apicultura como una de las actividades tradicionales agrícolas de importancia económica, la cual favorece la diversidad biológica y genética de los ecosistemas (Contreras-Escareño *et al.*, 2013; Tetreault & Lucio López, 2011). Para mantener y promover la apicultura dentro de la RBSM, es importante contribuir con información científica sobre la miel producida y comercializada en la zona; tal es el caso de las comunidades indígenas de San Miguel y Telcruz, en el Ejido de Ayotitlán, cuya miel no cuenta con ningún tipo de análisis melisopalinológico que respalde su origen botánico. Los distintos tipos de bosques con especies dominantes de los géneros *Abies* Mill., *Alnus* Mill., *Fraxinus* Tourn. ex L., *Pinus* L., *Quercus* L., *Styrax* L., entre otros, son comunes en ambas localidades, por lo tanto, la composición florística circundante a los apiarios es similar en ambas

comunidades (INECOL, 2000; Jardel Peláez *et al.*, 2013; Vázquez *et al*., 1995), por lo que se espera que la miel producida en estas comunidades sea similar y de origen multifloral.

El objetivo de este trabajo fue determinar el origen botánico de la miel de *A. mellifera* de nueve apiarios ubicados en las comunidades de San Miguel y Telcruz en la RBSM, a través de la cuantificación y determinación del polen encontrado en la miel de cada uno de los apiarios; contrastar el registro polínico con la vegetación dentro del área de pecoreo de *A. mellifera* y estimar la riqueza, diversidad α y la disimilitud entre los apiarios.

Métodos

Zona de Estudio

El estudio se realizó en la región centro-sur de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán (19° 25' - 19° 45' N, 103° 45' - 104° 30' O) (Figura 1), en el Ejido de Ayotitlán, municipio de Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, donde se ubican las comunidades de San Miguel y Telcruz. El estado de Jalisco se ubica en la provincia biogeográfica de la región Neártica, mientras que la RBSM pertenece a la zona de transición fitogeográfica denominada Holártica-Neotropical (Morrone, 2005) en la Sierra Madre Occidental. En la región se han registrado climas cálidos a templados subhúmedos, con temperatura media anual de 16-22°C y precipitaciones de más de 1700 mm (INECOL, 2000).

Determinación de los tipos de vegetación

La identificación de la vegetación circundante a las localidades de Telcruz y San Miguel, se realizó con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el programa ArcMap 10.5. Se obtuvieron los atributos de la vegetación por medio de recortes para el área de influencia (buffer) de 5 km alrededor de los apiarios, en las capas de vegetación de geoecosistemas (unidades de paisaje o unidades ambientales), del Ejido de Ayotitlán para la RBSM. Éstas agruparon información botánica y uso de suelo, datos bioclimáticos y geomorfoedafológicos (Jardel Peláez *et al*., 2013).

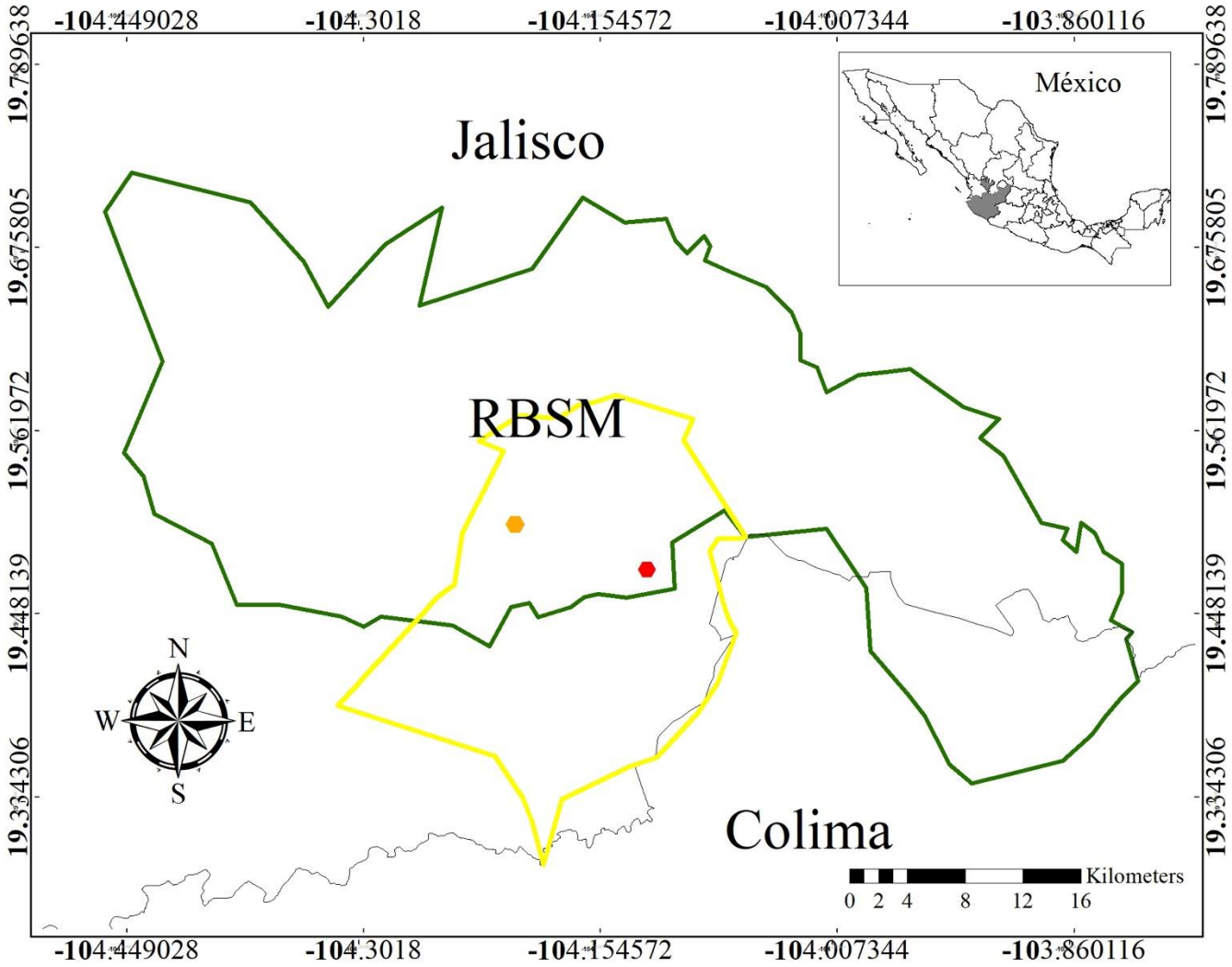


Figura 1. Ubicación de los sitios de estudio, San Miguel (punto naranja) y Telcruz (punto rojo) en la Biósfera Sierra de Manantlán (RBSM, línea verde) y el Ejido de Ayotitlán (línea amarilla), Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México.
Figure 1. Location of study sites, San Miguel (orange dot) and Telcruz (red dot) in Sierra de Manantlán Biosphere (RBSM, green line) and Ejido de Ayotitlán (yellow line), Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México.

Recolección y tratamiento de muestras

Al finalizar el periodo de floración de septiembre a diciembre, se recolectaron 17 muestras de miel de diferentes apiarios de las localidades de Telcruz y San Miguel. En la primera, la muestra correspondió al apiario La Parota, del año 2019. En la segunda, se recolectaron muestras en los años 2018 y 2019 de los apiarios: Carretera Arriba, Nuevo, La Lomita, Los Tablones, La Higuerita, Piedra Picuda I, Piedra Picuda II y Llano del medio. Las muestras de 250 g de miel líquida centrifugada se almacenaron en frascos estériles (SADER, 2020).

Para la extracción de polen se tomaron 50 g de miel por muestra y se procesaron de acuerdo con la técnica de acetólisis de Erdtman (Martínez-Hernández, 1970) y al protocolo de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SAG/GAN-2018, Producción de miel y especificaciones (SADER, 2020). Aunque este método destruye algunos elementos microscópicos presentes en la miel, como las hifas de hongos, algas y levaduras, es recomendable realizarlo para eliminar el contenido citoplasmático de los granos de polen. Esto facilita la observación de las características morfológicas de la pared del polen y, de esta manera, determinar con mayor precisión de qué taxón vegetal provienen.

El polen se observó en un microscopio fotónico marca Zeiss, modelo Axioscop 2 (Carl Zeiss AG, Jena, Alemania), en campo claro a 1000× de aumento y se tomaron fotomicrografías con una cámara digital marca Amscope, modelo MU1000 (AmScope, California, E.U.A.). Adicionalmente, se tomaron 10 ml de polen acetolizado suspendido en agua destilada y se enviaron para su procesamiento y obtención de imágenes en un microscopio electrónico de barrido marca Carl Zeiss EVO-50 (Carl Zeiss AG, Alemania), en el Laboratorio Nacional de Identificación y Caracterización Vegetal Sede Querétaro (LANIVEG-QRO).

Determinación y clasificación de tipos polínicos

En cada muestra los tipos polínicos se identificaron a nivel de familia, género o especie botánica; en los que no fue posible asignar una categoría taxonómica, se registraron como "indeterminados". Se utilizó literatura especializada de palinofloras (Hesse *et al*., 2009; Palacios-Chávez *et al*., 1991; Ramos-Díaz *et al*., 2015; Roubik & Moreno, 1992), estudios de morfología polínica (Durán *et al.*, 2000; Hebda & Chinnappa, 1990; Medina-Acosta *et al.*, 2019; Morton & Dickison, 1992; Panahi *et al.*, 2012; Skvarla & Larson, 1965) y trabajos melisopalinológicos efectuados en México (Acosta Castellanos *et al*., 2011; Alaniz-Gutiérrez *et al*., 2017; Alfaro Bates *et al*., 2010; Campos-Trujillo *et al*., 2015; Córdova-Córdova *et al*., 2013; González-Castillo *et al*., 2017; González Sandoval *et al*., 2016; Quiroz García & Arreguín Sánchez, 2008; Ramírez-Arriaga *et al*., 2016).

Se realizó la cuantificación de 500 granos de polen por muestra, de éstos, se excluyeron los que pertenecían a plantas reconocidas como anemófilas. Se establecieron las clases de frecuencia de acuerdo con Louveaux *et al.*, (1970) y a las especificaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SAG/GAN-2018 (SADER, 2020): polen predominante (*P*: aquellos tipos presentes en porcentajes > 45%), polen secundario (*S*: con presencia entre 16-45%), polen de menor importancia (*MI*: entre 3-15%), polen menor ($m < 3\%$) y polen presente ($p < 1\%$). Con el programa TILIA versión 2.0.41 (Grimm, 2011), se realizaron diagramas polínicos de frecuencias relativas de los tipos polínicos por muestra. Para la nomenclatura de los tipos polínicos se siguió el criterio de De Klerk & Joosten (2007).

Clasificación botánica de la miel

Con base en el criterio de Ramírez-Arriaga *et al*., (2011, 2016), Ramírez-Arriaga *et al*. (2011, 2016) y la NOM-004-SAG/GAN-2018, Producción de miel y especificaciones (SADER, 2020), las muestras de miel se clasificaron en monoflorales, cuando presentaron un taxón dominante (≥ 45%), o multiflorales. En este último caso, se denominaron: biflorales, cuando presentaron dos taxones relevantes de diferentes familias botánicas y porcentajes entre 16-44%; oligoflorales, con dos o más taxones de una familia botánica y valores entre 16-44%; y estrictamente multiflorales, con tres o más taxones de diferentes familias con porcentajes ≥ 10%.

Índices de diversidad biológica

Con fines comparativos y para determinar el tamaño del nicho trófico a través del número de taxones presentes en la miel, en cada muestra se estimó la diversidad α a través de los siguientes índices: la riqueza taxonómica (S), el cual indicó el número total del taxones registrados en las mieles; el índice de diversidad α de Shannon-Weaver (*H´*) que, además del número de taxones, determinó la abundancia de cada uno de ellos; y la equidad de Pielou (*J´*), que definió la proporción de la diversidad observada con relación a la máxima diversidad esperada (Magurran, 1988; Montes Tubio *et al.*, 2003; Pielou, 1975; Shannon, 1948). Los cálculos se llevaron a cabo con el Software Species Diversity and Richness IV (Seaby & Henderson, 2007). El grado de disimilitud entre los conjuntos polínicos registrados en los apiarios, se evaluó a través de un análisis de agrupamiento jerárquico, utilizando el método de enlace simple y la distancia del coeficiente de Jaccard (Jaccard, 1901); los análisis se realizaron con el software Community Analysis Package 4.0 (Seaby & Henderson, 2007). La distancia de Jaccard indicó la frecuencia con la que las observaciones de cada grupo aparecen juntas; si el valor de la distancia es cercano 1, el grado de disimilitud entre los conjuntos palinológicos es mayor.

Núm. 60: 245-262 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

RESULTADOS

Tipos de vegetación

En ambas localidades se determinó la presencia de geoecosistemas del tipo vegetación secundaria, bajo usos agropecuarios y otras coberturas de suelo: Agricultura de ladera/barbechos (matorral y pastizal) (ALB), Agricultura de temporal (AT), Agricultura temporal y pastizal inducido (ATPI), Agricultura en riberas y zonas inundables (ARZI), Matorral-Pastizal Secundario en laderas / suelo regosol-litosol (MPSec1) y Matorral con Pastizal Secundario en suelos forestales (MPSec2), esta última exclusiva de San Miguel. Así como geoecosistemas de cobertura vegetal, los cuales fueron: Bosque de Encino-Caducifolio (BEC), Bosque Mesófilo de Montaña (BMM), Bosque Mixto de Encino-Latifoliadas (BMEL), Bosque Mixto de Pino-Latifoliadas (BMPL), Bosque de Pino-Encino (BPE), Selva Mediana Subcaducifolia (SMSC). Exclusivamente en San Miguel se determinaron: Bosque Mixto de Coníferas y Latifoliadas (BMCL), Bosque Pino-Encino-Oyamel (BPEO) y Bosque Pino Montano Alto (BPMA) (Figura 2).

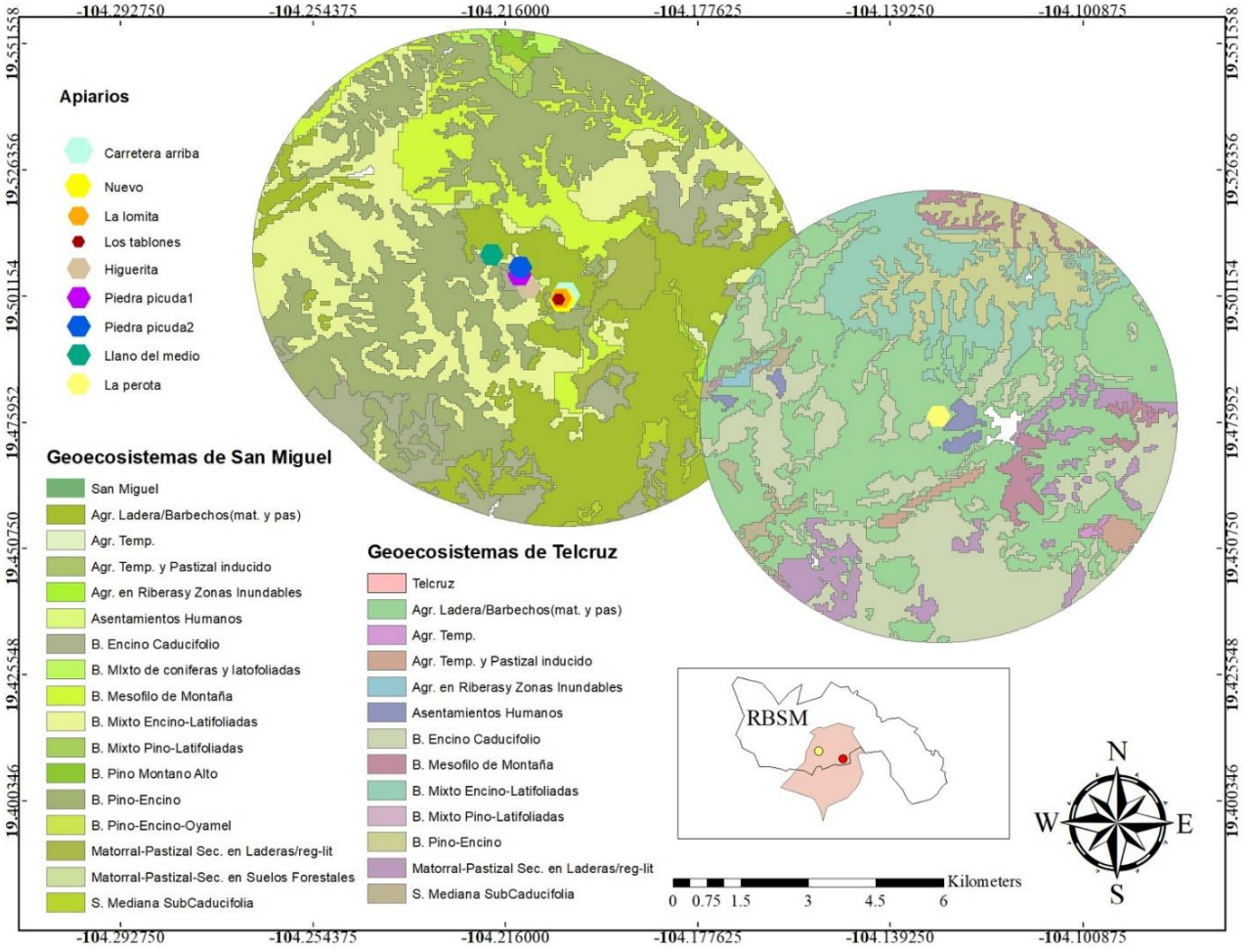


Figura 2. Geoecosistemas circundantes en un radio de 5 Km desde los apiarios de San Miguel y Telcruz (Jardel Peláez *et al.*, 2013), en el Ejido de Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México.
Figure 2. Surrounding geoecosystems within a 5 km radius from Telcruz and San Miguel apiaries (Jardel Peláez *et al.*, 2013), in Ejido de Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México.

Núm. 60: 245-262 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Determinación y clasificación de tipos polínicos

Se registraron 60 tipos polínicos en total, de los cuales se determinaron 13 a nivel de familia, dos a nivel de tribu, 25 a nivel de género y ocho con afinidad a género; 12 tipos polínicos se clasificaron como indeterminados, ya que no se logró asignarles una categoría taxonómica (Anexo 1). Los tipos polínicos se distribuyeron en 24 familias botánicas, de las cuales 10 estuvieron presentes en más del 52% de las muestras, estas fueron: Anacardiaceae (94%), Asteraceae (100%), Cucurbitaceae (71%), Fabaceae (94%), Lamiaceae (88%), Myrtaceae (77%), Onagraceae (94%), Rosaceae (77%), Rubiaceae (82%) y Scrophulariaceae (100%). La mayor riqueza de tipos polínicos se presentó en las familias Fabaceae con nueve taxones, seguido de Anacardiaceae, Asteraceae y Malvaceae, cada una con cuatro taxones.

Los tipos polínicos con mayor frecuencia de aparición fueron: *Bidens*, *Dalea*, *Fraxinus*, *Lopezia*, *Mimosa* tipo 1, *Mimosa* tipo 2, *Quercus* tipo 1, *Quercus* tipo 2, aff. *Rubus*, los cuales se encontraron en más del 85 % de las muestras de San Miguel (Figura 3, 4, 5). El polen del género *Styrax* se registró en las cosechas de 2019 de los apiarios La Parota y La Lomita.

De acuerdo con las clases de frecuencia establecidas para cada tipo polínico, *Styrax* fue el único clasificado como polen predominante en la muestra del apiario La Parota, el 7% de los tipos polínicos se clasificaron como polen secundario, el 25% como polen de menor importancia, el 21% como polen menor y el 46% como polen presente (Anexo 1).

Clasificación botánica de la miel

Los tipos polínicos utilizados para la clasificación de las mieles fueron aff. *Rubus*, *Bidens*, *Calyptranthes*, *Dalea*, *Lopezia*, *Mimosa* tipo 1, *Mimosa* tipo 2 y *Styrax* (Figura 4 y 5). El polen de *Fraxinus* y *Quercus*, se excluyó para establecer la clasificación. Estos últimos, se presentaron en porcentajes de 10 a 27% en todas las muestras de miel, por lo tanto, se clasificaron como polen raro a frecuente (Louveaux *et al*., 1970; SADER, 2020).

Las muestras obtenidas en la localidad de San Miguel en 2018 se clasificaron de la siguiente manera: una oligofloral de *Mimosa*, seis biflorales y una estrictamente multifloral. De las muestras de 2019, dos se clasificaron como biflorales, y seis como estrictamente multiflorales. En Telcruz, la miel de la cosecha de 2019 se clasificó como monofloral de *Styrax* (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de las mieles de la Sierra de Manantlán con base en su origen botánico.
Table 1. Classification of honeys from the Sierra de Manantlán based on their botanical origin.

Localidad	Apiario	Clasificación de la miel	
		Cosecha 2018	**Cosecha 2019**
San Miguel	Carretera Arriba	**Bifloral** *Mimosa* tipo 2 y *Lopezia*	**Bifloral** *Bidens* y aff. *Rubus*
	Nuevo	**Bifloral** *Bidens* y aff. *Rubus*	**Estrictamente multifloral** *Bidens*, *Dalea* y aff. *Rubus*
	La Lomita	**Oligofloral** *Mimosa* tipo 1 y *Mimosa* tipo 2	**Estrictamente multifloral** *Bidens*, *Dalea* y aff. *Rubus*
	Los Tablones	**Bifloral** *Bidens* y aff. *Rubus*	**Estrictamente multifloral** Dalea, aff. *Rubus* y Rubiaceae tipo 1
	La Higuerita	**Bifloral** *Bidens* y *Dalea*	**Bifloral** *Bidens* y aff. *Rubus*
	Piedra Picuda I	**Bifloral** *Dalea* y aff. *Rubus*	**Estrictamente multifloral**
	Piedra Picuda II	**Estrictamente multifloral** *Bidens*, *Dalea* y *Mimosa* tipo 1	**Estrictamente multifloral** *Bidens*, *Dalea*, *Mimosa* tipo 1 y aff. *Rubus*
	Llano del Medio	**Bifloral** *Bidens* y aff. *Rubus*	**Estrictamente multifloral** Tipo Ambrosiinae, *Bidens*, *Dalea*, y aff. *Rubus*
Telcruz	La Parota		**Monofloral** *Styrax*

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 245-262 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

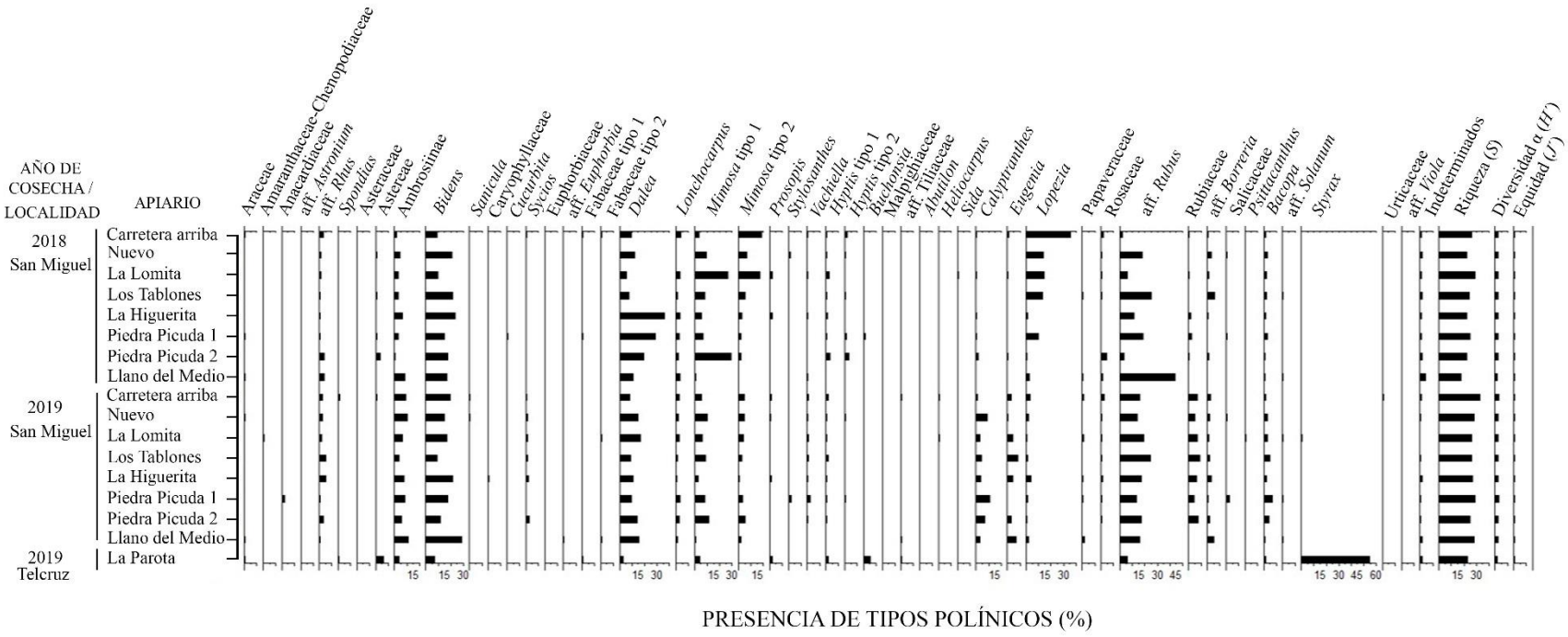


Figura 3. Frecuencias relativas del polen de los taxones presentes en la miel de San Miguel y Telcruz, Ejido de Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México.
Figure 3. Relative pollen frequencies of the taxa present in the honey of San Miguel and Telcruz, Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México.

Núm. 60: 00-00 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

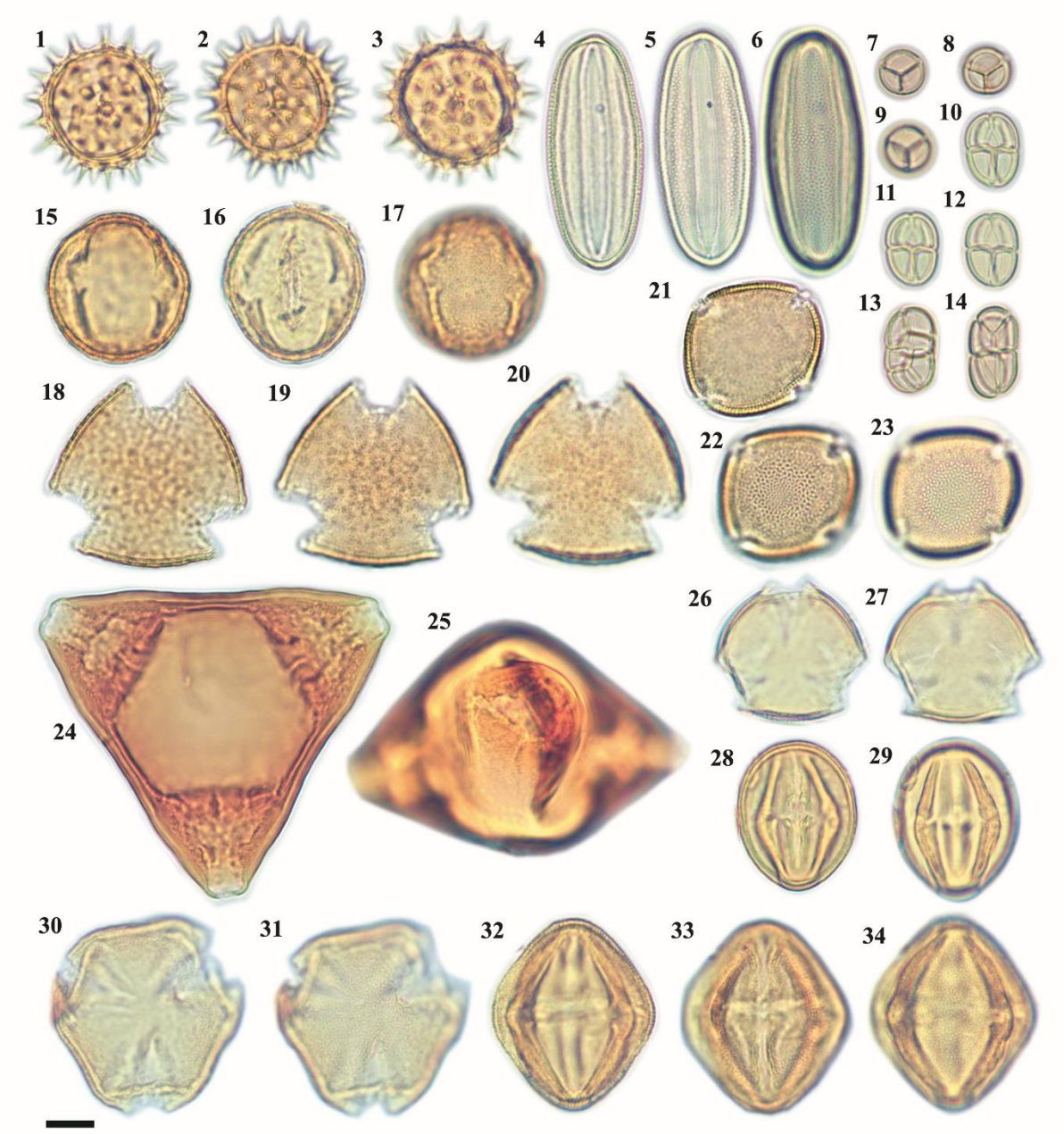


Figura 4. Microfotografías en microscopía de luz de los principales tipos polínicos utilizados para la clasificación de la miel de San Miguel y Telcruz, Ejido de Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México. ASTERACEAE: 1-3. *Bidens*; FABACEAE: 4-6. *Dalea,* 7-9. *Mimosa* tipo 1, 10-14. *Mimosa* tipo 2; FAGACEAE: 15-17. *Quercus* tipo 1, 18-20. *Quercus* tipo 2; OLEACEAE: 21-23. *Fraxinus*; ONAGRACEAE: 24-25. *Lopezia*; ROSACEAE: 26-29. aff. *Rubus*; STYRACACEAE: 30-34. *Styrax*; Escala 10 µm.

Figure 4. Light microscopy photomicrographs of the main pollen types used for the classification of honey from San Miguel and Telcruz, Ejido de Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México. ASTERACEAE: 1-3. *Bidens*; FABACEAE: 4-6. *Dalea,* 7-9. *Mimosa* tipo 1, 10-14. *Mimosa* tipo 2; FAGACEAE: 15-17. *Quercus* tipo 1, 18-20. *Quercus* tipo 2; OLEACEAE: 21-23. *Fraxinus*; ONAGRACEAE: 24-25. *Lopezia;* ROSACEAE: 26-29. aff. *Rubus*; STYRACACEAE: 30-34. *Styrax*.; Scale 10 µm.

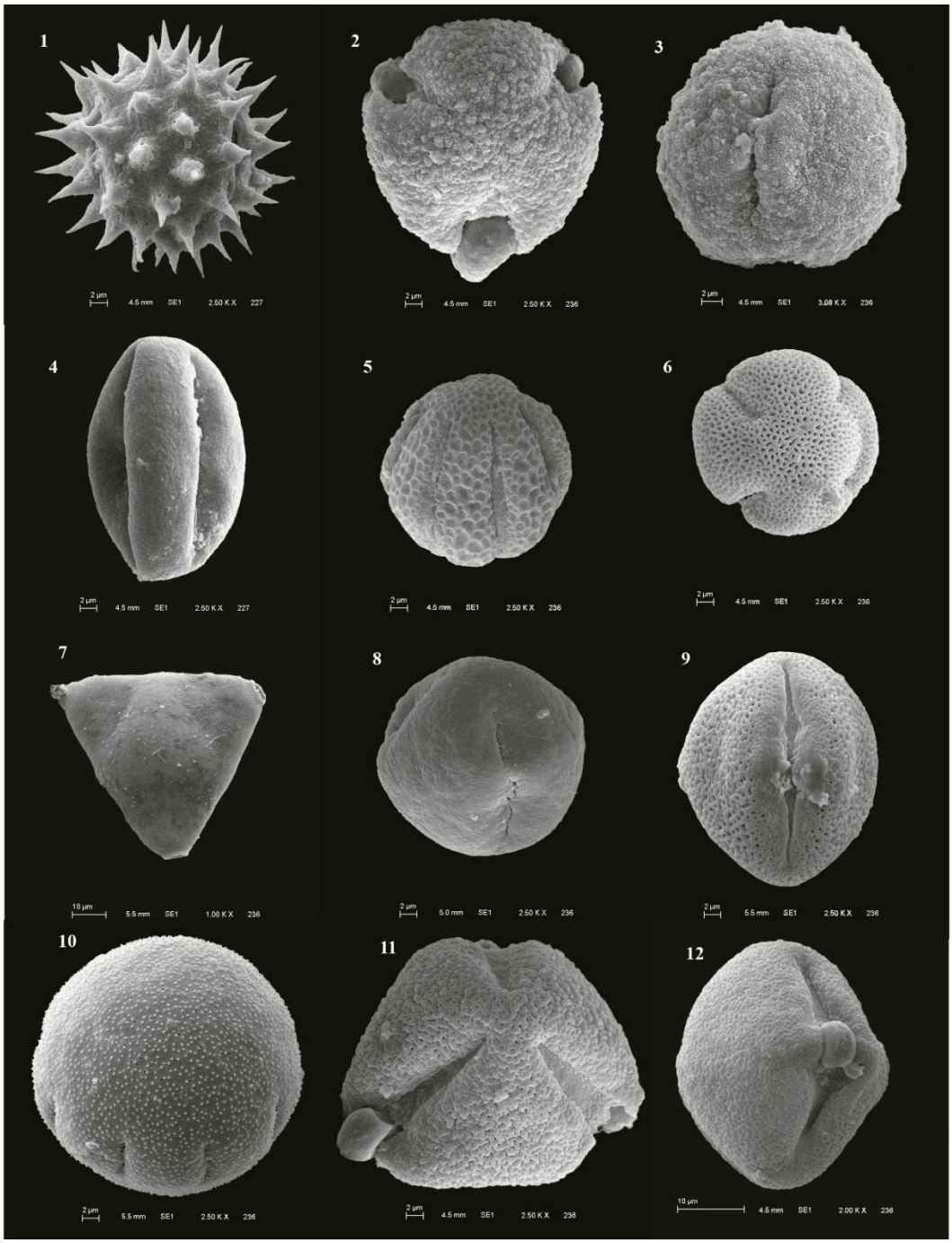


Figura 5. Electronmicrografías en MEB de los tipos polínicos encontrados en la miel de San Miguel y Telcruz, Ejido de Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, México. ASTERACEAE. 1. *Bidens*; FAGACEAE. 2-3. *Quercus* tipo 1, 4. *Quercus* tipo 2; LAMIACEAE. 5. Tipo Lamiaceae; OLEACEAE. 6. *Fraxinus*; ONAGRACEAE. 7. *Lopezia*; ROSACEAE. 8. aff. *Rubus*; RUBIACEAE. 9. *Borreria;* SCROPHULARIACEAE. 10. *Bacopa*. STYRACACEAE. 11-12. *Styrax*. Tomadas en alto vacío a 10.00 kV.

Figure 5. SEM electron micrographs of pollen types found in honey from San Miguel and Telcruz, Ejido de Ayotitlán, Cuautitlán de García Barragán, Jalisco, Mexico. ASTERACEAE. 1. *Bidens*; FAGACEAE. 2-3. *Quercus* tipo 1, 4. *Quercus* tipo 2; LAMIACEAE. 5. Tipo Lamiaceae; OLEACEAE. 6. *Fraxinus*; ONAGRACEAE. 7. *Lopezia*; ROSACEAE. 8. aff. *Rubus*; RUBIACEAE. 9. *Borreria;* SCROPHULARIACEAE. 10. *Bacopa*. STYRACACEAE. 11-12. *Styrax*. Tomadas en alto vacío a 10.00 kV.

Índices de diversidad biológica

La riqueza de taxones varió entre 18 y 33. La muestra que registró la mayor riqueza fue la del apiario Carretera Arriba de la cosecha 2019; la menor riqueza se obtuvo en el apiario Llano del Medio de la cosecha 2018. La diversidad α de Shannon-Weaver total fue de H'=2,8 con tendencia a una distribución uniforme por muestra (J'=0,69). La muestra con mayor diversidad correspondió al apiario Carretera Arriba de la cosecha de 2019, mientras que los apiarios con menor diversidad fueron Llano del Medio de la cosecha de 2018 y La Parota de 2019 (Figura 6; Anexo 1). El análisis de disimilitud indicó que el conjunto palinológico de la muestra de miel del apiario La Parota de 2019 de Telcruz, se diferenció del resto debido a que fue el único en el que se registró el género *Styrax* en porcentaje mayor a 45 (Figura 6). En las muestras de San Miguel el grado de disimilitud fue menor, ya que en ellas se mantuvo la presencia de polen de los géneros como *Bidens, Dalea, Lopezia, Mimosa* y *Rubus,* principalmente (Figura 6).

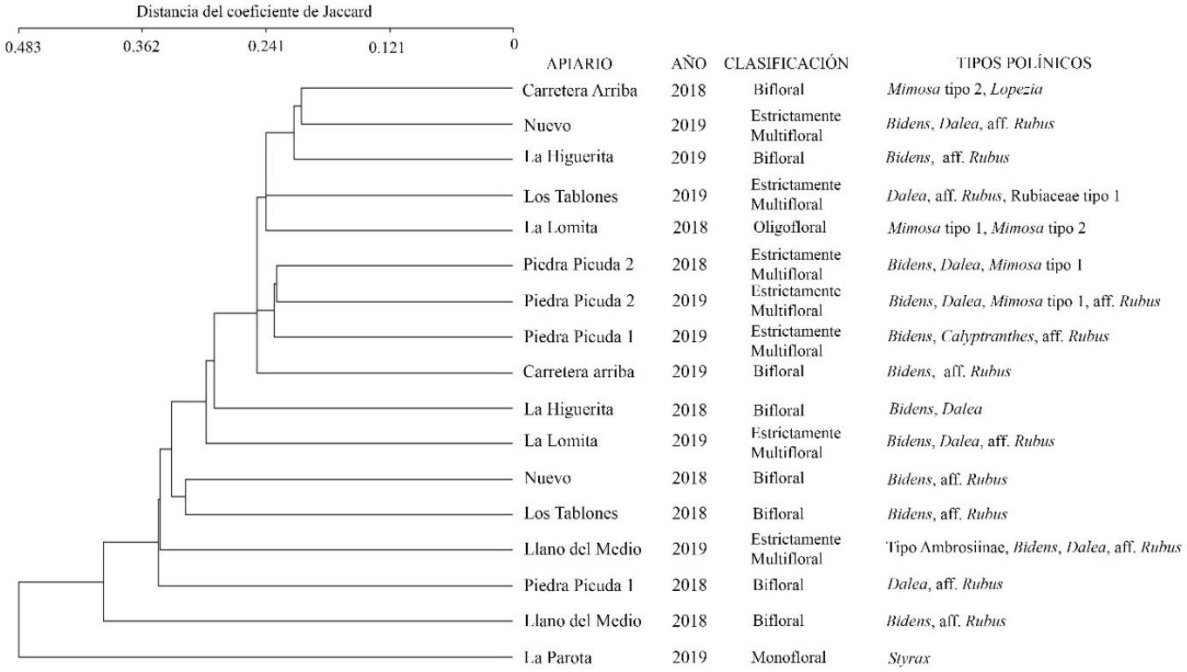


Figura 6. Dendrograma de disimilitud con base en la distancia del coeficiente de Jaccard. Mayor disimilitud en los conjuntos de las ramas con nodos más cercanos a valor de 1. Se presenta los años de la cosecha de miel en cada apiario, su clasificación de acuerdo con su origen botánico, y los tipos polínicos que se tomaron en cuenta para la clasificación.

Figure 6. Dissimilarity dendrogram based on Jaccard distance. Greater dissimilarity in the sets of branches with nodes closer to a value of 1. The years of honey harvest in each apiary are presented, their classification according to their botanical origin, and the pollen types that were taken into account for the classification.

DISCUSIÓN

Tipos de vegetación

Entre los geoecosistemas presentes en el área de pecoreo de *A. mellifera*, dominaron diferentes tipos de bosques, los cuales se caracterizaron por presentar especies arbóreas como *Fraxinus uhdei* Lingelsh., *Quercus* spp. y *Styrax* sp., entre otros (Jardel Peláez *et al.*, 2013; Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2003). Por lo tanto, coincide que estos tres géneros se encontraran representados en porcentajes significativos en la miel de San Miguel y Telcruz.

Por otro lado, con base en la literatura (Acosta Castellanos *et al*., 2011; Bello González, 2007; Cadena Rodríguez, 2018; De la Mora González, 1988; González Sandoval *et al*., 2016; Librado Carranza, 2016; Lorente Adame, 1992; Martínez-Virgen *et al*., 2020; Novoa Lara, 1994; Piedras Gutiérrez & Quiroz García, 2007; Quiroz García & Arreguín Sánchez, 2008; Ramírez-Arriaga *et al*., 2011, 2016; Rodriguez Jiménez *et al*., 2017; Román & Palma, 2007; Santana-Michel *et al*., 1998), en los tipos de vegetación circundantes a los apiarios se han registrado taxones vegetales que aportan recursos néctar-poliníferos a las abejas para la producción de miel y el sostenimiento de la colmena. En los geoecosistemas bajo uso agropecuario como ALB, AT, ATPI, MPSec1 y MPSec2, es posible registrar diversos taxones de las familias Asteraceae, Fabaceae y Lamiaceae; en el BEC, BPE, BMEL, BMPL y BMCL, se pueden encontrar *Baccharis*, *Begonia*, *Bidens*, *Croton*, *Eupatorium*, *Salvia* y *Senecio;* mientras que en la SMSC y en vegetación secundaria es posible registrar: *Bocconia*, *Bursera*, *Euphorbia*, *Ipomoea*, *Lantana*, *Mimosa*, *Senna*, *Solanum* y *Verbesina*.

Determinación y clasificación de tipos polínicos

Las familias mejor representadas en la miel de la RBSM, Asteraceae, Betulaceae, Fabaceae, Lamiaceae, Myrtaceae, Onagraceae, Rosaceae, Rubiaceae, Scrophulariaceae y Styracaceae, contienen especies que se han registrado como recursos importantes para la producción de miel de *A. mellifera* en diferentes estados de México (Acosta Castellanos *et al.*, 2011; Alaniz-Gutiérrez *et al*., 2017; Castellanos-Potenciano *et al*., 2012; Córdova-Córdova *et al*., 2013; González-Castillo *et al*., 2017; González Sandoval *et al*., 2016; Granados-Argüello *et al*., 2020; Piedras Gutiérrez & Quiroz García, 2007; Quiroz García & Arreguín Sánchez, 2008; Ramírez-Arriaga *et al*., 2016, 2011). De éstas, sobresalen Asteraceae y Fabaceae como las más diversas, abundantes y dominantes en estudios de origen botánico de miel y floras apícolas (Araujo-Mondragón & Redonda-Martínez, 2019; Bello González, 2007; Cadena Rodríguez, 2018; De la Mora González, 1988; Librado Carranza, 2016; Martínez-Virgen *et al*., 2020; Novoa Lara, 1994; Román & Palma, 2007; Santana-Michel *et al*., 1998), esto debido, en parte, a su diversidad morfológica y fenológica.

En el caso de las mieles de la RBSM destacó la presencia de los tipos polínicos de *Bidens* (Asteraceae), *Dalea* y *Mimosa* (Fabaceae), *Lopezia* (Onagraceae), aff. *Rubus* (Rosaceae) y *Styrax* (Styracaeceae). La mayoría de estos tipos polínicos se clasificaron como polen secundario (16-45%), lo cual reflejó el comportamiento poliléctico de las abejas (Piedras Gutiérrez & Quiroz García, 2007). El único tipo polínico que se clasificó como predominante (≥ 45%) fue el de *Styrax* en el apiario La Parota, de Telcruz. En este caso, en las especies que ocurren en la región no se ha registrado la presencia de nectarios florales; sin embargo, se menciona que son visitadas por las abejas (Carranza González, 1993; Gonsoulin, 1974) y, particularmente, en la especie *Styrax officinalis* subsp. *redivivus* (Torr.) Thorne*, A. mellifera* es uno de sus polinizadores y recolector de néctar y polen (Sugden, 1986), lo cual respalda la presencia de dicho género en esta muestra.

Clasificación botánica de la miel

La clasificación botánica de las mieles de la RBSM se basó en los tipos polínicos de géneros pertenecientes a las familias Asteraceae, Fabaceae, Rosaceae y Styracaceae. Se excluyeron de la clasificación los tipos polínicos pertenecientes a plantas anemófilas, en este caso *Fraxinus* y *Quercus*.

Los parámetros para la clasificación de las mieles mexicanas con base en su origen botánico se disponen en la NOM-004-SAG/GAN-2018 (SADER, 2020). Ésta, a su vez, retoma fundamentos establecidos en las normas internacionales (CAC, 2019), y en métodos de análisis estandarizados, principalmente, para mieles de origen europeo (Louveaux *et al.*, 1970; Von Der Ohe *et al*., 2004), en donde las condiciones de biodiversidad y estacionalidad climática son diferentes a las de México y, sobre todo, en un área categorizada como Reserva de la Biosfera, dónde se promueve la conservación biológica. Como consecuencia, la aplicación práctica de algunos de estos parámetros en las mieles mexicanas en ocasiones resulta ambigua.

Por ejemplo, la NOM-004-SAG/GAN-2018 (SADER, 2020) especifica que el polen de plantas anemófilas y sin nectarios deben excluirse cuando se calculan los porcentajes de presencia, ya

que este se considera como polen sobrerrepresentado. La sobrerrepresentación de los granos de polen es una variable dificil de estimar, ya que existe una carencia de estudios que establezcan los intervalos de los porcentajes de presencia de este tipo de polen, en particular, para las plantas que componen los tipos de vegetación de México.
En las muestras de miel de la RBSM, el polen de *Fraxinus* y *Quercus*, se registró en porcentajes entre 1 a 40% y 7 a 27%, respectivamente. Algunos autores han documentado que estos tipos polínicos son recursos poliníferos importantes (Chamorro García *et al.*, 2013; Giovanetti & Aronne, 2011; Romero-Rangel & Rojas-Zenteno, 2019; Wallander, 2012), es decir, estos no proveen néctar floral como recompensa a las abejas, pero sí polen como alimento. Ambos géneros, son componentes dominantes de los tipos de vegetación registrados en las áreas circundantes a los apiarios (BEC, BMM, BMEL, BPE). Esto plantea una disyuntiva entre si estos tipos polínicos, en particular, deben considerarse como sobrerrepresentados y excluirse para la clasificación de la miel, o bien, reconocer su importancia como recurso polinífero que las abejas buscan intencionadamente como fuente de proteína y, por lo tanto, tomarse en cuenta para la clasificación.

Diversidad biológica
Abordar el origen botánico de la miel, conlleva conocer la riqueza polínica de ésta, lo cual generalmente, se hace de forma cualitativa a través de la identificación de los tipos polínicos y determinación taxonómica de los mismos. Algunos estudios han considerado la estimación de índices de diversidad α (Castellanos-Potenciano *et al*., 2012; Piedras Gutiérrez & Quiroz García, 2007; Ramírez-Arriaga *et al*., 2011), como una herramienta para explicar la relación ecológica entre la vegetación y el producto forestal no maderable que generan las prácticas apícolas (Chamorro García *et al*., 2013), e incluso, para explicar el comportamiento mismo de las abejas.
La diversidad α de taxones reflejado con el índice de Shannon-Weaver (H'), asociado a la tendencia de uniformidad del índice de Pielou (J'), mostró una correspondencia con el comportamiento de pecoreo poliléctico registrado previamente sobre *A. mellifera* (Piedras Gutiérrez & Quiroz García, 2007). Lo anterior indicó que la riqueza de taxones presentes en las muestras de la RBSM, no es muy diferente a lo que, en promedio, se registró en otros estudios de miel (Alaniz-Gutiérrez *et al.*, 2017; González-Castillo *et al*., 2017; Granados-Argüello *et al*., 2020; Piedras Gutiérrez & Quiroz García, 2007; Quiroz García & Arreguín Sánchez, 2008; Ramírez-Arriaga *et al*., 2016).
El análisis de disimilitud mostró una clara diferencia entre contenido polínico de la miel de San Miguel y Telcruz. Sin embargo, algunos conjuntos de polen de las muestras de los apiarios de San Miguel fueron muy similares entre sí, pero muy variables en términos de abundancia de cada uno de los tipos polínicos dominantes en los diferentes años de cosecha, lo que podría reflejar cambios en: 1) los períodos de floración de las plantas, 2) la disponibilidad de recursos para las abejas y, 3) el comportamiento de pecoreo de *A. mellifera*.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indicaron que el origen botánico de las mieles de las localidades de San Miguel y Telcruz fue diferente. En la miel de los apiarios de San Miguel se registraron mieles, biflorales, oligoflorales y multiflorales; mientras que en Telcruz, la miel fue monofloral. En los apiarios de San Miguel, la composición de los conjuntos palinológicos de las muestras de la cosecha de 2018 fue similar con respecto a las muestras de 2019. Sin embargo, la abundancia de cada tipo polínico varió de un año para otro, lo que influyó en la clasificación botánica de las mieles. La riqueza y diversidad de tipos polínicos registrada en las mieles reflejó el hábito de pecoreo poliléctico de las abejas. Destacó la presencia de taxones como *Bidens, Dalea, Lopezia, Mimosa*, aff. *Rubus* y *Styrax,* como los principales recursos néctar poliníferos para la elaboración de la miel. Es necesario realizar estudios para determinar los intervalos de presencia de polen de *Fraxinus* y *Quercus*, para definir si se trata de polen sobrerrepresentado, o si es un recurso que las abejas buscan debido a su abundancia en la zona.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de posgrado para la primera autora, y el financiamiento del Programa Investigadoras e Investigadores por México (Proyecto No. 654) para la autora de correspondencia, así como al Colegio de Postgraduados. Al personal de la RBSM, al director Biól. Fernando Gavito, por el apoyo y facilidades otorgadas para realizar este trabajo; a Oscar Sánchez, técnico de operativo, por su apoyo en la coordinación y trabajo de campo. Al señor Guadalupe Flores y a los miembros de la cooperativa Nekutli, en la localidad de San Miguel y al señor Miguel Virgen y su familia, de la localidad de Telcruz, por su disposición y colaboración al proporcionar las muestras de miel para este estudio. A M. en C. Ana Lucía Tovar-Álvarez, por la obtención de imágenes en el microscopio electrónico de barrido del LANIVEG-QRO, UAQ. A los editores y árbitros anónimos de Polibotánica por sus comentarios y sugerencias para mejorar el análisis de los resultados y la redacción del manuscrito.

LITERATURA CITADA

Abdulrahaman, A. A., Solomon, O. R., Adeyemi, S. B., Liadi, M. T., Ahmed, R. N., Belewu, M. A., & Oladele, F. (2013). Melisopalynological Analysis of Honey Samples from *Jatropha* Plantation and Unilorin Apiary Farm. *International Journal of Phytofuels and Allied Sciences*, *2*(1), 81–92.

Acosta Castellanos, S., Quiroz García, L., Arreguín Sánchez, M. L., & Fernández Nava, R. (2011). Análisis polínico de tres muestras de miel de Zacatecas, México. *Polibotánica*, *32*, 179–191.

Alaniz-Gutiérrez, L. A., Ail-Catzim, C. E., Villanueva-Gutiérrez, R., Delgadillo-Rodríguez, J., Ortíz-Acosta, M. E., García-Moya, E., & Medina Cervantes, T. S. (2017). Caracterización palinológica de mieles del Valle de Mexicali, Baja California, México. *Polibotánica*, *0*(43), 255–283. https://doi.org/10.18387/polibotanica.43.12

Alfaro Bates, R. G., González Acereto, J. A., Ortiz Díaz, J. J., Viera Castro, F. A., Burgos Pérez, A. I., Martínez Hernández, E., & Ramírez Arriaga, E. (2010). *Caracterización palinológica de las mieles de la península de Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Mérida, Yucatán, México.

Araujo-Mondragón, F., & Redonda-Martínez, R. (2019). Flora melífera de la región centro-este del municipio de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Acta Botanica Mexicana*, *126: e1444*, 1–20. https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1444

Bello González, M. A. (2007). Planta meliferas silvestres de la sierra Purépecha, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *32*(102), 103–126.

CAC, C. A. C. (2019). Norma para la miel. CXS 12-1981. In *Normas Internacionales de los Alimentos* (p. 8). Organizaicón de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura & Organización Mundial de la Salud.

Cadena Rodríguez, Y. J. (2018). *Estimación de sitios ambientalmente idóneos para la ubicación de apiarios en dos cuencas de Michoacán*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.

Campos-Trujillo, A., Aguirre-Prieto, A., Muñoz-Romero, G., Rodríguez-Villa, M. A., & Quintana-Martínez, G. (2015). Estudio palinológico de la flora urbana de la Ciudad de Chihuahua, México. *Acta Botánica Mexicana*, *113*, 111–134.

Carranza González, E. (1993). Styracaceae. *Flora Del Bajío y de Regiones Adyacentes, Fascículo 21*, 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07257-8_45

Castañón Chavarría, L. E. de J. (2009). *Mieles diferenciadas de la Península de Yucatán y su mercado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad Corredor Biológico Mesoamericano México. www.cbmm.gob.mx

Castellanos-Potenciano, B. P., Ramírez Arriaga, E., & Zaldivar-Cruz, J. M. (2012). Análisis del contenido polínico de mieles producidas por *Apis mellifera* L. (Hymenoptera: Apidae)

en el estado de Tabasco, México. *Acta Zoológica Mexicana*, *28*(1), 13–36. https://doi.org/10.21829/azm.2012.281813

Castillo Cázares, A. V., Moguel Ordóñez, Y. B., Cortés Cruz, M. A., Espinosa Huerta, E., Arechavaleta Velasco, M. E., & Mora Avilés, M. A. (2016). Composición botánica de mieles de la península de Yucatán mediante qPCR y análisis de curvas de disociación. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, *7*(4), 489–505. https://doi.org/10.22319/rmcp.v7i4.4278

Chamorro García, F. J., León Bonilla, D., & Nates-Parra, G. (2013). El polen apícola como producto forestal no maderable en la Cordillera Oriental de Colombia. *Colombia Forestal*, *16*(1), 53–66. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2013.1.a04

Contreras-Escareño, F., Pérez Armendáriz, B. P., Echazarreta, C. M., Cavazos Arroyo, J. C., Macías-Macías, J. O., & Tapia-González, J. M. (2013). Características y situación actual de la apicultura en las regiones Sur y Sureste de Jalisco, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, *4*(3), 387–398.

Córdova-Córdova, C. I., Ramírez-Arriaga, E., Martínez-Hernández, E., & Zaldívar-Cruz, J. M. (2013). Caracterización botánica de miel de abeja (*Apis mellifera* L.) de cuatro regiones del estado de Tabasco. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, *29*(1), 163–178.

De Klerk, P., & Joosten, H. (2007). The difference between pollen types and plant taxa: A plea for clarity and scientific freedom. *Eiszeitalter und Gegenwart Quaternary Science Journal*, *56*(3), 162–171. https://doi.org/10.3285/eg.56.3.02

De la Mora González, C. H. (1988). *Flora de Utilidad Apícola en Jalisco*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara.

Durán, R. C., Martínez Hernández, E., & Jiménez Ramírez, J. (2000). Morfología del polen y distribución de *Lopezia longiflora* (Onagraceae). *Anales Del Insituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*, *71*(2), 73–80.

Giovanetti, M., & Aronne, G. (2011). Honey bee interest in flowers with anemophilous characteristics: First notes on handling time and routine on *Fraxinus ornus* and *Castanea sativa*. *Bulletin of Insectology*, *64*(1), 77–82.

Gonsoulin, G. J. (1974). A revision of *Styrax* (STYRACACEAE) in the North America, Central America, and the Caribbean. *SIDA Contribution to Botany*, *5*(4), 191–258. https://doi.org/10.2307/1223953

González-Castillo, M. P., Ramírez-Noya, D., Acosta-Castellanos, S., Rosales-Castro, M., & Alvarado-Aguilar, S. J. (2017). Caracterización palinológica de miel colectada por *Apis mellifera* Linnaeus (Hymenoptera: Apidae) en tres localidades del municipio de Durango, Dgo., México. *Entomología Mexicana*, *4*, 79–83.

González Sandoval, R., Catalán Heverástico, C., Dominguez Márquez, V. M., Luna León, C., Hernández Castro, E., Damián Nava, A., Cruz Lagunas, B., & Albrto Palemón, F. (2016). Análisis palinológico de los recursos florales utilizados por *Apis mellifera* L. (Hymenoptera:Apidae) en cuatro municipios del estado de Guerrero, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *19*(1), 19–28.

Granados-Argüello, R. I., Villanueva-Gutiérrez, R., Martínez-Hernández, E., García Mayoral, L. E., & González de la Torre, J. E. (2020). Análisis melisopalinológico de mieles de *Apis mellifera* L. en la zona centro de Veracruz, México. *Polibotánica*, *50*, 147–163. https://doi.org/10.18387/polibotanica.50.11

Grimm, E. (2011). *Tilia Software (Versión 2.0.41)*. Illinois State Museum.

Hebda, R. J., & Chinnappa, C. C. (1990). Studies on pollen morphology of Rosaceae in Canada. *Review of Palaeobotany and Palynology*, *64*(1–4), 103–108. https://doi.org/10.1016/0034-6667(90)90123-Z

Hesse, M., Halbritter, H., Zetter, R., Weber, M., Buchner, R., Frosch-Radivo, A., & Ulrich, S. (2009). *Pollen terminology. An illustrated handbook*. Australia: Springer Wien. New York, USA.

INECOL, Instituto Nacional de Ecología (2000). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, Mexico. In *Instituto Nacional de Ecología*. SEMARNAP.

Jaccard, P. (1901). Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et du Jura. *Bulletin de La Société Vaudoise Des Sciences Naturelles*, *37*(142), 547–579.

Jardel Peláez, E. J., Vélica Zúñiga, G., Balcázar Medina, O. E., Cuevas Guzmán, R., Santana Castellón, E., & Martínez Rivera, L. M. (2013). *Determinación de la Subzonificación de la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlan*. Universidad de Guadalajara, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Jalisco, México.

Librado Carranza, G. (2016). Plantas nectaríferas y poliníferas en la Costa Chica de Guerrero y municipios aledaños de Oaxaca. *Tlamati Sabiduría*, *7*(2).

Lorente Adame, M. P. (1992). *Plantas de importancia apícola en tres localidades de la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlan, Jalisco, México*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara.

Louveaux, J., Maurizio, A., & Vorwohl, G. (1970). Methods of Melissopalynology. *Bee World*, *59*, 139–157. https://doi.org/10.1080/0005772x.1978.11097714

Magurran, A. E. (1988). *Ecological Diversity and its Measurement*. Springer-Science+Business Media, B. V. https://doi.org/10.16309/j.cnki.issn.1007-1776.2003.03.004

Martínez-Hernández, E. (1970). *Estudio palinológico de las especies dominantes de la vegetación de los alrededores de la Laguna Madre, Tamaulipas, México*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de México.

Martínez-Virgen, M., Ulloa-Castañeda, R., Salgado-Moreno, S., Carmona-Gasca, C., Orozco-Benitez, G., & Martínez-González, S. (2020). Estudio geográfico e identificación de plantas con potencial apícola en Nayarit, México. *Abanico Agroforestal*, *2*, 1–9.

Medina-Acosta, M., Grether, R., Martínez-Bernal, A., & Ramírez-Arriaga, E. (2019). Comparative study of pollen morphology and exine ultrastructure in tetrads, octads and polyads of the genus *Mimosa* (Leguminosae). *Palynology*, *43*(2), 188–212. https://doi.org/10.1080/01916122.2018.1446470

Montes Tubio, F., Río, M., & Cañellas Rey de Viñas, I. (2003). Revisión: índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, *12*(1), 159–176. https://doi.org/10.5424/795

Morrone, J. J. (2005). Hacia una síntesis biogeográfica de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *76*(002), 207–252. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2005.002.303

Morton, C. M., & Dickison, W. C. (1992). Comparative pollen morphology of the Styracaceae. *Grana*, *31*(1), 1–15. https://doi.org/10.1080/00173139209427822

Novoa Lara, C. P. (1994). *Flora de importancia apícola de Cofradía del Rosario, municipio de Amacueca, Jalisco, México*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara.

Palacios-Chávez, R., Ludlow-Wiechers, B., & Villanueva G., R. (1991). *Flora palinológica de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka´an, Quintana Roo* (pp. 1–321). Chetumal, Quintana Roo, México: Centro de Investigaciones de Quintana Roo.

Panahi, P., Pourmajidian, M. R., Fallah, A., & Pourhashemi, M. (2012). Pollen morphology of *Quercus* (subgenus *Quercus*, section Quercus) in Iran and its systematic implication. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, *81*(1), 33–41. https://doi.org/10.5586/asbp.2012.005

Piedras Gutiérrez, B., & Quiroz García, D. L. (2007). Estudio melisopalinológico de dos mieles de la porción sur del Valle de México. *Polibotánica*, *23*, 57–75.

Pielou, E. (1975). *Ecological Diversity*. John Wiley & Sons. New York, USA.

Quiroz García, D., & Arreguín Sánchez, M. (2008). Determinación palinológica de los recursos florales utilizados por *Apis mellifera* L. (Hymenoptera: Apidae) en el estado de Morelos, México. *Polibotánica*, *26*, 159–173.

Ramírez-Arriaga, E., Martínez-Bernal, A., Maldonado, N. R., & Martínez-Hernández, E. (2016). Análisis palinológico de mieles y cargas de polen de *Apis mellifera* (APIDAE) de la región centro y norte del estado de Guerrero, Mexico. *Botanical Sciences*, *94*(1), 141–156. https://doi.org/10.17129/botsci.217

Ramírez-Arriaga, E., Navarro-Calvo, L. A., & Díaz-Carbajal, E. (2011). Botanical characterisation of Mexican honeys from a subtropical region (Oaxaca) based on pollen analysis. *Grana*, *50*(1), 40–54. https://doi.org/10.1080/00173134.2010.537767

Ramos-Díaz, A., San Román-Ávila, D., Noriega-Trejo, R., Góngora-Chim, R., Sánchez-Contreras, A., & Rodríguez-Buenfil, I. (2015). *Catálogo de los principales tipos polinicos encontrados en las mieles producidas en la península de Yucatán-*. Secretaría

Recibido:
28/agosto/2024

Aceptado:
4/junio/2025

de Investigación, Innovación y Educación Superior (SIIES), Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ), Centro de Estudios de Desarrollo Sustentable y de Aprovechamiento de la Vida Silvestre (CEDES.

Rodriguez Jiménez, N. E., López Muraira, I. G., Andrade Gonzalez, I., & Gómez Leyva, J. F. (2017). Maleza de la familia Asteraceae de importancia apícola en Jalisco. In *XXXVIII Congreso Mexicano de la Ciencia de la Maleza XLII Simposium Nacional de Parasitología Agrícola (IAP) 3a*. SOMECIMA. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, American Society of Agronomy, Certified Crop Adviser. p 14-17.

Román, L., & Palma, J. (2007). Árboles y arbustos tropicales nativos productores de néctar y polen en el estado de Colima, México. *Avances En Investigación Agropecuaria*, *11*(3), 3–24.

Romero-Rangel, S., & Rojas-Zenteno, E. C. (2019). Aspectos taxonómicos de la morgología floral masculina de *Quercus* (Fagaceae) en México. *Polibotánica*, *48(24)*, 13–27. https://doi.org/10.18387/polibotanica.48.2

Roubik, D. W., & Moreno, P. J. E. (1992). *Pollen and spores of Barro Colorado Island.* Missouri Botanical Garden. Kew Bulletin. 47(4):791.

SADER, Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). *Norma Oficial Mexicana NOM-004-SAG/GAN-2018, Producción de miel y especificaciones*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5592435&fecha=29/04/2020#gsc.tab=0

Sánchez-Rodríguez, E. V., López-Mata, L., García-Moya, E., & Cuevas-Guzmán, R. (2003). Estructura, composición florística y diversidad de especies leñosas de un bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, Jalisco. *Boletin de La Sociedad Botánica de México*, *73*, 17–24. https://doi.org/10.17129/botsci.1676

Sánchez, A. C., & Lupo, L. C. (2011). Origen botánico y geográfico de las mieles de El Fuerte, Departamento de Santa Bárbara, Jujuy, Argentina. *Boletin de La Sociedad Argentina de Botánica*, *46*(1–2), 105–112.

Santana-Michel, F. J., Cervantes-Aceves, N., & Jiménez-Reyes, N. (1998). Flora melifera del Estado de Colima, México. *Boletín IBUG*, *6*(2–3), 251–277.

Seaby, R., & Henderson, P. (2007). *Species Diversity and Richness IV*. Pisces Conservation Ltd.

Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell Sys Techl J*, *27*, 379–423.

SIAP, S. de I. A. y P. (2021). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Comparativo de Avance. Miel.* http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecCompaEspProd.jsp

Skvarla, J. J., & Larson, D. A. (1965). An Electron Microscopic Study of Pollen Morphology in the Compositae with Special Reference to the Ambrosiinae. *Grana Palynologica*, *6*(2), 210–269. https://doi.org/10.1080/00173136509429147

Sugden, E. A. (1986). Anthecology and Pollinator Efficacy of *Styrax officinale* Subsp. *redivivum* (Styracaceae). *American Journal of Botany*, *73*(6), 919–930. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1986.tb12132.x

Tetreault, D. V., & Lucio López, C. F. (2011). Diversidad biocultural en el estado de Jalisco: Pueblos indígenas y regiones de alto valor biológico. *Espiral (Guadalajara)*, *18*(51), 165–199.

Vázquez, J. A., Cuevas, G. R., Cochrane, T. S., Iltis, H. H., Santana, M. F., & Guzmán, H. L. (1995). *Flora de Manantlan* (No. 13). Fort Worth, Texas, USA: Sida Botanical Miscellany.

Von Der Ohe, W., Oddo, L. P., Piana, M. L., Morlot, M., & Martin, P. (2004). Harmonized methods of melissopalynology. *Apidologie*, *35* (Suppl. 1), S18–S25. https://doi.org/10.1051/apido:2004050

Wallander, E. (2012). Systematics and floral evolution in *Fraxinus* (Oleaceae). *Belgische Dendrologie Belge*, 39–58.

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

EFECTO DE COMPLEJOS ORGÁNICOS EN LA MICROPROPAGACIÓN DE *Phalaenopsis* var. *Dudu*

EFFECT OF ORGANIC COMPLEXES ON MICROPROPAGATION OF *Phalaenopsis* var. *Dudu*

Arzate Fernández, A.M., S. Martínez Martínez, T. Norman Mondragón, M. Mariezcurrena Berazain, A. Piña Sampedreño

EFECTO DE COMPLEJOS ORGÁNICOS EN LA MICROPROPAGACIÓN DE *Phalaenopsis* var. *Dudu*

EFFECT OF ORGANIC COMPLEXES ON MICROPROPAGATION OF *Phalaenopsis* var. *Dudu*

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 263-272 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.15

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 263-272 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Efecto de complejos orgánicos en la micropropagación de *Phalaenopsis* var. *Dudu*

Effect of organic complexes on micropropagation of *Phalaenopsis* var. *Dudu*

Amaury M. Arzate-Fernández / amaury1963@yahoo.com.mx
Sandra Y. Martínez-Martínez
Tomás H. Norman-Mondragón
María D. Mariezcurrena-Berazain
Arely Piña-Sampedreño
Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma del Estado México (UAEMéx), Carretera Toluca-Ixtlahuaca Km 11.5, 50200, Toluca, México

Arzate Fernández, A.M., S. Martínez Martínez, T. Norman Mondragón, M. Mariezcurrena Berazain, A. Piña Sampedreño

EFECTO DE COMPLEJOS ORGÁNICOS EN LA MICROPROPAGACIÓN DE *Phalaenopsis* var. *Dudu*

EFFECT OF ORGANIC COMPLEXES ON MICROPROPAGATION OF *Phalaenopsis* var. *Dudu*

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 263-272. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.15

RESUMEN: Las especies de *Phalaenopsis*, pertenecientes a la familia Orchidaceae, son plantas ornamentales populares en todo el mundo por su elegante apariencia y prolongada longevidad, lo que las convierte en un recurso de gran importancia económica para la industria floral. Por lo tanto, resulta fundamental desarrollar protocolos eficientes para la micropropagación tanto de estas especies como del género en su conjunto. Tradicionalmente, la adición de auxinas y citocininas ha sido el método utilizado para regular el crecimiento y desarrollo de tejidos vegetales, aunque su uso puede resultar costoso. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de las heces del escarabajo del maní (HEM), agua de coco (AC) y pulque (PUL) en la proliferación de cuerpos similares a protocormos (PLBs, por sus siglas en inglés) y en la regeneración de plantas de *Phalaenopsis* var. *Dudu*. Como explantes se utilizaron clústers de cinco PLBs, con un arreglo trifactorial (5x2x2) que incluyó los siguientes niveles: factor A con cinco niveles (0, 2.5, 5.0, 7.5, y 10 g L^{-1} de HEM), factor B con dos niveles (0 y 100 mL L^{-1} AC), y factor C con dos niveles (0 y 10 mL L^{-1} PUL). El mayor número de PLBs (22.2) se obtuvo en el tratamiento con 7.5 g L^{-1} de HEM y 100 mL L^{-1} de AC, mientras que el mayor número de plantas regeneradas (5.3) se logró en el tratamiento sin adición de sustitutos orgánicos, seguido por el tratamiento con 7.5 g L^{-1} de HEM y 100 mL L^{-1} de AC (3.7). Estos resultados sugieren que la combinación de heces del escarabajo del maní y agua de coco favorece la proliferación de PLBs en *Phalaenopsis* var. *Dudu*.
Palabras clave: *Phalaenopsis*; propagación; *Ulomoides dermestoides*; antioxidantes.

ABSTRACT: *Phalaenopsis* species, belonging to the Orchidaceae family, are popular ornamental plants worldwide due to their elegant appearance and long lifespan, making them a resource of great economic importance for the floral industry. Therefore, it is essential to develop efficient protocols for the micropropagation of both these species and the genus as a whole. Traditionally, the addition of auxins and cytokinins has been the method used to regulate the growth and development of plant tissues, although their use can be expensive. In this context, the aim of this work was to evaluate the effect of peanut beetle feces (HEM), coconut water (AC), and pulque (PUL) on the proliferation of protocorm-like bodies (PLBs) and on the regeneration of *Phalaenopsis* var. *Dudu* plants. Clusters of five PLBs were used as explants, with a trifactorial arrangement (5x2x2) that included the following levels: factor A with five levels (0, 2.5, 5.0, 7.5, and 10 g L^{-1} of HEM), factor B with two levels (0- and 100-mL L^{-1} AC), and factor C with two levels (0- and 10-mL L^{-1} PUL). The highest number of PLBs (22.2) was obtained in the treatment with 7.5 g L^{-1} of HEM and 100 mL L^{-1} of AC, while the highest number of regenerated plants (5.3) was achieved in the treatment without the addition of organic substitutes, followed by the treatment with 7.5 g L^{-1} of HEM and 100 mL L^{-1} of AC (3.7).

These results suggest that the combination of peanut beetle feces and coconut water favors the proliferation of PLBs in *Phalaenopsis* var. *Dudu*.
Key words: *Phalaenopsis*; propagation; *Ulomoides dermestoides*; antioxidants.

INTRODUCCIÓN

Orchidaceae es una de las familias de plantas más grandes, con entre 22,075 y 26,567 especies distribuidas en 880 géneros, destacándose por su diversidad en estrategias reproductivas y adaptaciones ecológicas especializadas. Las especies del género *Phalaenopsis* son especialmente populares como plantas ornamentales en todo el mundo, apreciadas por su elegante apariencia y prolongada longevidad, lo que les confiere una gran importancia económica en la industria floral (Khatun *et al.*, 2020).

En 2019, la importación global de flores cortadas alcanzó los 8.490 millones de dólares, una caída del 6,1% respecto al año anterior, pero con un crecimiento promedio anual del 3,0% entre 2015 y 2019. Las importaciones de orquídeas cortadas representaron 214 millones de dólares (2,5% del total), disminuyendo un 13,5% desde 2018 y con un descenso anual promedio del 1,4% en los últimos cinco años (Yuan *et al.*, 2021).

Como planta monopodial, *Phalaenopsis* se propaga tradicionalmente mediante el corte o la división de retoños; sin embargo, estos métodos resultan en una baja tasa de multiplicación. Además, la propagación vegetativa de esta especie es difícil y requiere al menos tres años para florecer bajo condiciones de invernadero, lo que representa un desafío en su producción comercial (Khatun *et al.*, 2020). Por ello, el cultivo de tejidos ha surgido como una herramienta alternativa y eficiente para su propagación. Mediante este método, *Phalaenopsis* puede multiplicarse rápidamente a través de la formación de cuerpos similares a protocormos (PLBs, por sus siglas en inglés) a partir de explantes, en lugar de regenerarse directamente.

La formulación de medios de cultivo es crucial para optimizar el vigor de las orquídeas en el cultivo de tejidos (Samala & Thipwong, 2023). Tradicionalmente, la adición de auxinas y citocininas ha sido una práctica común para regular el crecimiento y desarrollo de tejidos vegetales. No obstante, debido al alto costo de estos compuestos tradicionales, se han explorado alternativas naturales que aporten minerales, aminoácidos, vitaminas y azúcares esenciales para el cultivo (de Menezes Gonçalves *et al.*, 2016).

Entre estas alternativas, el agua de coco ha demostrado ser un suplemento eficaz en el cultivo in vitro de orquídeas como *Rhynchostylis retusa* (Thomas & Michael, 2007), *Acampe papillosa* (Hossein *et al.*, 2013), *Cypripedium macranthos* (Huh *et al.*, 2016) y *Paphiopedilum wardii* (Zeng *et al.*, 2012), mejorando la germinación de sus semillas y el desarrollo de plántulas. Además, en el cultivo *in vitro* de *Phalaenopsis sp.*, la incorporación de 10 mL^{-L} de pulque -una bebida fermentada derivada del aguamiel del agave- y 50 mL^{-L} de aguamiel - el néctar dulce y nutritivo extraído de la planta de agave- en el medio de cultivo incrementó significativamente las tasas de multiplicación de PLBs, logrando la regeneración de plantas completas y una tasa de sobrevivencia del 100% tras 21 días de adaptación (Arzate-Fernández *et al.*, 2023) .

A pesar del potencial de muchos sustitutos naturales, varios de ellos no han sido explorados a fondo en el cultivo *in vitro*. Un ejemplo es el uso de los “gorgojos chinos” (o “gorgojos del maíz”), también conocidos popularmente como “bichitos del amor”, que son empleados en medicina tradicional para aliviar síntomas de enfermedades como el asma, problemas gástricos y el cáncer (Moreno *et al.*, 2019). Este insecto, clasificado científicamente como *Ulomoides dermestoides* (Fairm) (Coleoptera: Tenebrionidae), es común en regiones templadas y tropicales de todo el mundo. A pesar de que puede causar daños en las cosechas y el almacenamiento de granos, como el maíz y el maní (Deloya & Deloya, 2014), también se investiga su posible aprovechamiento en la producción de plantas en cultivo *in vitro*.

Por ello, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de las heces del escarabajo del maní (*Ulomoides dermestoides*), agua de coco y pulque en la proliferación de PLBs y la regeneración de plántulas de *Phalaenopsis* var. *Dudu.*

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Como explantes se utilizaron clústers de cinco PLBs, sin disgregarse, con un diámetro aproximado de 5 mm (Figura 1A) que fueron obtenidos, previamente, a partir de la germinación de semillas de *Phalaenopsis* var. *Dudu*.

Preparación de complejos orgánicos

Como complejos orgánicos se utilizaron heces del escarabajo del maní (HEM), agua de coco (AC) y pulque (PUL). Las heces del escarabajo del maní se obtuvieron de escarabajos criados en recipientes de plástico (34 cm x 21 cm x 11.6 cm) y alimentados tres veces al día con una dieta basada en pan integral, rodajas de pepino y cáscara de plátano. La composición química de las heces del escarabajo del maní fue analizada en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMéx (Tabla 1).

El agua de coco se obtuvo de cocos naturales adquiridos en el mercado local y el pulque se adquirió en un centro de abastecimiento de los productores de pulque de Jocotitlán, Estado de México. El agua de coco y el pulque se filtraron, por separado, a través de un filtro de cafetera y posteriormente en un filtro millipore de 0.20µm, se almacenaron a -20°C y se agregaron después de descongelarlos al medio según se requería.

Condiciones de cultivo *in vitro*

Cinco explantes fueron cultivados asépticamente en recipientes de 500 mL de capacidad, cada recipiente contenía 30 mL de medio de cultivo compuesto por sales MS al 50%, 20 g L^{-1} de sacarosa, vitaminas MS, 4 g L^{-1} de agar, 0.5 g L^{-1} de carbón activado suplementado con HEM (0, 2.5, 5.0, 7.5 y 10 g L^{-1}) solo y en combinación de AC (100 mL L^{-1}) y PUL (10 mL L^{-1}). El pH del medio de cultivo se ajustó a 5.5±0.1 con HCl y NaOH, antes de adicionar el agar, y después se esterilizó en autoclave, a una temperatura de 121 °C y 1.1 kg cm^{-2} de presión por 20 minutos. Para garantizar la asepsia de los medios de cultivo, se añadieron 20 mL L^{-1} de nanopartículas de plata, sintetizadas siguiendo la metodología descrita por (Martínez Martínez *et al.*, 2024).

Los explantes se incubaron a 25±2°C y condiciones de luz usando lámparas de luz blanca (25 µmol $m^{-2}s^{-1}$ de intensidad lumínica) durante 16 horas por 90 días.

Tabla 1. Composición química de las heces del escarabajo del maní (*Ulomoides dermestoides*)
Table 1. Chemical composition of peanut beetle (*Ulomoides dermestoides*) feces

Propiedades	Concentración
pH	5.55
Nitrógeno Total	0.0555 %
Fósforo	3928.9 ppm
Potasio	1576.7 ppm
Calcio	4415.9 ppm
Magnesio	740.1 ppm
Sodio	102.5 ppm
Hierro	385.71 ppm

Aclimatación de plántulas

Plántulas regeneradas *in vitro*, después de 90 días, se transfirieron a domos de plástico y como sustrato se utilizó una mezcla de fibra de coco y tepojal (1:1). Cada tercer día se realizaron pequeños orificios en las tapas de los domos de plástico y a los 21 días se retiraron las tapas.

Núm. 60: 263-272 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Análisis estadístico

Los explantes fueron distribuidos en un diseño experimental completamente al azar, con tres repeticiones, con un arreglo trifactorial 5x2x2 con los siguientes niveles por factor: factor A con cinco niveles (0, 2.5, 5.0, 7.5, y 10 g L^{-1} de HEM), factor B (0 y 100 mL L^{-1} AC), y factor C (0 y 10 mL L^{-1} PUL). Las variables evaluadas fueron: número de PLBs obtenidos a los 45 días, número de plántulas regeneradas *in vitro* de *Phalaenopsis* var. Dudu, número y longitud (cm) de hoja y raíz por tratamiento a los 90 días. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para evaluar la significancia estadística de los efectos de los tratamientos probados; la comparación de medias entre los tratamientos con efecto significativamente diferente se realizó mediante la prueba de Tukey con ≤ 0.05. Además, se graficaron las interacciones de los sustitutos de origen natural. Se usó el programa estadístico StatGraphics® versión 5.0 Windows® para los procedimientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio, la proliferación de PLBs se realizó en un medio MS sólido, suplementado con heces del escarabajo del maní (HEM), agua de coco (AC) y pulque (PUL). Los tipos y concentraciones de estos complejos orgánicos influyeron en la respuesta de los PLBs en términos de proliferación y regeneración.

El mayor número de PLBs se obtuvo en medios de cultivo suplementados con heces del escarabajo del maní (HEM) y la adición de agua de coco (AC). Las HEM a 2.5, 5 y 7.5 g L^{-1} adicionado con 100 mL L^{-1} de AC mejoró significativamente el número de PLBs en 20.8, 21.1 y 22.2 PLBs (Tabla 2, Figura 1B y Figura 2A), respectivamente, en comparación con el control 12.7 PLBs por explante (Tabla 2 y Figura 1C), además, los PLBs obtenidos presentaron una coloración verde y forma globular. La adición únicamente de HEM en una concentración de 7.5 y 10 g L^{-1} favoreció significativamente el número de PLBs en 15.2 y 15.6 (Figura 1D), respectivamente, con respecto al medio sin sustitutos de origen natural (testigo) y en bajas concentraciones de HEM, el número de PLBs se disminuyó significativamente (Tabla 2). Esto concuerda con los hallazgos de Samala & Thipwong (2023), quienes observaron que la formación de PLBs fue mayor en medios con solo AC (47.38 ± 7.17 %) y en combinación de AC y homogeneizado de papa (52.13 ± 6.20%).

En *Phalaenopsis*, Tanaka & Sakanishi (1977) informaron que la exudación fenólica, que ocurre cuando se extrae un explante de la planta madre, limita la proliferación y regeneración de los tejidos. Este fenómeno provoca el oscurecimiento tanto del tejido (Figura 1C) como del medio circundante, lo que disminuye la respuesta del explante e incluso puede llevar a su muerte. Para mantener la capacidad de proliferación y regeneración de los explantes, es esencial la aplicación de agentes antioxidantes o absorbentes que contrarresten los efectos de los exudados fenólicos. En este contexto, los extractos de las heces del escarabajo del maní (HEM) han mostrado actividad antioxidante. Dary *et al.*, (2013) sugirieron que compuestos como el ácido oleico y el 4-etil-resorcinol podrían ser los responsables de esta actividad en el extracto metanólico de *Ulomoides dermestoides*. En consecuencia, el aumento en el número de PLBs observado en este estudio a altas concentraciones de HEM podría atribuirse a esta capacidad antioxidante. Sin embargo, se requieren más estudios para comprender en profundidad el mecanismo de acción de HEM.

El análisis estadístico reveló diferencias significativas en las interacciones de HEM, AC y PUL sobre el número de PLBs. En concentraciones menores a 7.5 g L^{-1} de HEM, la adición de AC mejoró de manera significativa el número de PLBs. Este efecto podría estar relacionado, en parte, con la capacidad antioxidante tanto de las HEM como del AC. Murdad *et al.*, (2006) reportaron que en *Phalaenopsis gigantea*, altas concentraciones de AC en los medios de cultivo redujeron los exudados fenólicos y favorecieron la proliferación de PLBs. Además, Utami & Hariyanto (2020) señalaron que el agua de coco contiene azúcares solubles como fuente natural de carbono, así como aminoácidos, vitaminas (tiamina, piridoxina, ácido ascórbico) y minerales. También está compuesta por varios iones orgánicos como fósforo, magnesio, potasio, calcio, hierro y manganeso, los cuales favorecen la proliferación de PLBs. Estos mismos iones orgánicos también se encuentran presentes en las HEM (Tabla 1).

Tabla 2. Efecto de complejos orgánicos: heces del escarabajo del maní (HEM), agua de coco (AC) y pulque (PUL) en la proliferación de PLBs a los 45 días y regeneración *in vitro* de plántulas de *Phalaenopsis* var. *Dudu*, a los 90 días.
Table 2. Effect of organic complexes: peanut beetle feces (HEM), coconut water (AC) and pulque (PUL) on the proliferation of PLBs at 45 days and *in vitro* regeneration of *Phalaenopsis* var. *Dudu* seedlings, at 90 days.

HEM (g L^{-1})	AC (mL L^{-1})	PUL (mL L^{-1})	N° de PLBs	N° de plántulas	N° de hojas	Longitud de hojas (cm)	N° de raíces	Longitud de raíces (cm)
0	0	0	12.7±1.33^{cd}	5.3±0.58^{a}	2.5±0.50^{a}	12.4±0.72^{cde}	2.5±0.50^{a}	5.6±0.15^{d}
2.5	0	0	10.4±0.05^{ef}	4.0±1.00^{b}	2.0±1.00^{abc}	15.6±0.72^{b}	1.5±0.50^{b}	9.4±0.60^{bc}
5	0	0	10.8±0.04^{de}	1.3±0.58^{c}	2.0±1.00^{abc}	11.0±0.72^{de}	1.5±0.50^{b}	6.6±0.70^{cd}
7.5	0	0	15.2±0.05^{b}	1.3±0.58^{c}	2.0±0.00^{abc}	12.6±0.72^{cd}	0.8±0.72^{c}	6.6±2.00^{cd}
10	0	0	15.6±0.04^{b}	1.3±0.58^{c}	1.5±0.50^{cd}	14.4±0.72^{bc}	1.0±0.00^{bc}	12.8±1.80^{a}
0	100	0	7.9±0.67^{g}	1.3±0.58^{c}	2.0±0.00^{abc}	12.4±0.72^{cde}	1.5±0.50^{b}	5.2±1.20^{d}
2.5	100	0	20.8±0.44^{a}	3.3±0.58^{b}	1.6±0.53^{bc}	17.8±0.72^{a}	1.0±0.00^{bc}	9.4±1.20^{bc}
5	100	0	21.1±0.87^{a}	3.7±0.58^{b}	2.0±0.00^{abc}	12.4±0.72^{cde}	1.5±0.50^{b}	5.2±0.90^{d}
7.5	100	0	22.2±0.35^{a}	3.7±0.58^{b}	1.6±0.53^{bc}	17.8±0.72^{a}	1.0±0.00^{bc}	9.4±1.20^{bc}
10	100	0	13.2±0.59^{c}	3.7±0.58^{b}	0.7±0.58^{de}	11.2±0.72^{de}	0.8±0.72^{c}	1.2±0.90^{f}
0	0	10	0.5±1.00^{i}	1.3±0.58^{c}	0.7±0.58^{de}	10.5±0.72^{e}	1.0±0.00^{bc}	3.0±1.00^{e}
2.5	0	10	6.9±0.61^{g}	1.3±0.58^{c}	1.6±0.53^{bc}	12.4±0.72^{cde}	1.5±0.50^{b}	10.8±0.70^{b}
5	0	10	8.1±0.65^{g}	1.3±0.58^{c}	0.7±0.58^{de}	12.8±0.72^{cd}	1.0±0.00^{bc}	5.4±1.10^{d}
7.5	0	10	8.5±0.48^{fg}	1.3±0.58^{c}	1.6±0.53^{bc}	12.4±0.72^{cde}	1.0±0.00^{bc}	5.4±1.00^{d}
10	0	10	8.4±0.58^{g}	1.3±0.58^{c}	2.4±0.53^{ab}	13.0±0.72^{cd}	1.5±0.50^{b}	8.0±2.00^{cd}
0	100	10	1.3±0.57^{i}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{e}	0.0±0.00^{f}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{f}
2.5	100	10	0.5±1.00^{i}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{e}	0.0±0.00^{f}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{f}
5	100	10	1.3±0.51^{i}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{e}	0.0±0.00^{f}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{f}
7.5	100	10	4.6±0.15^{h}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{e}	0.0±0.00^{f}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{f}
10	100	10	7.2±0.64^{g}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{e}	0.0±0.00^{f}	0.0±0.00^{d}	0.0±0.00^{f}

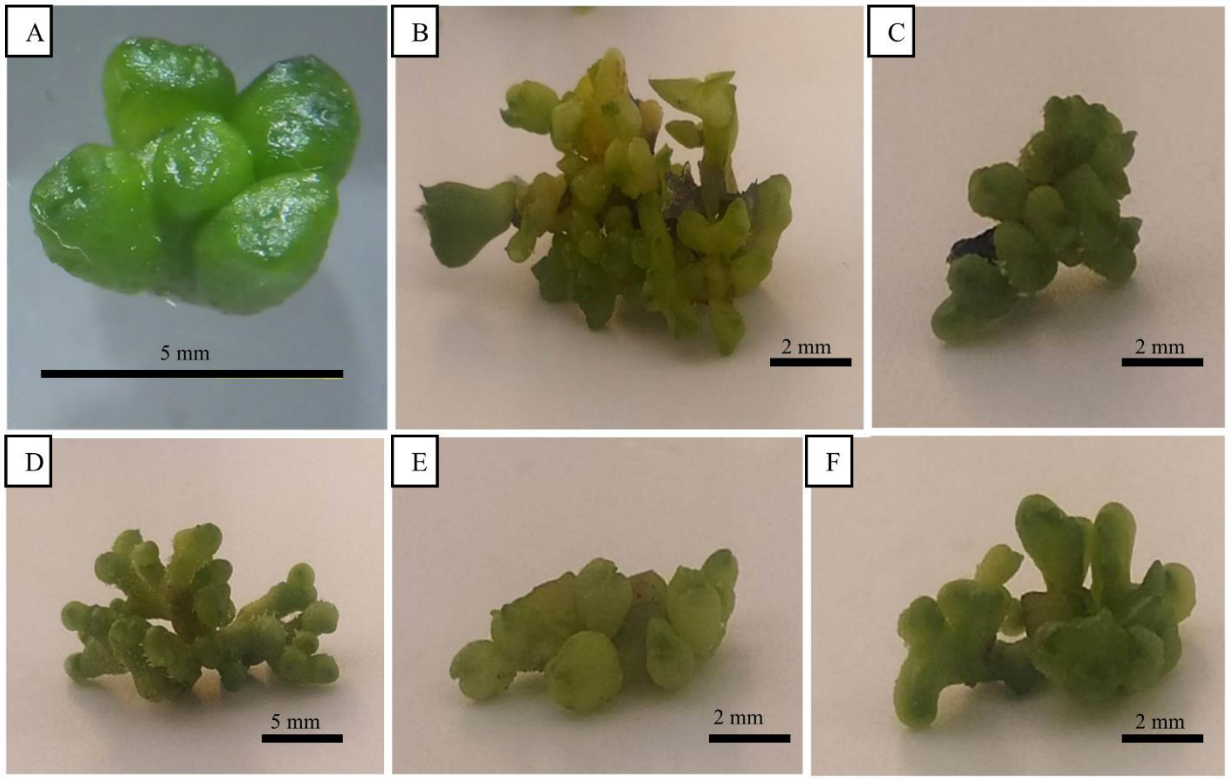


Figura 1. Proliferación *in vitro* de PLBs de *Phalaenopsis* var. *Dudu* a partir de explantes de PLBs. A) Clúster de cinco PLBs utilizado como explante; B) PLBs en medio con 10 g L^{-1} de heces del escarabajo del maní (HEM)+100 mL L^{-1} de agua de coco (AC); C) PLBs en medio sin complejos orgánicos; D) PLBs con 10 g L^{-1} de HEM; E) PLBs con 7.5 g L^{-1} de HEM+10 mL L^{-1} de pulque (PUL); y F) PLBs con 10 g L^{-1} de HEM+100 mL L^{-1} AC+10 mL L^{-1} de PUL, a los 45 días.
Figure 1. *In vitro* proliferation of PLBs from *Phalaenopsis* var. *Dudu* from PLBs explants. A) Cluster of five PLBs used as explant; B) PLBs in medium with 10 g L^{-1} of peanut beetle feces (HEM) + 100 mL L^{-1} of coconut water (AC); C) PLBs in medium without organic complexes; D) PLBs with 10 g L^{-1} of HEM; E) PLBs with 7.5 g L^{-1} of HEM+10 mL L^{-1} of pulque (PUL); and F) PLBs with 10 g L^{-1} of HEM+100 mL L^{-1} AC+10 mL L^{-1} of PUL, at 45 days.

La adición exclusiva de pulque al medio de cultivo provocó una disminución significativa en el número de PLBs. Sin embargo, en la interacción de HEM+PUL, se observó un aumento en la proliferación de PLBs (Figura 2B). Por otro lado, la combinación de pulque con agua de coco tuvo un efecto negativo sobre el número de PLBs (Figura 3C).

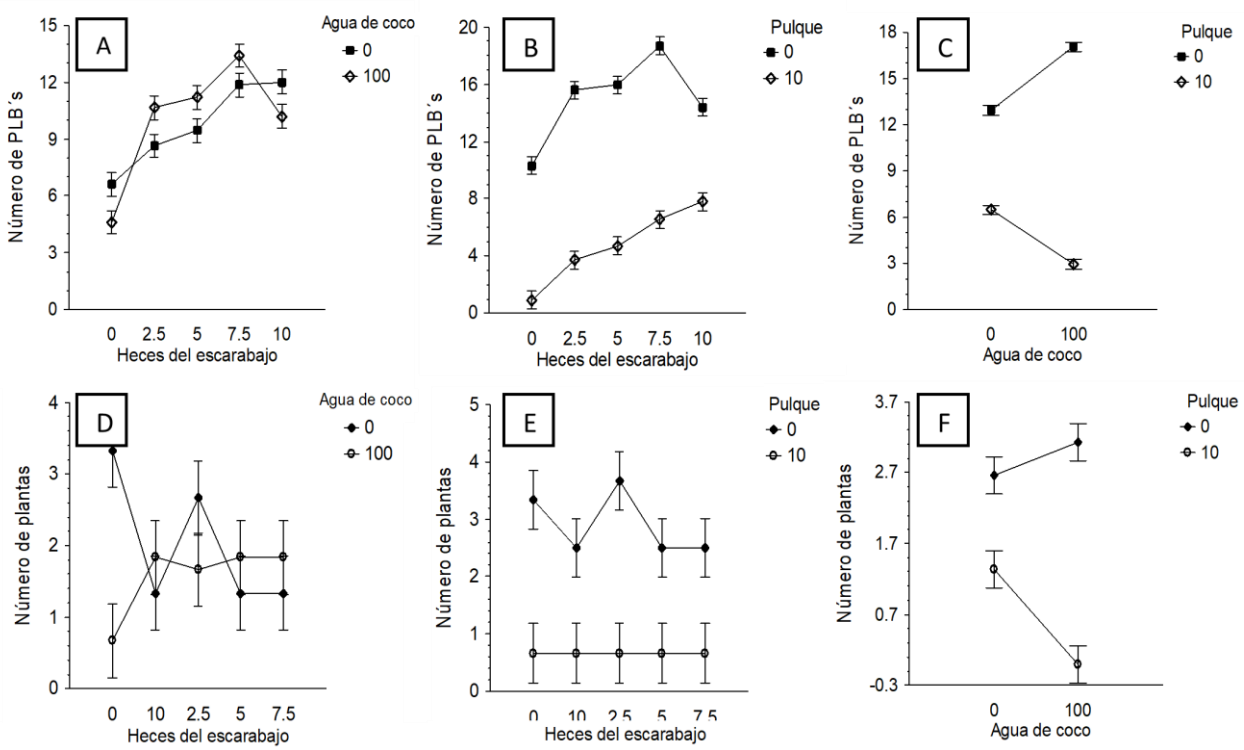


Figura 2. Interacción de los complejos orgánicos: heces del escarabajo del maní (HEM), agua de coco (AC) y pulque (PUL) en la proliferación de PLBs a los 45 días y regeneración *in vitro* de plántulas de *Phalaenopsis* var. *Dudu*, a los 90 días.
Figure 2. Interaction of organic complexes: peanut beetle feces (HEM), coconut water (AC) and pulque (PUL) on the proliferation of PLBs at 45 days and *in vitro* regeneration of *Phalaenopsis* var. *Dudu* seedlings, at 90 days.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Samala & Thipwong, (2023), quienes observaron que el crecimiento y vigor de *Dendrobium* aumentaron al agregar plátano machacado al medio; sin embargo, el homogenizado de plátano no fue efectivo para la proliferación y el mantenimiento de PLBs a largo plazo, causando necrosis en concentraciones más altas. Esto se alinea con los hallazgos de Ichihashi & Islam, (1999), quienes informaron que altas concentraciones de aditivos orgánicos pueden inducir necrosis en el material vegetal. Estudios en *Dendrobium* también revelaron que concentraciones elevadas de agua de coco inhibieron la regeneración temprana, lo que coincide con los hallazgos de Gnasekaran *et al.*, (2010), quienes reportaron un efecto inhibidor en el crecimiento de PLBs con concentraciones de 20% y 30% de agua de coco.

El mayor número de hojas y raíces también se obtuvo en el medio de cultivo sin complejos orgánicos (control), mientras que la mayor longitud de hojas y raíces se alcanzó en medios suplementados con HEM. En particular, la mayor longitud de hojas se registró en medios con 2.5 g L^{-1} de HEM y 100 mL L^{-1} de AC, así como con 7.5 g L^{-1} de HEM y 100 mL L^{-1} de AC. La mayor longitud de raíces, en cambio, se observó en el tratamiento con 10 g L^{-1} de HEM.

Aclimatación de plantas a condiciones *ex vitro*

Las plantas regeneradas a los 90 días en condiciones *in vitro* presentaron una longitud de 10-17 cm (Figura 3B), posteriormente fueron transferidas a un domo de plástico (Figura 3C) en condiciones de ambiente controladas por un periodo de 21 días. El porcentaje de sobrevivencia de las plántulas fue del 94% y se observó el cambio de intensidad del color verde de las hojas y el aumento de longitud de raíces (Figura 3D).

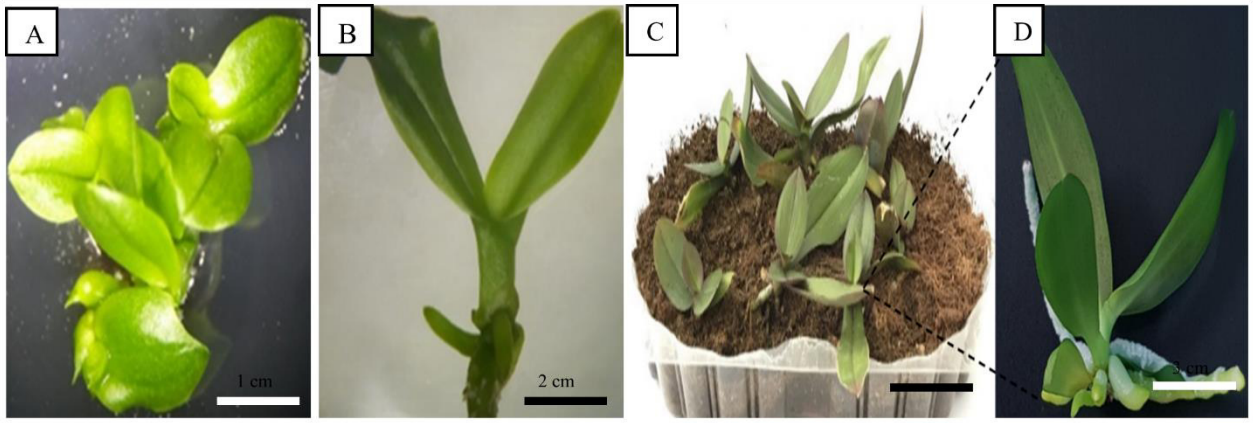


Figura 3. Proceso de regeneración de plántulas de *Phalaenopsis* var. *Dudu*. A) Plántulas regeneradas a partir de PLBs en condiciones *in vitro*; B) Plántula regenerada *in vitro* a los 90 días; C) Plántulas en condiciones *ex vitro* en charola con domo de plástico, bajo condiciones de invernadero D) Plántula de *Phalaenopsis* var. *Dudu*, 21 días después del proceso de aclimatación.
Figure 3. Regeneration process of *Phalaenopsis* var. *Dudu* seedlings. A) Plantlets regenerated from PLBs under *in vitro* conditions; B) Plantlets regenerated *in vitro* after 90 days; C) S Plantlets in *ex vitro* conditions in a tray with a plastic dome, under greenhouse conditions D) *Phalaenopsis* var. *Dudu*, 21 days after the acclimatization process.

CONCLUSIÓN

Este estudio evidenció que la combinación de HEM y AC favorece la proliferación de PLBs en *Phalaenopsis* var. *Dudu*. El tratamiento con 7.5 g L^{-1} de HEM y 100 mL L^{-1} de AC produjo el mayor número de PLBs. No obstante, el tratamiento sin la adición de complejos orgánicos favoreció la regeneración de plantas. Estos resultados sugieren que, aunque la combinación de HEM y AC estimula la proliferación de PLBs, la regeneración de plantas completas parece ser más eficiente en medios sin estos aditivos. Este hallazgo ofrece la oportunidad de optimizar los medios de cultivo para mejorar tanto la proliferación como la regeneración de plantas en *Phalaenopsis*.

LITERATURA CITADA

Arzate-Fernández, A. M., Rosas-Chávez, R., Norman-Mondragón, T. H., Corona-Rodríguez, M. C., & Piña-Escutia, J. L. (2023). Multiplication *in vitro* of *Phalaenopsis* sp. using plant growth regulators, honey water and fermented sap (organic complexes). *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(1). https://doi.org/10.56369/tsaes.3981

Dary, M., Meza, M., Margareth, Q., Yepes, S., Loreys, Q., & Ibarra, D. (2013). Antioxidant capacity of whole-body methanolic extracts of the beetle *Ulomoides dermestoides* (Chevrolat, 1893). *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 32(1). http://scielo.sld.cu

de Menezes Gonçalves, L., de Fátima S Machado, M. P., Ballesta, P., Mora, F., Auxiliadora Milaneze Gutierre, M., & Aparecida Mangolin, C. (2016). Suplementos orgánicos para el cultivo *in vitro* del híbrido *Laliocattleya* (Orchidaceae). *IDESIA*, 34(1), 47-54.

Deloya, G., & Deloya, C. (2014). Sustancias producidas por el coleóptero *Ulomoides dermestoides* (Chevrolat, 1878) (Insecta: Coleoptera: Tenebrionidae): efecto anti-inflamatorio y citotóxico. En *Acta Zool. Mex*. (n.s.), 30(3), 655-661.

Recibido: 7/noviembre/2024

Aceptado: 9/junio/2025

Gnasekaran, P., Rathinam, X., Sinniah, U. R., & Subramaniam, S. (2010). A Study on the Use of Organic Additives on the Protocorm-like Bodies (PLBS) Growth of *Phalaenopsis violacea* Orchid. *Journal of Phytology*, 2010(1), 29–033. www.journal-phytology.com

Hossein, P., Promila, P., & R, K. B. (2013). Asymbiotic germination of immature embryos of a medicinally important epiphytic orchid *Acampe papillosa* (Lindl.) Lindl. *African Journal of Biotechnology*, 12(2), 162–167. https://doi.org/10.5897/ajb11.4001

Huh, Y. S., Lee, J. K., Nam, S. Y., Paek, K. Y., & Suh, G. U. (2016). Improvement of asymbiotic seed germination and seedling development of *Cypripedium macranthos* Sw. with organic additives. *Journal of Plant Biotechnology*, 43(1), 138–145. https://doi.org/10.5010/JPB.2016.43.1.138

Ichihashi, S., & Islam, M. (1999). Effects of complex organic additives on callus growth in three Orchid genera, *Phalaenopsis*, *Doritaenopsis*, and *Neofinetia*. *J.Japan.Soc.Hort.Sci*, 68(2), 269–274.

Khatun, K., Nath, U. K., & Rahman, M. S. (2020). Tissue culture of *Phalaenopsis*: Present status and future prospects. *Journal of Advanced Biotechnology and Experimental Therapeutics*, 3(3), 273–285. https://doi.org/10.5455/jabet.2020.d135

Martínez Martínez, S. Y., Arzate-Fernández, A. M., González-Pedroza, M., García-Núñez, H., & De la Cruz-Torres, E. (2024). Actividad antibacteriana de nanopartículas de plata biosintetizadas a partir de extractos de tres especies de *Agave* para inhibir *Bacillus licheniformis*. *Polibotánica*, 0(58). https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.10

Moreno, S., Crescente, O., Herrera, B., Hernández, J., Muñoz, M., & Oliveros, M. (2019). Composición y actividad biológica de los extractos de *Ulomoides dermestoides* (Tenebrionidae) procesados bajo diferentes condiciones en Cumaná, estado Sucre. *FacSalud*, 3(5), 3–16.

Murdad, R., Hwa, K. S., Seng, C. K., Latip, M. Abd., Aziz, Z. A., & Ripin, R. (2006). High frequency multiplication of *Phalaenopsis gigantea* using trimmed bases protocorms technique. *Scientia Horticulturae*, 111(1), 73–79. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2006.08.008

Samala, S., & Thipwong, J. (2023). Influences of Organic Additives on Asymbiotic Seed Germination of *Dendrobium cruentum* Rchb. f. for *In Vitro* Micropropagation. *Trends in Sciences*, 20(3). https://doi.org/10.48048/tis.2023.4181

Tanaka, N., & Sakanishi, Y. (1977). Clonal propagation of *Phalaenopsis* by leaf tissue culture. *American Orchid Society Bulletin*, 46(8), 733–737.

Thomas, T. D., & Michael, A. (2007). High-frequency plantlet regeneration and multiple shoot induction from cultured immature seeds of *Rhynchostylis retusa* Blume., an exquisite orchid. *Plant Biotechnology Reports*, 1(4), 243–249. https://doi.org/10.1007/s11816-007-0038-z

Utami, E. S. W., & Hariyanto, S. (2020). Organic Compounds: Contents and Their Role in Improving Seed Germination and Protocorm Development in Orchids. *International Journal of Agronomy*, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/2795108

Yuan, S.-C., Lekawatana, S., Amore, T. D., Chen, F.-C., Chin, S.-W., Vega, D. M., & Wang, Y.-T. (2021). The Global Orchid Market (pp. 1–28). https://doi.org/10.1007/978-3-030-66826-6_1

Zeng, S., Wu, K., Teixeira da Silva, J. A., Zhang, J., Chen, Z., Xia, N., & Duan, J. (2012). Asymbiotic seed germination, seedling development and reintroduction of *Paphiopedilum wardii* Sumerh., an endangered terrestrial orchid. *Scientia Horticulturae*, 138, 198–209. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.02.026

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE TRES VARIEDADES DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) INOCULADAS CON BACTERIAS CUANDO SE CULTIVAN EN CONDICIONES DE ESTRÉS POR AGUAS RESIDUALES Y SULFATO DE COBRE

EVALUATION OF THE RESPONSES OF THREE TOMATO VARIETIES (*Solanum lycopersicum* L.) INOCULATED WITH BACTERIA WHEN GROWN UNDER STRESS CONDITIONS DUE TO WASTEWATER AND COPPER SULFATE

Gardezi, A.K., L.M. Inzunza Medina, G. Carrillo Castañeda, H.M. Ortega Escobar, O.R. Mancilla Villa, J.E. Rubiños Panta, J. Flores Velazquez, N. Meraz Maldonado, S.R. Marquez Berber, H. Flores Magdaleno, G. Haro Aguilar

EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE TRES VARIEDADES DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) INOCULADAS CON BACTERIAS CUANDO SE CULTIVAN EN CONDICIONES DE ESTRÉS POR AGUAS RESIDUALES Y SULFATO DE COBRE. EVALUATION OF THE RESPONSES OF THREE TOMATO VARIETIES (*Solanum lycopersicum* L.) INOCULATED WITH BACTERIA WHEN GROWN UNDER STRESS CONDITIONS DUE TO WASTEWATER AND COPPER SULFATE

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 273-290 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.5

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 273-290 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Evaluación de las respuestas de tres variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) inoculadas con bacterias cuando se cultivan en condiciones de estrés por aguas residuales y sulfato de cobre.

Evaluation of the responses of three tomato varieties (*Solanum lycopersicum* L.) inoculated with bacteria when grown under stress conditions due to wastewater and copper sulfate

Gardezi, A.K., L.M. Inzunza Medina, G. Carrillo Castañeda, H.M. Ortega Escobar, O.R. Mancilla Villa, J.E. Rubiños Panta, J. Flores Velazquez, N. Meraz Maldonado, S.R. Marquez Berber, H. Flores Magdaleno, G. Haro Aguilar

EVALUACIÓN DE LAS RESPUESTAS DE TRES VARIEDADES DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) INOCULADAS CON BACTERIAS CUANDO SE CULTIVAN EN CONDICIONES DE ESTRÉS POR AGUAS RESIDUALES Y SULFATO DE COBRE.

EVALUATION OF THE RESPONSES OF THREE TOMATO VARIETIES (*Solanum lycopersicum* L.) INOCULATED WITH BACTERIA WHEN GROWN UNDER STRESS CONDITIONS DUE TO WASTEWATER AND COPPER SULFATE

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 273-290. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.16

Abdul Khalil Gardezi / kabdul@colpos.mx
https://orcid.org/0000-0003-2636-1579
Leticia Manuela Inzunza Medina
Guillermo Carrillo Castañeda https://orcid.org/0000-0003-3444-3902
Héctor Manuel Ortega Escobar https://orcid.org/0000-0002-1580-4795
Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo, Km. 36.5, México 136 5, Montecillo, 56264 Montecillo, México

Oscar Raúl Mancilla Villa https://orcid.org/0000-0003-4845-1188
Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Autlán Jalisco, México

Juan Enrique Rubiños Panta https://orcid.org/0000-0002-9788-0280
Jorge Flores-Velazquez https://orcid.org/0000-0003-0895-4645
Nora Meraz Maldonado https://orcid.org/0000-0001-7181-793X
Sergio Roberto Marquez Berber https://orcid.org/0000-0001-8509-6758
Héctor Flores Magdaleno https://orcid.org/0000-0001-6404-7957
Gabriel Haro Aguilar https://orcid.org/0000-0002-3457-506X
Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco, Estado de México

RESUMEN: El objetivo de esta investigación fue evaluar las respuestas de tres variedades *Solanum lycopersicum* L., inoculadas con cepas bacterianas, expuestas a condiciones de estrés por aguas residuales y sulfato de cobre, bajo condiciones de invernadero dentro de las instalaciones del Campus del Colegio de Postgrado Montecillo. Texcoco, México. El diseño experimental utilizado fue de bloques completamente al azar con un arreglo factorial, con tres repeticiones, dos niveles de sulfato de cobre, El sulfato es un compuesto que se encuentra en la naturaleza. Se encuentra de forma natural en el agua en diferentes cantidades. Si el agua contiene una gran cantidad de sulfato, puede tener un sabor amargo. Los sulfatos también se encuentran en minerales, suelo, rocas, plantas y alimentos. El sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) y su uso en agricultura. Esto forma cristales grandes de color azul brillante que contienen cinco moléculas de agua ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) y también se conoce como vitriolo azul. La sal anhidra se crea calentando el hidrato a 150 °C (300 °F). El sulfato cúprico se utiliza principalmente con fines agrícolas, como pesticida, germicida, aditivo para piensos y aditivo para el suelo.

Dos tipos de suelo regado con dos fuentes de riego (aguas residuales y aguas limpias), tres consorcios bacterianos, tres variedades de jitomate. *Lycopersicum* (dos mejoradas y una nativa de campesino) para comparar el efecto sobre el desarrollo de crecimiento fisiológico.

Se realizaron análisis de varianza y comparaciones de media (Tukey, $p \leq 0.05$). Mediante el uso de consorcios bacterianos se promovió el desarrollo del cultivado en condición de estrés por cobre y en suelos regados históricamente con aguas residuales durante 120 días. En la variedad R.G. 22 el consorcio bacteriano (1) de *P. putida, P. fluorescens* y A9 tuvo mayor influencia en el desarrollo de la planta, en la variedad R.G. 19, la mejor respuesta ocurrió con el uso del consorcio bacteriano 3 (A, D, A7), en la variedad R.N.

Núm. 60: 273-290 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

22 y el uso de los dos consorcios bacterianos (1 y 3) favoreció el desarrollo de las plántulas. Las evaluaciones de la respuesta de plántula en invernadero a la inoculación fueron similares, por lo que las dos evaluaciones permitieron comprobar que los consorcios bacterianos 1 y 3 tuvieron un efecto positivo en el desarrollo de las plántulas.
La variedad R.G. 22 mediante el uso del consorcio bacteriano 1 que incluye las bacterias *Pseudomonas putida, Pseudomonas fluorescens* y A9 presentó diferencias significativas con relación al tratamiento control. Se incrementó 11% la longitud del tallo y 3% el diámetro del tallo, se incrementó la longitud de la raíz en 14% y el volumen de la raíz en 33% y la biomasa seca de la parte aérea se incrementó en 14%, con respecto al testigo. En la variedad R.G. 19 mediante el uso del consorcio bacteriano 3 presentó un incremento 25% en la longitud del tallo y 7% de la raíz, 13% la biomasa seca de la parte aérea y 25% el área foliar. En la variedad R.N. 22 mediante el uso de los consorcios 1 y 3 se presentó un incremento en el número de hojas, 20% longitud y 60% biomasa de raíz y 17% en la biomasa seca de la parte aérea, en comparación con el testigo.
Palabras clave: presión hídrica, aguas residuales, biorremediación, consorcios bacterianos, variedades de jitomate,

ABSTRACT: The objective of this research was to evaluate the responses of three varieties of *Solanum lycopersicum* L., inoculated with bacterial strains and exposed to stress conditions by wastewater and copper sulfate under greenhouse conditions within the facilities of the Montecillo Graduate School Campus. Texcoco, Mexico. The experimental design used was completely randomized blocks with a factorial arrangement, with three replications and two levels of copper sulfate (with and without). Sulfate is a compound found in nature. It is found naturally in water in different quantities. The water may taste bitter if it contains a large amount of sulfate. Sulfates are also found in minerals, soil, rocks, plants, and foods. $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ and its use in agriculture. This forms large, bright blue crystals containing five water molecules ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), also known as blue vitriol. Anhydrous salt is created by heating the hydrate to 300 °F (150 °C). Cupric sulfate is mainly used for agricultural purposes as a pesticide, germicide, feed additive, and soil additive. Two types of soil irrigated with two irrigation sources (wastewater and clean water), three bacterial consortia, and three varieties of tomato *lycopersicum* (two improved and one native peasant) were used to compare the effect on physiological growth development.
Analyses of variance and mean comparisons were performed (Tukey, $p \leq 0.05$). Using bacterial consortia, the crop's development was promoted under stress conditions by copper and in soils historically irrigated with wastewater for 120 days. In the R.G. 22 variety, the bacterial consortium (1) of *Pseudomonas putida, Pseudomonas fluorescens* and A9 had a more significant influence on the development of the plant, in the R.G. 19 variety, the best response occurred with the use of bacterial consortium 3 (A, D, A7), in the R.N. 22 variety and the use of the two bacterial consortia (1 and 3) favored the development of seedlings. The evaluations of the greenhouse seedling response to inoculation were similar, so the two evaluations allowed to verify that bacterial consortia 1 and 3 had a positive effect on seedling development. The R.G. 22 variety, through the use of bacterial consortium one that includes the bacteria *P. putida, P. fluorescens*, and A9, presented significant differences in the control treatment. The length of the stem and 3% diameter of the stem were increased, the length was increased by 14% and volume by 33% of the root, and the dry biomass of the aerial part increased by 14%, with respect to the control. In the R.G. 19 variety, through bacterial consortium 3, there was a 25% increase in stem length, 7% in root, 13% in the dry biomass of the aerial part, and 25% in leaf area. In the R.N. 22 variety, through the use of consortia 1 and 3, there was an increase in the number of leaves, 20% length and 60% root biomass, and 17% in the dry biomass of the aerial part, compared to the control.
Key words: water pressure, wastewater, bioremediation, bacterial consortia, tomato varieties.

Núm. 60: 273-290 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

INTRODUCTION

The global agricultural system is facing additional difficulties in the twenty-first century, including a drop in productivity and deterioration in the sustainability of agricultural ecosystems (Paice, 2022). Forecasts by the United Nations (United Nations, 2019) project that the global population will reach 9.7 billion people by 2050, resulting in a steady rise in food demand and its constrained available supply (Kumar *et al.*, 2017) Due to climate change, major cereal crops have seen significant production losses, with yield decreases of about 3.8% and 5% in reference to corn and wheat separately (Lipper *et al.*, 2014). Temperature rises have brought significant risks to agriculture, and the appearance of various abiotic factors has a negative impact on agricultural output (Paice, 2022). Many harmful abiotic environmental factors, such as salinity, turn arable land into barren land. This is because salinity drastically changes plant growth and metabolism, resulting in changes in plant physiology, morphology, and biochemistry (Gupta & Huang, 2014). By 2050, climate change will cause drought to impact over 50% of arable land (Osakabe *et al.*, 2014).

Drought affects crop hydration association, photosynthetic integration, and supplement utilization (Osakabe *et al.*, 2014). Heavy metal contamination is complex to remove and needed in small amounts for plant metabolic activities, but high levels harm the phytological and microbiological networks.

Food is necessary for survival and plays a crucial role in individual and societal development. Reduced crop yields are a significant cause for alarm. Pressure from a growing population on farmland to produce more food has resulted in the widespread usage of chemical inputs like fertilizers, herbicides, and insecticides. Through bioaccumulation and biomagnification, the effects of agrochemical runoff from such land have a negative impact on life on Earth. The use of insecticides to combat plant pests has unintended consequences for beneficial insects, soil fertility, and soil microbiota (Khatoon *et al.*, 2020). Harmful farming methods do not meet our needs and cannot provide a sustainable future. Sustainable agriculture has become increasingly important in recent times due to its focus on long-term environmental and social benefits, Knowing the importance of sustainable farming practices is crucial for meeting the world's future economic needs. These practices can help reduce the use of artificial pesticides and fertilizers while improving plant health and soil quality (de Andrade *et al.*, 2023)**.**

This soil quality is preserved with its diversity within sustainable agriculture, thus producing safe food for future generations, guaranteeing long-term environmental health. Sustainable agriculture must preserve the soil's inherent diversity to secure long-term environmental health worldwide and produce adequate food for future generations (Kumar *et al.*, 2017)**.**

Thus, eco-friendly alternatives, including the sustainable use of beneficial microorganisms, are crucial for alleviating environmental stress. Bacteria, known as plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR), are the most important soil microbes. The benefits for the crop are achieved in many ways, such as nitrogen fixation, breaking down phosphate, getting rid of heavy metals, making phytohormones (like auxin, gibberellins, cytokinin, etc.), breaking down crop residue, and stopping phytopathogens from growing (He *et al*., 2019)**.**

Researchers have demonstrated that PGPRs boost plant vitality and promote development without releasing harmful by-products into the atmosphere. With over 500 species, *Streptomyces* is the largest genus of Actinobacteria and a type genus of the Streptomycetaceae family among PGPRs (Mohammadipanah & Dehhaghi, 2017).

Crop production requires PGPR to boost plant nutrient availability since it directly or indirectly influences plant growth through root colonization (Hassanisaadi *et al.*, 2021). The PGPR enhances plant growth by bioremediating polluted soils by sequestering toxic heavy metal species and degrading xenobiotic compounds like pesticides. Additionally, it mobilizes soil nutrients, produces plant growth regulators, protects plants from phytopathogens by controlling or inhibiting them, and improves soil structure (Backer *et al.*, 2018).

Rhizosphere bacteria help cycle carbon through the earth and the environment and prevent soil carbon loss through metabolic activity. PGPRs can effectively control plant diseases brought on by fungi and bacteria. The phytomicrobiome, a group of beneficial bacteria, improves plant resilience to biotic and abiotic stress and agricultural productivity.

Núm. 60: 273-290 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

PGPR, a beneficial phytomicrobiome component, promotes plants' responses to biotic stress by producing chemical messengers, boosting their intake of nutrients, and releasing antibiotics (Lyu *et al.*, 2021).

In addition, one of the fundamental components of ecosystems is microbial communities that play important roles in the metabolism of organic matter and are involved in the degradation of a wide range of pollutants (Castillo Rogel *et al.*, 2020). This is why bacteria have been used to accumulate or metabolize different harmful compounds in the bioremediation process (Torres Rodríguez, 2003). Some species of bacteria with metabolic properties against harmful compounds are the following: *Pseudomonas putida, Deinococcus radiodurans, Cupriavidus metallidurans, Shewanella oneidensis*. Agriculture in Mexico is an important activity because of food production and because it generates jobs, foreign exchange, and relationships around the activity (Montaño Méndez *et al.*, 2021).

Fruit and vegetable activity represents 45% of exports, placing it as the most dynamic activity in terms of exports since the signing of the North American Free Trade Agreement, highlighting the export of products such as tomatoes (7.77%), peppers (3.9%), cucumbers (3.31%), lemons (2.86%), avocados (2.4%), and onions (2.23%) (Montaño Méndez *et al.*, 2021).

The tomato is one of the vegetables with the most significant economic importance worldwide. According to the Food and Agriculture Organization of the United Nations, Mexico ranks second in tomato exports, so increasing the production potential in adverse conditions is essential. The objective of this research was to evaluate the responses of three *Solanum lycopersicum* L. varieties inoculated with bacterial strains and exposed to stress conditions caused by wastewater and copper sulfate under greenhouse conditions.

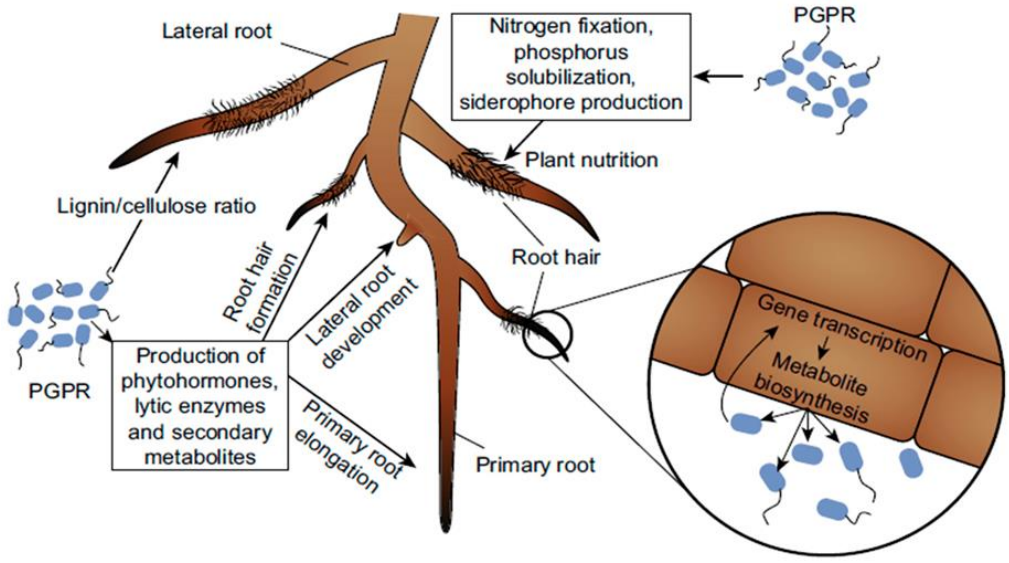


Figure 1. Impact of phytostimulating PGPR on RSA, nutrient acquisition and root functioning**.** PGPR can modulate root development and growth by producing phytohormones, secondary metabolites, and enzymes. The most commonly observed effects are a reduction of the growth rate of the primary root and an increase in the number and length of lateral roots and root hairs. PGPR also influences plant nutrition via nitrogen fixation, solubilization of phosphorus, or siderophore production, and modifies root physiology by changing gene transcription and metabolite biosynthesis in plant cells (Vacheron *et al.*, 2013) https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356

Figura 1. Impacto de la fitoestimulación con PGPR en la RSA, la adquisición de nutrientes y el funcionamiento radicular. La PGPR puede modular el desarrollo y el crecimiento radicular mediante la producción de fitohormonas, metabolitos secundarios y enzimas. Los efectos más comunes observados son la reducción de la tasa de crecimiento de la raíz primaria y el aumento del número y la longitud de las raíces laterales y los pelos radiculares. La PGPR también influye en la nutrición vegetal mediante la fijación de nitrógeno, la solubilización del fósforo o la producción de sideróforos, y modifica la fisiología radicular modificando la transcripción génica y la biosíntesis de metabolitos en las células vegetales (Vacheron *et al.*, 2013) https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356

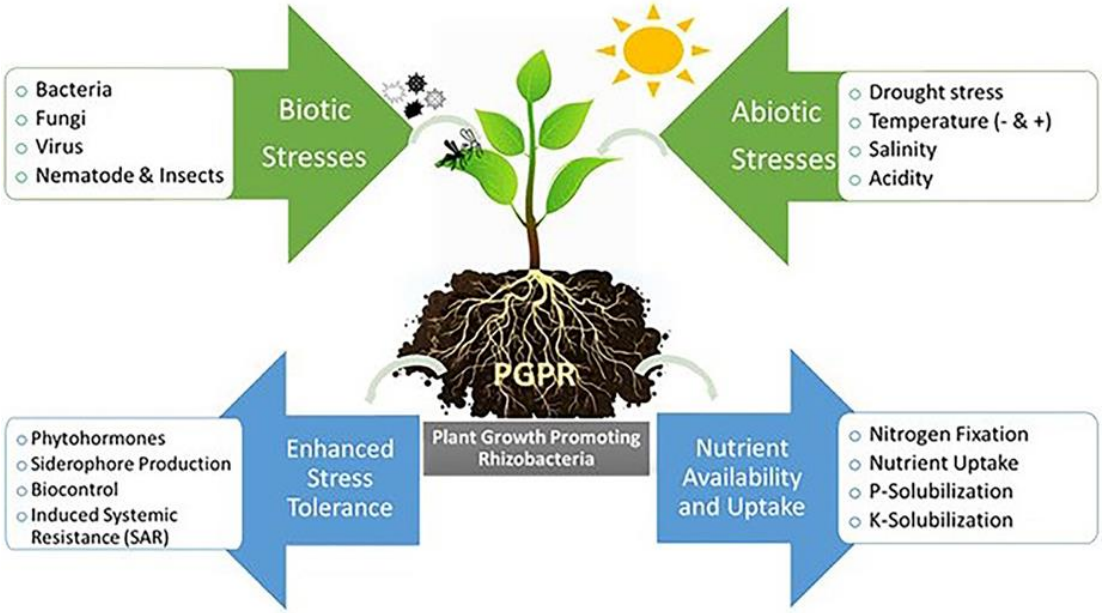


Figure 2. Plant growth promotes rhizobacteria (PGPR) and plant interactions in the rhizosphere (Vacheron *et al.*, 2013) https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356.
Figura 2. El crecimiento de las plantas promueve las rizobacterias (PGPR) y las interacciones de las plantas en la rizosfera (Vacheron *et al.*, 2013) https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356.

The application of beneficial microbes to food crops has been studied extensively; however, their implementation in the field is limited. Incorporating phytomicrobiome members in agricultural systems as a sustainable approach for disease management and nutrient supplements could reduce the adverse effects associated with the excess application of chemical inputs (fertilizers and pesticides) (Antar *et al.*, 2021). In addition, phytmicrobiome members have been employed as an effective strategy to mitigate certain biotic and abiotic stresses that could affect crop growth and production (Shah *et al.*, 2021).

METHODS

Experimental Site. The research was conducted under greenhouse conditions at the postgraduate college, Montecillo Campus, State of México at 19° 27′ N and 98° 54′ W. The Site has an altitude of 2245 meters above sea level, a mild climate, an average annual temperature of 16.4 °C, and a rainfall of 762.7 mm per year. The greenhouse had a flat, symmetrical triangular roof. The glass cover provided 70% light and was made of metal. Ventilation was provided through front and side windows. The laboratory tests took place in the Molecular Genetics Laboratory of the Postgraduate Program in Genetic Resources and Productivity of the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Mexico. The greenhouse tests were carried out in a glass greenhouse within the facilities of the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Mexico. The research was carried out in three stages; in the first, the viability of tomato seed exposed to $CuSO_4$ solutions, the effect of pre-germinative treatments as germination enhancers, and the response of the seed to inoculation with bacterial consortia were evaluated. The second stage consisted of determining the vigor of the tomato seedling whose seed was inoculated with bacterial consortia. In the third stage, the tomato plant was evaluated in a greenhouse up to 120 days after planting, developed under stress conditions by $CuSO_4$, and in soil irrigated with wastewater.

Biological material

Tomato seeds (*S. lycopersicum*) Rio Grande varieties (R.G. 22) had a purity of 99% and minimum germination of 90% in its last analysis in June 2022, Rio Grande variety (R.G. 19) purity of 99% with minimum germination of 92% in its last analysis in September 2019, and the native variety Kidney (R.N. 22), purity of 90% with germination of 95% in its last analysis in 2022, from Huatusco, Ver.

Table 1. Bacterial strains used to form bacterial consortia.
Tabla 1. Cepas bacterianas utilizadas para formar consorcios bacterianos

Bacterial strains	**Characteristic**
Pseudomonas. putida	bacteria fluorescence.
Pseudomonas fluorescens	bacteria fluorescence.
A9	Isolated from roots of corn crop bacteria, no fluorescence.
Avm	Isolated from roots of corn crop bacteria, no fluorescence.
7	Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence.
1	Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence.
A	Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence.
D	Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence.
A7	Isolated from roots of corn crop bacteria fluorescence.

Bacterial suspensions were prepared, for which cells (Figure 3) were transferred from each culture to test tubes containing distilled water. Suspensions adjusted to 0.9 (660 Nm) absorbance were formed in a spectrophotometer.

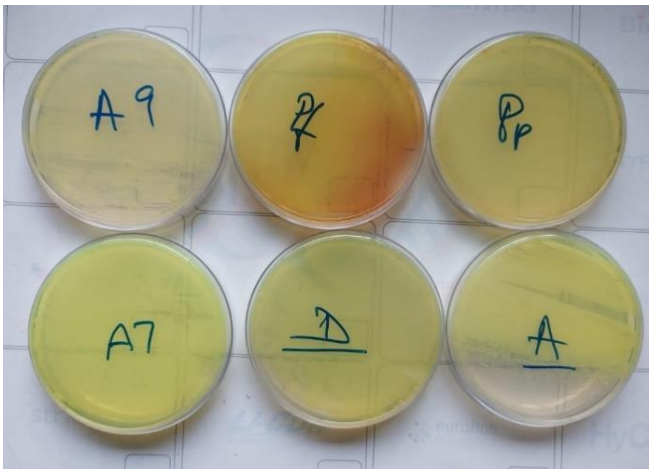


Figure 3. Bacterial strains. Pp (*Pseudomonas putida*), Pf (*Pseudomonas fluorescens*), A9 (Isolated from roots of corn crop bacteria no fluorescence), Avm (Isolated from roots of corn crop bacteria no fluorescence), 7 (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence), 1 (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence), A (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment

plant bacteria fluorescence), D (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence), A7 (Isolated from roots of corn crop bacteria fluorescence).

Figura 3. Cepas bacterianas. Pp (*Pseudomonas putida*), Pf (*Pseudomonas fluorescens*), A9 (Aislada de raíces de cultivo de maíz, bacteria sin fluorescencia), Avm (Aislada de raíces de cultivo de maíz, bacteria sin fluorescencia), 7 (Aislada de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), 1 (Aislada de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), A (Aislada de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), D (Aislada de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), A7 (Aislada de raíces de cultivo de maíz, bacteria con fluorescencia).

Bacterial consortia. The Bacterial consortia were prepared by arranging groups of three bacteria whose growth is not inhibited by the presence of any other bacteria (Figure 4), as follows:

- Consortium 1: *Pseudomonas putida, Pseudomonas fluorescens* y A9
- Consortium 2: Avm, seven y 1
- Consortium 3: A, D, A7.

Figure 4. Growth of bacterial strains for consortia. Pp (*Pseudomonas putida*), Pf (*Pseudomonas fluorescens*), A9 (Isolated from roots of corn crop bacteria no fluorescence), Avm (Isolated from roots of corn crop bacteria no fluorescence), 7 (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence), 1 (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence), A (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence), D (Isolated from sludge from the Atlacomulco wastewater treatment plant bacteria fluorescence), A7 (Isolated from roots of corn crop bacteria fluorescence).

Figura 4. Crecimiento de cepas bacterianas para consorcios. Pp (*Pseudomonas putida*), Pf (*Pseudomonas fluorescens*), A9 (Aislado de raíces de cultivo de maíz, bacteria sin fluorescencia), Avm (Aislado de raíces de cultivo de maíz, bacteria sin fluorescencia), 7 (Aislado de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), 1 (Aislado de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), A (Aislado de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), D (Aislado de lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Atlacomulco, bacteria con fluorescencia), A7 (Aislado de raíces de cultivo de maíz, bacteria con fluorescencia).

Of the prepared bacterial suspensions, equal volumes (0.9 ml) of suspensions were mixed from the bacteria that made up each consortium.

Soil

Two types of soil from the Mezquital Valley in the state of Hidalgo were used. The soil considered uncontaminated, which has historically been irrigated with spring (or clean) water, was extracted from El Manantial, Tezontepec de Aldama, Hidalgo.

Moreover, a second soil was used, brought from the locality Mixquiahuala de Juárez in the state of Hidalgo, which has historically been irrigated with wastewater.
Samples were obtained from the two types of soil at depths of 0-5 cm, 5-10 cm, and 10-40 cm. These samples were subjected to a soil analysis to determine the concentration of copper and its possible toxicity. Finally, for each soil type, a depth sample from 0-40 cm was used to establish the research study.

Solution of $CuSO_4$
The results obtained from the germination test in copper sulfate solution at different concentrations determined that the concentration to be used of $CuSO_4$ pentahydrate is 10-2 M. This concentration had effects on the germination process, but these were moderate.

RESULTS

The variable days to flowering only presented statistically significant differences in the variety R.G. 22 in the soil type factor ($p \leq 0.05$), increasing 9.13% the time flowering occurred in the soil historically irrigated with wastewater in relation to the soil irrigated with clean water. Although statistically, this variable did not vary in the soil type of the R.G. 19 variety and in the R.N. 22 variety, the flowering time also increased (Table 1).

Figure 5. Flower of tomato cultivation
Figura 5. Flor del cultivo del tomate.

Núm. 60: 273-290 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Table 2. Days to flowering by factor and level.
Tabla 2. Días a floración según factor y nivel.

Factors	**Variety**		
	R.G. 22	R.G. 19	R.N. 22
Soil type			
Soil irrigated with clean water	93.67 a	98.17 a	82.28 a
Soil irrigated with wastewater	102.22 b	103.28 a	79.33 a
Stress condition			
Without $CuSO_4$	100.28 a	102.83 a	78.67 a
With $CuSO_4$	95.61 a	98.61 a	82.94 a
Bacterial consortium			
Control	101.92 a	99.33 a	82.58 a
1	93.17 a	105.50 a	78.33 a
3	98.75 a	97.33 a	81.50

Note: Averages with the same letter per column do not differ statistically (Tukey, $p \leq 0.05$).

Consortium 1: *Pseudomonas putida, Pseudomonas fluorescens* y A9, Consortium 3: A, D, A7.
The leaf area's magnitude defines the vegetation cover's ability to intercept photosynthetically active radiation (PAR), which is the primary source of energy used by plants to manufacture tissues and produce food compounds (Warnock *et al.*, 2006).
Leaf area. It is an important variable in most agricultural and physiological studies involved in plant growth, light harvesting, photosynthetic efficiency, respiration, and transpiration. Leaf area determination is generally performed by direct methods, in which leaves taken from plants are analyzed with the help of an integrated electronic area meter (Casierra Posada Peña Z G. R. & Peña Olmos J. E., 2007).
The leaf area was evaluated for a young leaf, which has reached its maximum development per plant of each treatment per variety at the end of the trial, i.e., on day 120 after planting. In the R.G 22 variety, the soil type factor influenced the leaf area since it differed statistically ($p \leq 0.05$) between the soil irrigated with clean water and the soil irrigated with wastewater (Table 3). Likewise, the bacterial consortium factor had significant differences between inoculation and control treatments.
The variety R.G.19 presented statistical differences ($p \leq 0.05$) in the factors of soil type and bacterial consortium. The leaf area was lower at the soil level, irrigated with residual, and at the control level, the treatment in which the seed was not inoculated.
The leaf area of the R.N. 22 variety had significant differences ($p \leq 0.05$) in the stress condition factor, reducing in exposure to $CuSO_4$. In addition, the bacterial consortium was statistically different from the control treatment.

Table 3. Leaf area (cm^2) by factor and level.
Tabla 3. Área foliar (cm^2) por factor y nivel.

Factors and levels	**Variety**		
	R.G. 22	R.G. 19	R.N. 22
Soil type			
Soil irrigated with clean water	103.46 b	100.76 b	35.40 a
Soil irrigated with wastewater	68.06 a	72.69 a	34.71 a
Stress condition			
Without $CuSO_4$	86.57 a	85.70 a	37.74 b
With $CuSO_4$	84.95 a	87.75 a	32.36 a

Bacterial consortium			
Control	73.17 a	74.25 a	30.22 a
1	86.41 ab	92.45 b	36.25 ab
3	97.71 b	93.48 b	38.69 b

Note: Averages with the same letter per column do not differ statistically (Tukey, $p \leq 0.05$).

The leaf area is an indicator of photosynthetic efficiency since several processes are carried out in plants, such as leaf senescence, fruit ripening, internode elongation, dormancy, closure and opening of stomata, etc., which are regulated by phytohormones (auxins, gibberellins, cytokinins, abscisic acid, and ethylene) (Daza-Martínez *et al.*, 2018).
In the varieties R.G. 22 and R.N. 22, the bacterial consortium 3 was the one that presented a significant increase with respect to the control; in the variety R.G. 19, the two consortia had a positive effect, observing an increase in the leaf area.

Root length
The root length evaluated at 120 days after planting in the variety R.G. 22 differed statistically ($P \leq 0.05$) in the soil type factor (Table 4), reducing in the soil irrigated with wastewater, in the same way, in the bacterial consortium factor consortium 1, which includes the *P. putida* bacteria, *P. fluorescens*, and A9 showed significant differences in relation to the control treatment.
The root is the bottom of the plant's shaft and is usually buried in the soil, although roots develop in the air or water. A plant's set of roots in the soil is called the root system. The roots' main functions are fixing the plant to the soil and absorbing water and mineral salts. Other functions are storage, the synthesis of plant hormones, the aeration of the plant in aquatic environments, as a means of propagation of new plants, etc. In many species, the root is symbiontly associated with certain species of fungi to form mycorrhizae, and some plants, such as legumes, can also associate with bacteria in a symbiotic way, forming structures called nodules (Megías *et al.*, 2020).
On the other hand, in the variety R.G. 19, there were significant differences ($p \leq 0.05$) for the bacterial consortium factor, where consortium 3, made up of bacteria A, D, and A7, had a longer root length than the control.
In the case of the R.N. 22 variety, the statistical difference ($p \leq 0.05$) was presented for the bacterial consortium factor between the control and the two bacterial consortia used.

Table 4. Root length (cm) by factor and level.
Tabla 4. Longitud de raíz (cm) por factor y nivel.

Factors and levels	**Variety**		
	R.G. 22	R.G. 19	R.N. 22
Soil type			
Soil irrigated with clean water	39.44 b	36.61 a	33.67 a
Soil irrigated with wastewater	34.94 a	36.44 a	32.50 a
Stress condition			
Without $CuSO_4$	37.11 a	37.78 a	33.39 a
With $CuSO_4$	37.28 a	35.28 a	32.78 a
Bacterial consortium			
Control	33.67 a	32.33 a	29.00 a
1	41.58 b	37.83 ab	35.17 b
3	36.33 ab	39.42 b	35.08 b

Note: a) Control treatment, b) Inoculation treatment with consortium 1, c) Inoculation treatment with consortium 3.

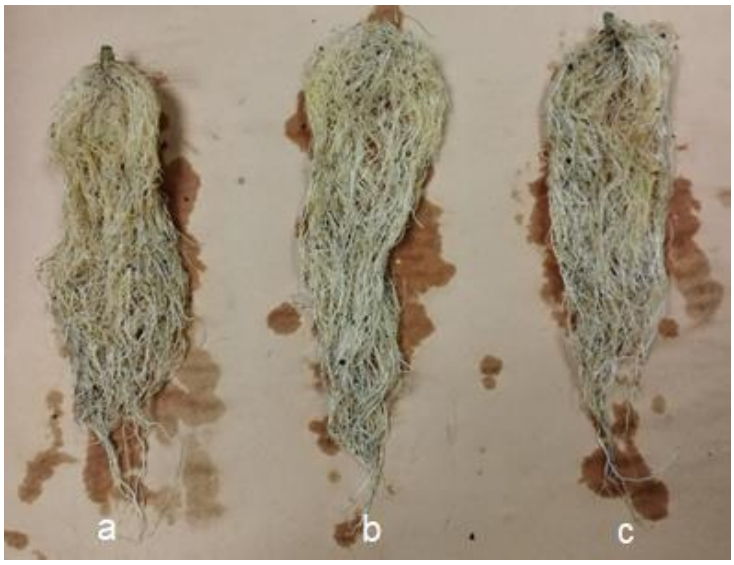


Figure 6. Tomato plant root.
Figura 6. Raíz de la planta de tomate.

A stage essential for plant growth-promoting bacteria to promote plant development is the colonization of the root system. Root colonization includes four stages: attraction, recognition, adhesion, and invasion, all of which are affected by biotic and abiotic factors. Microorganisms that settle on seeds during germination can grow and colonize the roots to their full extent. Seed colonization during the impregnation or immersion phase significantly affects plant growth (Moreno Reséndez *et al.*, 2018).
In this study, in the R.G. 22 variety, the results obtained with the bacterial consortium 1 differ statistically from the control; in the R.G. 19 variety, the bacterial consortium 3 had a positive effect and differed from the control; in the R.N 22 variety, a favorable response was presented with the use of the two consortia. Similarly, (Lyu *et al.*, 2021) point out that root length has a greater development by inoculating with plant growth-promoting bacteria in tomato cultivation under greenhouse conditions.

Root volume
Considering the soil type factor, the three varieties had significant differences ($P \leq 0.05$) in the root volume variable (Table 5), reducing considerably in the soil historically irrigated with wastewater. On the contrary, no statistically significant differences existed in the stress condition factor. Regarding the bacterial consortium factor, in the R.G. 22 variety, the root volume differed statistically between the control treatment and the inoculation treatment with the number 1 consortium.

Table 5. Root volume (cm^3) by factor and level.
Tabla 5. Volumen radicular (cm3) según factor y nivel.

Factors and levels	**Variety**		
	R.G. 22	R.G. 19	R.N. 22
Soil type			
Soil irrigated with clean water	30.28 b	28.61 b	22.50 b
Soil irrigated with wastewater	23.33 a	23.06 a	14.17 a
Stress condition			
Without $CuSO_4$	25.83 a	26.39 a	18.61 a
With $CuSO_4$	27.78 a	25.28 a	18.06 a
Bacterial consortium			
Control	22.08 a	25.83 a	17.50 a
1	30.42 b	23.75 a	18.33 a
3	27.92 ab	27.92 a	19.17 a

Note: Averages with the same letter per column do not differ statistically (Tukey, $p \leq 0.05$).

Bacteria can be important plant allies since some, in interaction, produce various metabolites that stimulate or inhibit metabolic pathways that favor plant growth. In tomato cultivation, the plants benefit from their interaction with these bacteria.
Likewise, (Daza-Martínez *et al.*, 2018) indicates that the use of growth-promoting bacteria in tomato cultivation stimulates the development of the root system, presenting a greater volume, which coincides with the results obtained in the R.G. 22 Variety-

DISCUSSION

With the increasing prominence of environmental issues, reducing the use of chemical synthetic fertilizers and pesticides have become a consensus among people (Keeler, B.L., 2016). Microbial interactions in the rhizosphere with plant growth-promoting microorganisms can act as a desired approach to enhancing plant productivity, promoting litter decomposition and soil fertility, and accelerating nutrient cycling (Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018). In many plants, such as potato (*Solanum tuberosum*), tomato (*Lycopersicum esculentum*), coliflor (*Arabidopsis thaliana*), and maize (*Zea mays*), it has been shown that microbial combinations have a greater potential to promote plant growth compared to the application of single bacterial strains (Rolli *et al.*, 2015; Rivett *et al.*, 2018).

Days to flowering
Days to flowering. The flower is the reproductive organ of most plants. The spermatophyte group, i.e., seeded plants, is represented by gymnosperms and angiosperms. Both groups of plants have flowers, but in the case of gymnosperms, the flowers are inflorescences that will not give rise to a fruit. On the contrary, angiosperms have typical flowers that, after fertilization, will form seeds enclosed in fruits (Megías *et al.*, 2020). Flowers appear during the plants' reproductive season through a process called flowering. Like all plant organs, flowers originate from meristematic activity. The apical meristem transforms size, organization, and mitotic activity and becomes an apex for reproduction (Megías *et al.*, 2020). (Morales Castillo H., 2009) indicates that tomato varieties of certain growth begin between 55 and 60 days after planting, while those of indeterminate growth begin between 65 and 75 days after planting.
The variable days to flowering only presented statistically significant differences in the variety R.G. 22 in the soil type factor ($P \leq 0.05$), increasing 9.13% the time flowering occurred in the soil historically irrigated with wastewater in relation to the soil irrigated with clean water.

Although statistically, this variable did not vary in the soil type of the R.G. 19 variety and in the R.N. 22 variety, the flowering time also increased. Bacterial consortia did not influence the days of flowering in the tomato crop, which counted from planting. In the results obtained by (Carrillo Castaneda et al., 2000), there were significant differences in the number of days to flowering of plants inoculated with bacterial strains; however, according to the type of strain used, this difference was positive generating precocity, or negative prolonging the flowering process, compared to the control.

Bacterial consortia did not influence the days of flowering in the tomato crop, which counted from planting. In the results obtained by (Carrillo Castaneda *et al.*, 2000), there were significant differences in the number of days to flowering of plants inoculated with bacterial strains; however, according to the type of strain used, this difference was positive generating precocity, or negative prolonging the flowering process, compared to the control.

Leaf area

The leaf area's magnitude defines the vegetation cover's ability to intercept photosynthetically active radiation (PAR), which is the primary source of energy used by plants to manufacture tissues and produce food compounds (Warnock *et al.*, 2006). Leaf area is an important variable in most agricultural and physiological studies involved in plant growth, light harvesting, photosynthetic efficiency, respiration, and transpiration. Leaf area determination is generally performed by direct methods, in which leaves taken from plants are analyzed with the help of an integrated electronic area meter (Casierra Posada Peña Z G. R. & Peña Olmos J. E., 2007). The leaf area was evaluated for a young leaf, which reached its maximum development per plant of each treatment per variety at the end of the trial, i.e., on day 120 after planting, the leaf area increased by 25% with respect to the control treatment. In the R.G 22 variety, the soil type factor influenced the leaf area since it differed statistically ($p \leq 0.05$) between the soil irrigated with clean water and irrigated with wastewater. Likewise, the bacterial consortium factor had significant differences between inoculation and control treatments.

The variety R.G.19 presented statistical differences ($p \leq 0.05$) in soil type and bacterial consortium factors. The leaf area was lower at the soil level irrigated with residual and at the control level, the treatment in which the seed was not inoculated. The leaf area of the Rn 22 variety had significant differences ($p \leq 0.05$) in the stress condition factor, reducing exposure to $CuSO_4$. In addition, the bacterial consortium was statistically different from the control treatment.

The leaf area is an indicator of photosynthetic efficiency since several processes are carried out in plants, such as leaf senescence, fruit ripening, internode elongation, dormancy, closure, and opening of stomata, which are regulated by phytohormones (auxins, gibberellins, cytokinins, abscisic acid, and ethylene) (Daza-Martínez *et al.*, 2018). In their research (Daza-Martínez *et al.*, 2018) pointed out that the leaf area of the tomato crop through the use of bacteria increases with respect to the control, which coincides with the results obtained. In the varieties R.G. 22 and the bacterial consortium 3 was the one that presented a significant increase (25%) with respect to the control; in the variety R.G. 19, the two consortia had a positive effect, observing an increase in the leaf area.

Root Length

The root is the lower part of the plant's shaft and is usually buried in the ground, although roots develop in the air or in water. A plant's set of roots in the soil is called the root system. The roots' main functions are fixing the plant to the soil and absorbing water and mineral salts. Other functions are storage, the synthesis of plant hormones, the aeration of the plant in aquatic environments, and the propagation of new plants. In many species, the root is associated in a symbiotic way with certain species of fungi to form mycorrhizae. Also, some plants, such as legumes, can associate with bacteria in a symbiotic way, forming structures called nodules (Megías *et al.*, 2020).

The root length evaluated at 120 days after planting in the variety R.G. 22 differed statistically ($p \leq 0.05$) in the soil type factor, reducing in the soil irrigated with wastewater, in the same way, in the bacterial consortium factor consortium 1, which includes the *P. putida* bacteria, *P. fluorescens*, and A9 showed significant differences in relation to the control treatment.

On the other hand, in the variety R.G. 19, there were significant differences ($p \leq 0.05$) for the bacterial consortium factor, where consortium 3, made up of bacteria A, D, and A7, had a longer root length than the control.

In the case of the R.N. 22 variety, the statistical difference ($p \leq 0.05$) was presented for the bacterial consortium factor between the control and the two bacterial consortia used. A stage essential for plant growth-promoting bacteria to promote plant development is the colonization of their root system. Root colonization includes four stages: attraction, recognition, adhesion, and invasion, all affected by biotic and abiotic factors. Microorganisms that settle on seeds during germination can grow and colonize the roots to their full extent. Seed colonization during the impregnation or immersion phase significantly affects plant growth (Moreno Reséndez *et al.*, 2018).

In this study, in the R.G. 22 variety, the results obtained with the bacterial consortium 1 differ statistically from the control; in the R.G. 19 variety, the bacterial consortium 3 had a positive effect and differed from the control; in the Rn 22 variety, a favorable response was presented with the use of the two consortia. Similarly (Sánchez López D. B., Garrido Rubiano M. F. & Bonilla Buitrago R. R, 2018) point out that root length has a greater development by inoculating with plant growth-promoting bacteria in tomato cultivation under greenhouse conditions.

Root volume Considering the soil type factor, the three varieties had significant differences ($p \leq 0.05$) in the root volume variable (Table 4), reducing considerably in the soil historically irrigated with wastewater. On the contrary, no statistically significant differences existed in the stress condition factor. Regarding the bacterial consortium factor, in the R.G. 22 variety, the root volume differed statistically between the control treatment and the inoculation treatment with the number one consortium.

Bacteria can be important plant allies since some, in interaction, produce various metabolites that stimulate or inhibit metabolic pathways that favor plant growth. In tomato cultivation, the plants benefit from their interaction with these bacteria. The root volume of the inoculated plants was greater than that of the non-inoculated plants, improving their ability to explore and enabling them to assimilate nutrients better (Andrade-Sifuentes *et al.*, 2022).

Likewise, (Daza-Martínez *et al.*, 2018) indicates that the use of growth-promoting bacteria in tomato cultivation stimulates the development of the root system, presenting a greater volume, which coincides with the results obtained in the R.G. 22 variety.

CONCLUSIONS

Factors such as temperature, seed hydration, and seed storage time determined the germination process. In addition, pre-germination hydration treatments allowed seeds to recover their germination capacity with a long storage time.

The evaluations of the seedling response in vitro and the greenhouse to inoculation were similar, so the two evaluations allowed to verify that bacterial consortia 1 and 3 had a positive effect on seedling development. Using bacterial consortia, the development of tomatoes grown under copper stress conditions and in soils historically irrigated with wastewater for 120 days was promoted. In the R.G. 22 variety, bacterial consortium 1 (P. putida, P. fluorescens, and A9) had a greater influence on plant development; in the R.G. 19 variety, the best response occurred with the use of bacterial consortium 3 (A, D, A7) and in the Rn 22 variety, the use of the two bacterial consortia (1 and 3) favored plant development.

In this way, bacterial consortia 1 and 3 promoted the development of the tomato plant grown under copper stress conditions and in soils irrigated with wastewater. However, differences between varieties were presented. The R.G. 22 variety, through the use of bacterial consortium one that includes the bacteria *P. putida*, *P. fluorescens*, and A9, presented significant differences in relation to the control treatment. The length of the stem and 3% diameter of the stem were increased, the length was increased by 14% and volume by 33% of the root, and the dry biomass of the aerial part increased by 14%, with respect to the control. In the R.G. 19 variety, through the use of bacterial consortium 3, there was a 25% increase in stem length, 7% in root, 13% in the dry biomass of the aerial part, and 25% in leaf area. In the R.N. 22 variety, through the use of

consortia 1 and 3, there was an increase in the number of leaves, 20% length and 60% root biomass, and 17% in the dry biomass of the aerial part, compared to the control.

ACKNOWLEDGMENTS

We are grateful to the Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías CONAHCYT, for awarding a scholarship for a Master's degree in science, which financed this research.

REFERENCES

Andrade-Sifuentes, A., Fortis-Hernández, M., Preciado-Rangel, P., Sáenz-Mata, J., Coria-Arellano, Y., & Guigón López, C. (2022). Promoción del crecimiento de tomate saladette con *Bacillus cereus* y estiércol solarizado en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *13*(7). https://doi.org/10.29312/remexca.v13i7.3120

Antar, M., Gopal, P., Msimbira, L. A., Naamala, J., Nazari, M., Overbeek, W., Backer, R., & Smith, D. L. (2021). *Inter-Organismal Signaling in the Rhizosphere*. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6125-2_13

Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 871). https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473

Carrillo Castaneda, G., Munoz, J. J., Landa, D. R., & Garcia, R. M. (2000). Aumento del rendimiento de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) cuando la raíz se desarrolla colonizada por microorganismos. *Biotecnologia Aplicada*, *17*(3).

Casierra Posada Peña Z G. R. & Peña Olmos J. E., F. (2007). Estimación indirecta área foliar en *Fragaria vesca* L., *Physalis peruviana* L., *Acca sellowiana* (Berg.) Burret, *Rubus glaucus* L., *Passiflora mollissima* (Kunth) L. H. Bailey y *Ficus carica* L. In *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. https://doi.org/10.31910/rudca.v11.n1.2008.606

Castillo Rogel, R. T., More Calero, F. J., Cornejo La Torre, M., Fernández Ponce, J. N., & Mialhe Matonnier, E. L. (2020). Aislamiento de bacterias con potencial biorremediador y análisis de comunidades bacterianas de zona impactada por derrame de petróleo en Condorcanqui – Amazonas – Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, *22*(3), 2015–2225. https://doi.org/10.18271/ria.2020.656

Daza-Martínez, Y. M., Almaraz-Suarez, J. J. E., Rodríguez-Mendoza, M. N., Angulo-Castro, A., & Silva-Rojas, H. V. (2018). Aislamiento de rizobacterias asociadas a tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y su potencial para promover crecimiento vegetal. *Informacion Tecnica Economica Agraria*. https://doi.org/10.12706/itea.2021.036

de Andrade, L. A., Santos, C. H. B., Frezarin, E. T., Sales, L. R., & Rigobelo, E. C. (2023). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production. In *Microorganisms* (Vol. 11, Issue 4). https://doi.org/10.3390/microorganisms11041088

Gupta, B., & Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical, and molecular characterization. In *International Journal of Genomics* (Vol. 2014). https://doi.org/10.1155/2014/701596

Hasan, A., Tabassum, B., Hashim, M., & Khan, N. (2024). Role of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) as a Plant Growth Enhancer for Sustainable Agriculture: A Review. *Bacteria*, *3*(2), 59–75. https://doi.org/10.3390/bacteria3020005

Hassanisaadi, M., Shahidi Bonjar, G. H., Hosseinipour, A., Abdolshahi, R., Barka, E. A., & Saadoun, I. (2021). Biological control of pythium aphanidermatum, the causal agent of tomato root rot by two streptomyces root symbionts. *Agronomy*, *11*(5). https://doi.org/10.3390/agronomy11050846

He, Y., Pantigoso, H. A., Wu, Z., & Vivanco, J. M. (2019). Co-inoculation of *Bacillus* sp. and *Pseudomonas putida* at different development stages acts as a biostimulant to promote growth, yield and nutrient uptake of tomato. *Journal of Applied Microbiology*, *127*(1). https://doi.org/10.1111/jam.14273

Khatoon, Z., Huang, S., Rafique, M., Fakhar, A., Kamran, M. A., & Santoyo, G. (2020). Unlocking the potential of plant growth-promoting rhizobacteria on soil health and the sustainability of agricultural systems. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 273). https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111118

Kumar, A., Maurya, B. R., Raghuwanshi, R., Meena, V. S., & Tofazzal Islam, M. (2017). Co-inoculation with Enterobacter and Rhizobacteria on Yield and Nutrient Uptake by Wheat (*Triticum aestivum* L.) in the Alluvial Soil Under Indo-Gangetic Plain of India. *Journal of Plant Growth Regulation*, *36*(3). https://doi.org/10.1007/s00344-016-9663-5

Lyu, D., Zajonc, J., Pagé, A., Tanney, C. A. S., Shah, A., Monjezi, N., Msimbira, L. A., Antar, M., Nazari, M., Backer, R., & Smith, D. L. (2021). Plant holobiont theory: The phytomicrobiome plays a central role in evolution and success. In *Microorganisms* (Vol. 9, Issue 4). https://doi.org/10.3390/microorganisms9040675

Megías, M., Molist, P., & Pombal, M. A. (2020). Atlas de Histología Vegetal y Animal: Tejidos Vegetales. In *Universidad de Vigo*.

Mohammadipanah, F., & Dehhaghi, M. (2017). Classification and taxonomy of actinobacteria. In *Biology and Biotechnology of Actinobacteria*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-60339-1_4

Montaño Méndez, I. E., Valenzuela Patrón, I. N., & Villavicencio López, K. V. (2021). Competitividad del tomate rojo de México en el mercado internacional: análisis 2003-2017. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *12*(7). https://doi.org/10.29312/remexca.v12i7.2531

Moreno Reséndez, A., García Mendoza, V., Reyes Carrillo, J. L., Vásquez Arroyo, J., & Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sustentable. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *20*(1). https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v20n1.73707

Osakabe, Y., Osakabe, K., Shinozaki, K., & Tran, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. In *Frontiers in Plant Science* (Vol. 5, Issue MAR). Frontiers Research Foundation. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086

Paice, E. (2022). By 2050, a quarter of the world's people will be African – this will shape our future. In *The Guardian*.

Rivett, D. W., Jones, M. L., Ramoneda, J., Mombrikotb, S. B., Ransome, E., & Bell, T. (2018). Elevated success of multispecies bacterial invasions impacts community composition during ecological succession. In *Ecology Letters* (Vol. 21, Issue 4). https://doi.org/10.1111/ele.12916

Rodríguez-Caballero, E., Castro, A. J., Chamizo, S., Quintas-Soriano, C., Garcia-Llorente, M., Cantón, Y., & Weber, B. (2018). Ecosystem services provided by biocrusts: From ecosystem functions to social values. *Journal of Arid Environments*, *159*. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.005

Rolli, E., Marasco, R., Vigani, G., Ettoumi, B., Mapelli, F., Deangelis, M. L., Gandolfi, C., Casati, E., Previtali, F., Gerbino, R., Pierotti Cei, F., Borin, S., Sorlini, C., Zocchi, G., & Daffonchio, D. (2015). Improved plant resistance to drought is promoted by the root-associated microbiome as a water stress-dependent trait. *Environmental Microbiology*, *17*(2). https://doi.org/10.1111/1462-2920.12439

Sánchez López D. B. Garrido Rubiano M. F. & Bonilla Buitrago R. R, G.-V. R. M. (2018). Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, *3 (7)*, 1401–1415. https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1346

Shah, A., Nazari, M., Antar, M., Msimbira, L. A., Naamala, J., Lyu, D., Rabileh, M., Zajonc, J., & Smith, D. L. (2021). PGPR in Agriculture: A Sustainable Approach to Increasing Climate Change Resilience. In *Frontiers in Sustainable Food Systems* (Vol. 5). https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.667546

Recibido:
3/agosto/2024

Aceptado:
12/enero/2025

Torres Rodríguez, D. (2003). El papel de los microorganismos en la biodegradación de compuestos tóxicos. *Ecosistemas*, *12 (2)*, 1–5. https://www.redalyc.org/pdf/540/54012219.pdf

United Nations. (2019). *Population Facts December*.

Vacheron, J., Desbrosses, G., Bouffaud, M. L., Touraine, B., Moënne-Loccoz, Y., Muller, D., Legendre, L., Wisniewski-Dyé, F., & Prigent-Combaret, C. (2013). Plant growth-promoting rhizobacteria and root system functioning. *Frontiers in Plant Science*, *4*(SEP). https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00356

Warnock, R., Valenzuela, J., Trujillo, A., & Madriz, P. (2006). Área Foliar, Componentes del Área foliar y rendimiento de seis genotipos de caraota 1. *Agronomia Trop*, *56*(1).

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

ESPECIES DE *Meloidogyne* ASOCIADAS A CULTIVOS HORTÍCOLAS EN EL VALLE DE TEPEACA, PUEBLA, MÉXICO

ROOT-KNOT NEMATODE *Meloidogyne* spp. IN VEGETABLES CROPS FROM THE TEPEACA VALLEY, PUEBLA, MEXICO

Medina Canales, Ma.G., A.K. Alquicira Jimenez, N. García Aguilar, I.M. Escobar Ávila, A. Tovar Soto

ESPECIES DE *Meloidogyne* ASOCIADAS A CULTIVOS HORTÍCOLAS EN EL VALLE DE TEPEACA, PUEBLA, MÉXICO
ROOT-KNOT NEMATODE *Meloidogyne* spp. IN VEGETABLES CROPS FROM THE TEPEACA VALLEY, PUEBLA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. **60**: 291-305 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.17

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 00-00 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Especies de *Meloidogyne* asociadas a cultivos hortícolas en el Valle de Tepeaca, Puebla, México

Root-knot nematode *Meloidogyne* spp. in vegetables crops from the Tepeaca Valley, Puebla, Mexico

María Gabriela Medina-Canales / mmedinac@ipn.mx
https://orcid.org/0000-0002-4421-3249
Ana Karen Alquicira-Jiménez
Ilia Mariana Escobar-Ávila https://orcid.org/0000-0002-6877-4630
Norma García-Aguilar
Alejandro Tovar-Soto https://orcid.org/0000-0001-9847-4711
Laboratorio de Nematología Agrícola, Departamento de Parasitología, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional. CDMX, México

Medina Canales, M.G., A.K. Alquicira Jimenez, N. García Aguilar, I.M. Escobar Ávila, A. Tovar Soto

ESPECIES DE *Meloidogyne* ASOCIADAS A CULTIVOS HORTÍCOLAS EN EL VALLE DE TEPEACA, PUEBLA, MÉXICO

ROOT-KNOT NEMATODE *Meloidogyne* spp. IN VEGETABLES CROPS FROM THE TEPEACA VALLEY, PUEBLA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 291-305. Julio 2025

DOI:

10.18387/polibotanica.60.17

RESUMEN: El objetivo fue identificar especies de *Meloidogyne* asociadas a hortalizas del Valle de Tepeaca, Puebla, utilizando la técnica de fenotipos isoenzimáticos de esterasa (EST) y malato deshidrogenasa (MDH), conjuntamente, con la técnica morfológica descriptiva del patrón perineal de hembras. Durante 2018-2019 se muestrearon suelo y raíces de hortalizas con agallas de campos sembrados con zanahoria, cilantro, betabel y calabaza. De cada una de las raíces de estos cultivos se obtuvieron 40 hembras, a las que se extrajeron proteínas por disgregación mecánica, luego se separaron por electroforesis en geles de poliacrilamida. Posteriormente las isoenzimas se revelaron para conocer la movilidad relativa (Rm); por otro parte, con la cutícula de las hembras se realizaron cortes con lo que se analizó la morfología de los patrones perineales para corroborar la identificación conjuntamente. Los resultados mostraron que en los cultivos muestreados se encontraron los fenotipos isoenzimáticos de EST: A1, A2a, A3, VSF-S1, H1, I1, J2a y M2, mientras que para MDH se obtuvieron los fenotipos: N1, N1a, N1e y N2a; asociados a las especies: *M. incognita, M. arenaria*, *M. javanica, M. hapla*, *M. chitwoodi*, y *M. enterolobii*; también se encontraron los fenotipos G1, G1-VF1 para EST y N1d para MDH los que no pudieron asociarse a alguna especie conocida. Los patrones perineales mostraron concordancia con los resultados obtenidos por los fenotipos isoenzimáticos. Resulta relevante el hallazgo de *M. javanica, M. chitwoodi* y *M. enterolobii* en la zona de estudio, ya que constituyen nuevos registros para la zona de estudio, y por ello deben tomarse las medidas necesarias para evitar su dispersión.

Palabras clave: *Beta vulgaris, Daucus carota*, esterasa, malato deshidrogenasa, patrones perineales, *Meloidogyne* spp.

ABSTRACT: The objective was to identify *Meloidogyne* species associated with vegetables from the Tepeaca Valley, Puebla, using the isozyme phenotypes esterase (EST) and malate dehydrogenase (MDH), together with the morphological technique descriptive of the perineal pattern of females. During 2018-2019, soil and roots with vegetable galls were sampled from fields planted with carrots, coriander, beets and pumpkin. From each of the roots of these cultures, 40 females were obtained from which proteins were extracted by mechanical disintegration, then separated by electrophoresis in polyacrylamide gels. Subsequently, the isoenzymes were revealed to know the relative mobility (Rm); On the other hand, cuts were made with the cuticle of the females to analyze the morphology of the perineal patterns to corroborate the joint identification. The results showed that in the sampled cultures the isoenzymatic phenotypes of EST were found, A1, A2a, A3, VSF-S1, H1, I1, J2a and M2, while for MDH the phenotypes were obtained: N1, N1a, N1e and N2a; associated with the species: *M. incógnita*, *M. arenaria*, *M. javanica*, *M. hapla*, *M. chitwoodi*, and *M. enterolobii*. The phenotypes G1,

Núm. 60: 291-305 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

G1-VF1 for EST and N1d for MDH were also found, which could not be associated with any known species. The perineal patterns showed agreement with the results obtained by the isoenzymatic phenotypes. The discovery of *M. javanica*, *M. chitwoodi* and *M. enterolobii* in the study area is relevant, since they constitute new records, and therefore the necessary measures must be taken to prevent their dispersion.
Key words: *Beta vulgaris, Daucus carota*, esterase, malate dehydrogenase, perineal pattern, *Meloidogyne* spp.

INTRODUCCIÓN

Los nematodos agalladores *Meloidogyne* spp. son de los patógenos del suelo más importantes que limitan la productividad de los cultivos (Brito *et al*., 2008). Muchas de las especies están ampliamente distribuidas a nivel mundial en donde ocasionan pérdidas severas a los rendimientos y a la calidad de las cosechas (Hunt y Handoo, 2009; Karssen *et al*., 2013; Subbotin *et al*., 2021; Desaeger, 2022; Wesemael *et al*., 2024); algunas de estas especies se encuentran en las diferentes regiones agrícolas de nuestro país, ocasionando mermas importantes a los rendimientos y a veces pérdidas totales al afectarse la calidad de las cosechas, esto último hace que pierdan su valor comercial (Medina-Canales *et al*., 2011; Medina-Canales *et al*., 2012; Medina-Molina *et al*., 2018; Cid del Prado-Vera *et al*., 2018; Cristóbal-Alejo *et al*., 2018). En México, la zona agrícola conocida como el Valle de Tepeaca, en el estado de Puebla, una importante zona productora de hortalizas para el mercado nacional, destaca por la producción de zanahoria (*Daucus carota* L.), cilantro (*Coriandrum sativum* L.), betabel (*Beta vulgaris* L.), calabaza (*Cucurbita pepo* L.), brocoli (*Brassica oleracea* var. italica L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.), col (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.), coliflor (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), entre otros (SIAP, 2020); en donde están presentes varias especies del nematodo agallador *Meloidogyne* como: *M. chitwoodi* (Montes-Belmont, 2000), *M. incognita* (Cid del Prado Vera *et al*., 2001), *M. arenaria* y *M. hapla* (Medina-Canales *et al*., 2011; Cid del Prado-Vera *et al*., 2018) y otras más atacando a éstas y a otras hortalizas. Autores como Medina-Canales *et al*. (2011, 2012) y Medina-Molina *et al*. (2018) han encontrado en la zona alta incidencia por estos nematodos en variedades comerciales de zanahoria y betabel; es frecuente que las pérdidas sean totales debido a que algunas de las cosechas al estar deformadas o con presencia de agallas prominentes pierdan su valor comercial. Hoy en día la identificación de las especies es de vital importancia, para contar con un diagnóstico preciso y oportuno y con ello poder diseñar programas de manejo para cada especie del nematodo y cultivo. La literatura actual hace referencia que para la identificación precisa de las especies de nematodos agalladores *Meloidogyne* es recomendable recurrir a métodos bioquímicos, moleculares y morfológicos entre los que debe de haber complementariedad (Carta *et al*.,2005; Powers & Ramírez-Suárez, 2012; Karssen *et al*., 2013; Wesemael *et al*., 2024). Los métodos bioquímicos, donde destacan los "fenotipos isoenzimáticos" de esterasa (EST) y malato deshidrogenasa (MDH), son muy valiosos para la identificación de las especies más importantes de *Meloidogyne*, son una herramienta estable, sensible, rápida, confiable y económica (Brito *et al*., 2010; Karssen *et al*., 2013; Subbotin *et al*., 2021, Wesemael *et al*., 2024). Esta herramienta es útil para estudios extensivos, en donde se busca evaluar la distribución de las especies, búsqueda de especies atípicas, permite detectar mezcla de especies en los cultivos (Souza, 2008). Esta prueba puede ser confirmatoria y complementaria a los datos morfológicos en especial con el patrón perineal de hembras (Hunt & Handoo, 2012). En el caso de los métodos moleculares es indispensable elegir correctamente los marcadores moleculares a utilizar, ya que con algunos de éstos no es posible distinguir especies emparentadas cercanamente (Carta *et al*., 2005; Adams *et al*., 2007; Karssen *et al*., 2013; Wesemael *et al*., 2024); además de que requieren de equipo costoso y reactivos caros importados, lo que los hace poco atractivos y prácticos. Por su parte, la morfología sigue siendo de gran valor en la identificación de las especies de nematodos agalladores dentro de éstos destaca en particular el patrón perineal de hembras, una de las herramientas más frecuentemente utilizadas. Este patrón describe la morfología de la región posterior de las hembras adultas en donde se localizan la zona vulva-ano (perineo), la terminación de la cauda, los fasmidios, las líneas laterales rodeadas por estrías cuticulares, este conjunto de

caracteres son especie-específicos y por lo tanto de gran utilidad para la identificación de las especies (Hunt & Handoo, 2012; Karssen *et al*., 2013; Rosas-Hernández *et al*., 2024).
El objetivo del presente trabajo fue: Identificar las especies de *Meloidogyne* asociadas a hortalizas de la zona agrícola el Valle de Tepeaca, Puebla, utilizando la prueba de fenotipos isoenzimáticos de EST y MDH y complementar la identificación mediante la técnica morfológica de los patrones perineales de hembras adultas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolecta de material
Durante 2018-2019 se realizaron seis muestreos de suelo y raíces de diversas hortalizas en el municipio de Acatzingo, Puebla (18º 55º 30" y 19º 06' 18" Latitud Norte y 97º 48' 18" y 97º 59' 18" longitud oeste); dichos muestreos se programaron de tal forma que coincidieran con la madurez de los cultivos, pues durante este período las agallas producidas por los nematodos son más visibles, favoreciendo así el reconocimiento de plantas infectadas (Brito *et al.*, 2008). El muestreo se realizó de manera aleatoria en dos campos de zanahoria, uno de calabaza, uno de cilantro y uno de betabel. Estos campos fueron previamente muestreados y se detectó la presencia de este nematodo provocando poco crecimiento de plantas, agallas y deformaciones en las raíces (Medina-Canales *et al*., 2011; Medina-Molina *et al*., 2018).
La superficie muestreada en cada campo fue de aproximadamente una hectárea y en cada uno se recolectaron diez submuestras, las cuales constaron de 200 g de suelo y 100 g de raíces (Shurtleff & Averre, 2000). Cada muestra compuesta de cada cultivo se colocó en una bolsa de polietileno debidamente etiquetada con los datos de campo, las que se trasladaron al Laboratorio de Nematología Agrícola, del Departamento de Parasitología de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, en donde fueron procesadas (De la Jara-Alcocer *et al.*, 1994; Shurtleff & Averre, 2000).

Separación de raíces con agallas
Las raíces con agallas de cada muestra se separaron y lavaron con cuidado para eliminar el suelo adherido. Con ayuda de un estereomicroscopio y agujas de disección se extrajeron 40 hembras de 40 agallas (con sus respectivas masas de huevos) de cada campo muestreado, para determinar los fenotipos isoenzimáticos, analizar los patrones perineales y descartar mezcla de poblaciones (Brito *et al*., 2008; Medina-Canales *et al.*, 2014; Da Cunha *et al*., 2021).

Determinación de fenotipos isoenzimáticos

Extracción y electroforesis de proteínas
Para determinar el fenotipo EST, cada hembra recolectada (en total se trabajaron con 40 hembras de cada campo muestreado de manera independiente) se colocó en un portaobjetos con 20 µL del regulador de extracción (20 g de sacarosa o glicerol, 2 mL de tritón X-100, 100 mL agua bidestilada), se lisó con ayuda de una punta de jeringa de insulina, se retiró la cutícula para posteriormente obtener el patrón perineal; tanto el regulador como el contenido de la hembra se colocaron en un tubo Eppendorff. Los tubos se centrifugaron a 13,000 rpm durante 2 minutos y se guardaron a -20°C hasta su uso. Para determinar el fenotipo MDH, el procesamiento de las hembras fue similar, variando únicamente el regulador de extracción (20 g de sacarosa o glicerol, 0.1 g de TRIS, 0.1 g de ascorbato, 0.1 g cisteína, 100 mL de agua bidestilada, pH 8.0) (Esbenshade & Triantaphyllou, 1985; Carneiro *et al.*, 2024).
La electroforesis se realizó en geles de poliacrilamida, los cuales estuvieron formados por un gel separador con una concentración de acrilamida 12.5% y un gel concentrador al 18%. El gel se montó en una cámara de electroforesis vertical (EC® EU) y se colocó el regulador de corrimiento (TRIS 6 g, Glicina 28 g, Agua 1L, pH 8.3, Dilución 1:9) (Esbenshade & Triantaphyllou, 1985; Carneiro *et al.*, 2024).
A los extractos de proteínas obtenidas previamente, se les colocaron 5 µL de azul de bromofenol 0.02% y la mezcla se colocó en los pozos del gel de poliacrilamida; el gel se dejó correr durante 30 minutos a 80 volts y después 70 minutos a 250 volts; se lavó con agua bidestilada y se realizó

una tinción a 37°C durante 1 hora con la solución para teñir a la isoenzima de interés. Para los fenotipos isoenzimáticos EST se utilizaron 100 mL de regulador fosfatos, 30 mg de EDTA, 60 mg de fastblue RR y 40 mg de α-naftilacetato diluidos en 2 mL acetona; para el caso de los fenotipos isoenzimáticos MDH se utilizaron 10 mL de sol. A (10.6 g Na_2CO_3 + 13.4 g malato), 15 mL de sol. B (6.06 g TRIS, pH = 7.1), 50 mg de NAD, 30 mg de NBT, 50 mL de agua y 2 mg de PMS diluido en 26 mL de agua bidestilada (Esbenshade & Triantaphyllou, 1985; Carneiro *et al*., 2024).

Determinación del fenotipo isoenzimático

A partir del número de bandas y la movilidad electroforética se calculó la movilidad relativa (Rm) (Rm = distancia de migración de la banda proteica / la longitud de corrida total del gel x 100). Este índice es diferente entre especies de *Meloidogyne*, ya que a cada una le corresponde uno en específico.

Caracterización de patrones perineales

La cutícula obtenida anteriormente de 10 hembras de cada campo muestreado se colocó en un portaobjetos con una gota de ácido láctico al 45 %**,** se cortó ecuatorialmente con ayuda de una aguja de insulina. Después se hicieron los cortes de ajuste para tener el patrón perineal en forma de cuadrado. Cada patrón perineal se limpió cuidadosamente, posteriormente se transfirió a una gota de glicerina en un portaobjetos limpio, en donde se acomodó y se colocó un cubreobjetos, las preparaciones se etiquetaron con lo que quedaron listas para describir las características de los patrones de cada población (Hunt & Handoo 2012; Karssen *et al.*, 2013).

RESULTADOS

La tabla 1 indica los cultivos muestreados, las localidades georreferenciadas, los patrones isoenzimáticos encontrados y las especies de *Meloidogyne* identificadas.

Tabla 1. Fenotipos isoenzimáticos y especies de *Meloidogyne* encontradas en diferentes cultivos de hortalizas, así como su localidad de origen dentro del Valle de Tepeaca, Puebla.
Table 1. Isozyme phenotypes and species of *Meloidogyne* identify in different vegetable crops, as well as their locality of origin within the Tepeaca Valley, Puebla.

Planta Hospedante	Ubicación geográfica	Localidad Municipio	Fenotipo enzimático		Especies
			EST	MDH	
Zanahoria (*Daucus carota* L.)	N 18º 58´ 549” O 97º 47´ 878” 1900 msnm	El Cristo, Acatzingo	A1, A2a, A3	N1, N1e	*M. arenaria*
Calabacita (*Cucurbita pepo* L.)	N 18º 58´ 534” O 97º 47´ 855” 1900 msnm	El Cristo, Acatzingo	S1	N1a	*M. chitwodii*
Cilantro (*Coriandrum sativum* L.)	N 18º 96´ 792” O 97º 79´ 017” 2138 msnm	Santa María Actipa, Acatzingo	G1	N1a	*Meloidogyne* sp.1
			G1-VF1	N1	*Meloidogyne* sp.2
Betabel (*Beta vulgaris* L.)	N 18º 87´ 583” O 97º 79´ 796” 2170 msnm	Santa María Actipa, Acatzingo	S1	N1a	*M. chitwoodi*
			H1	H2	*M. hapla*

Planta Hospedante	Ubicación geográfica	Localidad Municipio	Fenotipo enzimático EST	Fenotipo enzimático MDH	Especies
			J2a	N1	*M. javanica*
Zanahoria (*Daucus carota* L.)	N 18º 97´ 429" O 97º 79´ 848" 2170 msnm	Santa María Actipa, Acatzingo	H1	N2a	*M. hapla*
			I1		*M. incognita*
			VSI-SI	N1d	*M. enterolobii*

Determinación de fenotipos isoenzimáticos y morfología del patrón perineal

Fenotipos de esterasa (EST)

Se encontraron once fenotipos de EST y 18 bandas importantes de actividad enzimática para las especies de *Meloidogyne* (Fig. 1) asociadas a zanahoria, cilantro, betabel y calabaza; además, se revisaron los patrones perineales, los cuales permitieron complementar la identificación con los fenotipos isoenzimáticos encontrados (Fig. 2). También se encontraron seis fenotipos de MDH y ocho bandas importantes de actividad enzimática (Fig. 1).

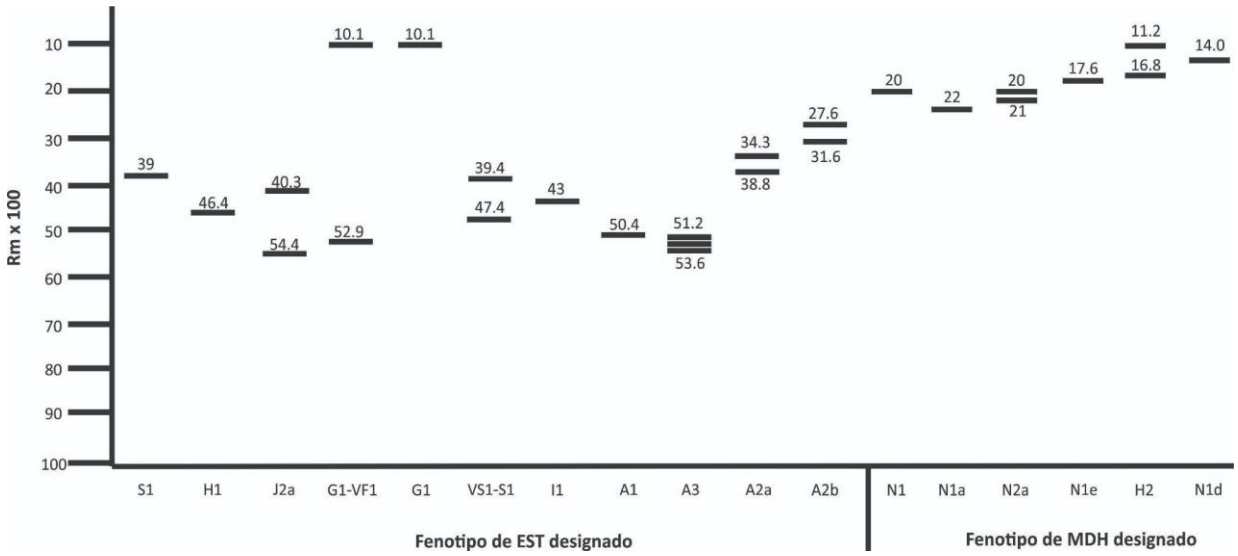


Figura 1. Representación esquemática de los fenotipos isoenzimáticos de EST y de MDH observados en *Meloidogyne* spp. provenientes de cultivos agrícolas el Valle de Tepeaca, Puebla.: S1 = *M. chitwoodi;* H1 = *M. hapla*; J2a = *M. javanica*; G1-VF1 = *Meloidogyne* sp. 1; G1 = *Meloidogyne* sp. 2, VS1-SI = *M. enterolobii,* I1 = *M. incognita*, A1, A3, A2a, A2b = *M. arenaria*. Fenotipos isoenzimáticos de MDH observados en *Meloidogyne* spp. N1= *M. javanica*, *M. arenaria*, *Meloidogyne* sp.2*;* N1a = *M. chitwoodi*, *Meloidogyne* sp.1; N2a = *M. incognita*; N1e = *M. arenaria;* H2 = *M. hapla*; N1d = No pudo asociarse a alguna especie.

Figure 1. Schematic representation of EST and MDH isoenzyme phenotypes observed in *Meloidogyne* spp. from different crops in the Tepeaca Valley, Puebla: S1 = *M. chitwoodi;* H1 = *M. hapla*; J2a = *M. javanica*; G1-VF1 = *Meloidogyne* sp. 1; G1 = *Meloidogyne* sp. 2, VS1-SI = *M. enterolobii,* I1 = *M. incognita*, A1, A3, A2a, A2b = *M. arenaria*. MDH isoenzyme phenotypes observed in *Meloidogyne* spp. N1= *M. javanica*, *M. arenaria*, *Meloidogyne* sp.2*;* N1a = *M. chitwoodi*, *Meloidogyne* sp.1; N2a = *M. incognita*; N1e = *M. arenaria;* H2 = *M. hapla*; N1d = Could not be associated with any species.

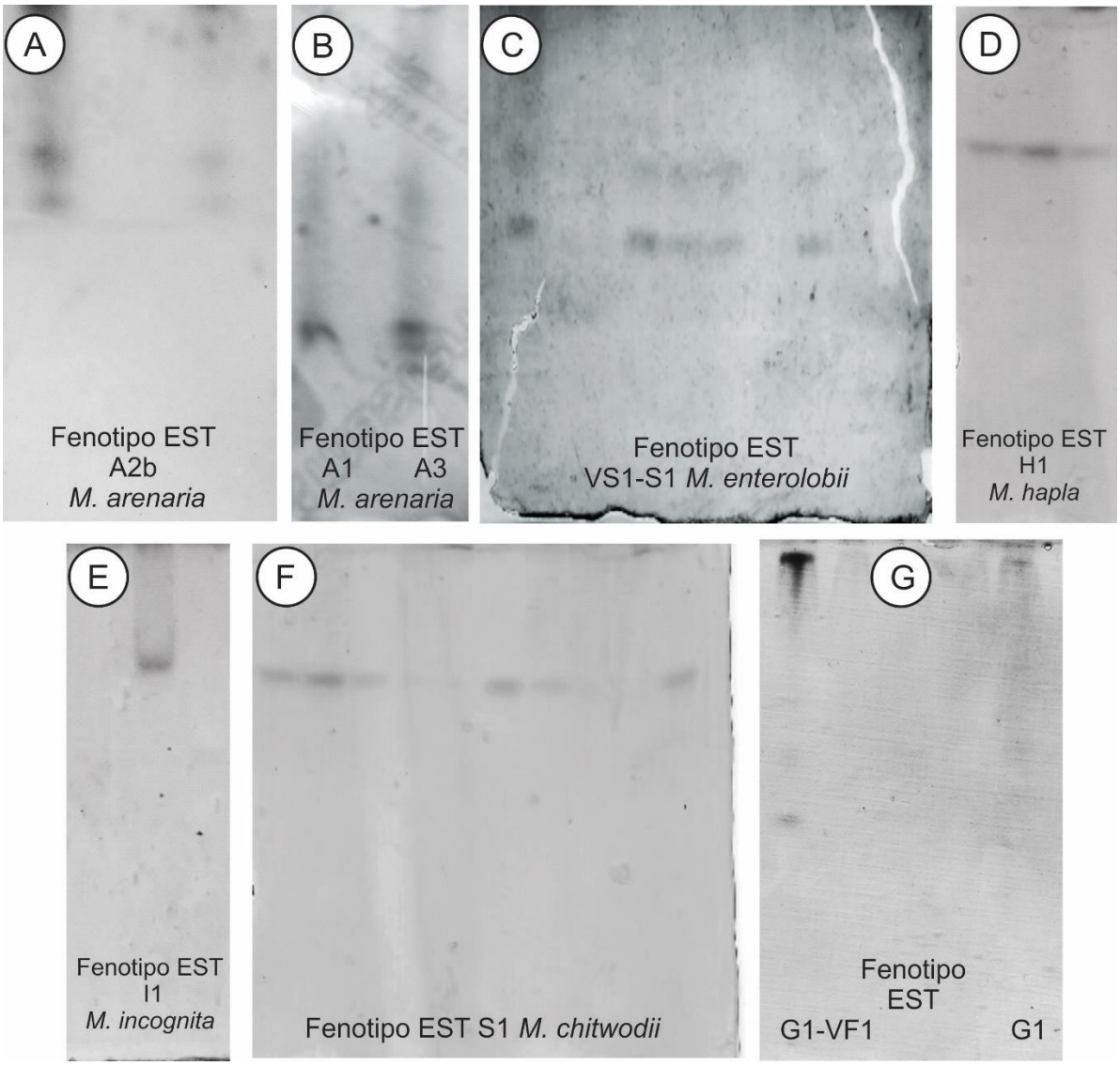


Figura 2. Zimograma de los fenotipos isoenzimáticos de EST de *Meloidogyne* spp. provenientes de cultivos agrícolas el Valle de Tepeaca, Puebla: A y B) Fenotipos de *M. arenaria*, C) Fenotipo VS1-S1 de *M. enterolobii*, D) Fenotipo H1 de *M. hapla*, E) Fenotipo I1 de *M. incognita*, F) Fenotipo S1 de *M. chitwodii*, G) Fenotipo G1-VF1 de *Meloidogyne* sp. 2 y G1 de *Meloidogyne* sp. 1.

Figure 2. Zymogram of the EST isoenzymatic phenotypes of *Meloidogyne* spp. from agricultural crops in the Tepeaca Valley Puebla: A y B) A1, A2b y A3 EST phenotypes of *M. arenaria*, C) VS1-S1 EST phenotypes of *M. enterolobii*, D) H1 EST phenotypes of *M. hapla*, E) I1 EST phenotypes of *M. incognita*, F) S1 EST phenotypes of *M. chitwodii*, G) G1-VF1 EST phenotypes of *Meloidogyne* sp. 2 and G1 of *Meloidogyne* sp. 1.

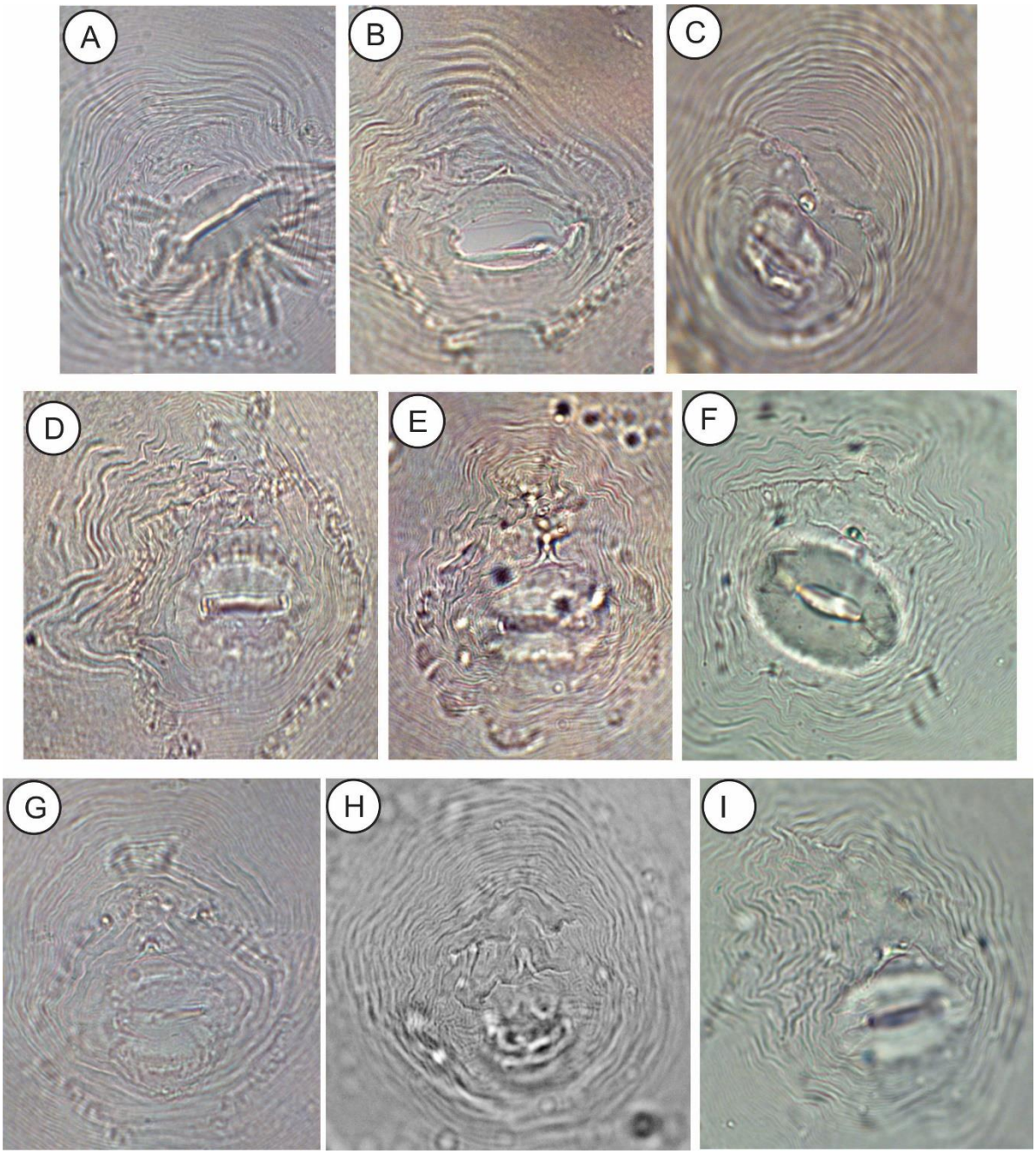


Figura 3. Patrón perineal de hembras de *Meloidogyne* spp. provenientes de cultivos agrícolas el Valle de Tepeaca, Puebla: A y B) patrón perineal de *M. arenaria*, C) Patrón perineal de *M. enterolobii*, D) Patrón perineal de *M. hapla*, E) Patrón perineal de *M. incognita*, F) Patrón perineal de *M. chitwodii*, G) patrón perineal de *M. javanica*, H) Patrón perineal de *Meloidogyne* sp. 1, I) Patrón perineal de *Meloidogyne* sp. 2.
Figure 3. Perineal pattern of *Meloidogyne* spp. females from agricultural crops in the Tepeaca Valley, Puebla: A and B) Perineal pattern of *M. arenaria*, C) Perineal pattern of *M. enterolobii*, D) Perineal pattern of *M. hapla*, E) Perineal pattern of *M. incognita*, F) Perineal pattern of *M. chitwodii*, G) Perineal pattern of *M. javanica*, H) Perineal pattern of *Meloidogyne* sp. 1, I) Perineal pattern of *Meloidogyne* sp. 2.

Los fenotipos correspondientes a *M. arenaria* fueron el A1 (Rm: 50.5), A3 (Rm: 51.2, 52.4, 53.6) y dos fenotipos atípicos designados como A2a (Rm: 34.3, 38.8) y A2b (Rm: 27.6, 31.6); todos se asociaron al cultivo de zanahoria (Tabla 1) (Figs. 1, 2A-B). El patrón perineal respectivo, fue redondeado con arco dorsal bajo, con hombreras en los costados formadas por ondulaciones pronunciadas de las estrías dorsales, cerca de las líneas laterales (Fig. 3A, B).
Meloidogyne chitwoodi presentó el fenotipo S1 (Rm: 38.2) y fue encontrado en los cultivos de calabaza y betabel (Tabla 1) (Figs. 1, 2 F). El patrón perineal se caracterizó por ser redondeado a ovalado con arco dorsal bajo, con estrías rotas cerca del área perineal, curvadas, retorcidas**,** líneas del campo lateral débilmente visibles (Fig. 3F).
El fenotipo I1 (Rm: 43) correspondió a *M. incognita* y se encontró asociado a zanahoria (Tabla 1) (Figs. 1, 2E). El patrón perineal característico de la especie presentó arco dorsal alto y cuadrado formado por estrías lisas a onduladas; algunas estrías se bifurcan cerca de las líneas laterales, aunque no claramente visibles (Fig. 3E).
Meloidogyne enterolobii presentó el fenotipo VSI-SI (=En2) (Rm: 39.4, 45.4) en zanahoria (Tabla 1) (Figs. 1, 2C); el patrón perineal fue de forma ovalada, con arco dorsal alto a veces redondeado a cuadrado, con estrías finas muy espaciadas, campo lateral ausente o con una sola línea en la unión de los arcos dorsal y ventral (Fig. 3C).
Meloidogyne hapla presentó el fenotipo H1 (Rm: 46.8) y se encontró asociado a betabel y zanahoria (Tabla 1) (Figs. 1, 2D); el patrón perineal correspondiente con arco dorsal bajo, redondeado a aplanado, con estrías onduladas que forman una o dos alas; las estrías lisas a onduladas se observaron puntuaciones arriba del ano (Fig. 3D).
El fenotipo J2a (Rm: 40.3, 54.4), (Figs. 1) correspondiente a *Meloidogyne javanica* asociado al cultivo de betabel (Tabla 1)*,* presentó un patrón perineal con arco dorsal bajo, ligeramente redondeado a aplanado, el rasgo característico de este patrón son las líneas laterales muy visibles que lo dividen en regiones dorsal y ventral (Fig. 3G).
Dos especies no se pudieron identificar provenientes del cultivo de cilantro y se les asignaron los fenotipos G1 (Rm: 10.1) y G1-VF1 (Rm: 10.1, 52.9); ambas correspondieron a especies no identificadas y se denominaron *Meloidogyne* sp. 1 y *Meloidogyne* sp. (Figs. 1, 2G) 2 (Tabla 1), estas hembras presentaron patrones perineales atípicos con arco dorsal alto, estrías onduladas, sin líneas del campo lateral visibles (Fig. 3H, I).

Fenotipos de malato deshidrogenasa (MDH)
Entre todas las poblaciones de *Meloidogyne* se observaron seis fenotipos diferentes y ocho bandas importantes de actividad para MDH (Fig. 1). El fenotipo designado como N1 (Rm: 20) correspondió a *M. javanica* y *M. arenaria*; ésta última también presentó el fenotipo atípico designado como N1e (Rm: 17.6). El N1a (Rm: 21) se asoció a *M. chitwoodi*, el N2a (Rm: 20, 21) a *M. incognita* y el H2 (Rm: 11.2, 16.8) a *M. hapla*. Además, en uno de los campos de zanahoria se encontró el fenotipo N1d (Rm: 14), el cual no pudo asociarse a alguna especie (Fig. 1) (Tabla 1).

DISCUSIÓN

En calabaza se encontró a *M. chitwoodi*, misma que presentó los fenotipos S1:N1a para EST y MDH, respectivamente; lo que coincide con lo reportado por Esbenshade & Triantaphyllou, (1985) respecto a la caracterización enzimática de esta especie. Este fenotipo no es especie-específico, ya que también lo presenta *M. plantani* (Esbenshade & Triantaphyllou, 1985), por lo que se recurrió a la observación del patrón perineal para confirmar la identificación, dicho patrón presentó arco dorsal bajo y cuadrado, con estrías onduladas y sin líneas del campo lateral, como lo mencionan (Hunt & Handoo 2009; Hunt & Handoo 2012; Karssen *et al*., 2013), ello aunado a los antecedentes de la presencia de *M. chitwoodii* parasitando zanahoria en la zona de estudio (Montes-Belmont, 2000). Esta especie se ha encontrado asociada a papa (*Solanum tuberosum* L.), zanahoria, jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), betabel (*Beta vulgaris* L.), girasol (*Helianthus annuus* L.), avena (*Avena* sativa L.) (Ferris *et al*., 1993; Cid del Prado-Vera *et al*., 2018), pero no en calabaza lo que representa un nuevo registro en la zona.
En betabel se identificó a *M. javanica*, *M. hapla* y *M. chitwoodi*. El hecho de que *M. javanica* se haya encontrado mezclada con *M. hapla* y *M. chitwoodi,* coincide con lo observado por otros

investigadores (Brito *et al.*, 2008). El fenotipo EST determinado en este estudio para *M. javanica* es J2a (atípico), el cual solo ha sido reportado en soya (*Glycine max* L.) en Brasil (Da Cunha *et al*., 2003; Machado *et al*., 2022) y en tabaco (*Nicotiana tabacum* L.) en Florida (Brito *et al*., 2008); los fenotipos de EST que comúnmente se han asociado a esta especie son el J2 y J3 (Carneiro *et al*., 1996; Cofcewicz *et al*., 2005; Molinari *et al*., 2005; Brito *et al*., 2008; Brito *et al*., 2010; Quénéhervé *et al*., 2011). A pesar de que *M. javanica* está ampliamente distribuida y tiene una amplia gama de hospedantes (Hunt & Handoo, 2009), el cultivo de betabel no ha sido reportado en México como hospedante y por ello este es el primer registro. Respecto a *M. hapla*, esta presentó el fenotipo H1 especie-específico, tal como se ha reportado en trabajos previos (Esbenshade & Triantaphyllou, 1985;Carneiro *et al.*, 1996; Carneiro *et al.*, 2000; Molinari, 2001; Brito *et al*., 2008), a pesar de que este fenotipo es especie-especifico en algunas ocasiones es necesario corroborar el fenotipo de otra enzima como la MDH, ya que puede haber diferencias en las movilidades electroforéticas debidas a las variaciones de la técnica y condiciones del laboratorio (Carneiro *et al.*, 1996).

En el presente trabajo los fenotipos H1 de *M. hapla* encontrado en betabel y el fenotipo I1 encontrados en *M. incognita* en zanahoria presentaron una movilidad electroforética similar; cuando los fenotipos de EST son muy similares es necesario analizar el fenotipo MDH. El fenotipo H2 de MDH en cultivo de betabel confirma que la especie asociada a este cultivo es *M. hapla;* dicho fenotipo ha sido reportado por Carneiro *et al*. (1996) en poblaciones provenientes de jitomate, lechuga (*Lactuca sativa* L.), café (*Coffea arabica* L.) y kiwi (*Actinidia deliciosa* Liang). Además, el patrón perineal presentó arco dorsal bajo, redondeado, con estrías que forman una o dos alas laterales y puntuaciones arriba del ano lo cual lo reporta (Wesemael *et al*., 2024) como característico de esta especie.

De los dos campos de zanahoria infestados con *Meloidogyne*, en el primero, localidad El Cristo, municipio de Acatzingo, Puebla, se encontraron las especies *M. incognita*, *M. enterolobii* y *M. hapla. Meloidogyne incognita* mostró el fenotipo I1 de EST el cual es especie especifico, este fenotipo es el más común para *M. incognita* y ha sido reportado en países como: Brasil, Estados Unidos, Paraguay, Colombia (Carneiro *et al.*, 1996; Molinari, 2001; Da Cunha *et al*., 2003; Carneiro *et al*., 2004; Molinari *et al*., 2005; Brito *et al*., 2008; Brito *et al*., 2010; Riascos et al., 2019; Resquín-Romero *et al*., 2023), además se determinó el fenotipo N2a de MDH el cual es poco común, ya que solo ha sido reportado en Florida asociado a una ornamental no identificada (Brito *et al*., 2010). La forma del patrón perineal presentó arco dorsal alto y cuadrado formado por estrías lisas a ondulada tal cual se reportan para *M. incognita* (Wesemael *et al*., 2024). Por lo que se confirma la especie usando tanto los fenotipos de EST, MDH y la forma del patrón perineal. *Meloidogyne incognita* es la especie más distribuida a nivel mundial, ya sea en forma individual o en mezcla con otras poblaciones (Trudgill *et al*., 2000), como en este caso. Es importante conocer cuando hay mezcla de especies porque se ha observado, que si éstas se reproducen por partenogénesis y bajo condiciones favorables del medio ambiente es factible la hibridación, dando lugar a nuevos fenotipos de MDH (Van Der Beek & Karssen, 1997).

Por su parte *M. enterolobii* mostró el fenotipo de EST VS1-S1 (= M2, = En2), el que ha sido reportado anteriormente en Brasil y es especie especifico (Carneiro *et al*., 2000; Souza *et al*., 2022), China (Xu *et al*., 2004), Florida (Brito *et al*., 2004), Martinica (Quénéhervé *et al*., 2011) y en Portugal (Santos *et al.*, 2019). En cuanto a la MDH se encontró el fenotipo N1a, coincidente con *M. enterolobii* (Carneiro *et al.*, 2000; Brito *et al*., 2004; Quénéhervé *et al.*, 2011). Con lo que respecta a la morfología del patrón perineal mostró arco dorsal redondeado, con estrías finas espaciadas y campo lateral ausente distintivo de esta especie (Wesemael *et al*., 2024); sin embargo, Brito *et al*. (2004), así como Perichi & Crozzoli, (2010) comentan que existe variabilidad en estos patrones, los que pueden ser confundidos con *M. incognita.* En este estudio *M. enterolobii* se encontró asociada a zanahoria, lo cual constituye un nuevo registro en el Estado de Puebla, pues esta especie ya había sido identificada en zanahoria en el estado de Veracruz (Salinas-Castro *et al*., 2022). Esta especie aparece en el panorama mundial como polífaga parasitando ornamentales, arvenses y una gran variedad de plantas de cultivo, entre ellas jitomate, pimiento (*Capsicum annuum* var. *annuum* L), perejil (*Petroselinum crispum* Mill.), papa, col (*Brassica oleracea* var. *esculenta* L.), calabaza, zanahoria, brócoli (*Brassica oleracea* var. *botrytis* L.), apio (*Apium graveolens* L.), *Cereus hildmannianus* (Cactaceae), *Lampranthus* sp. (Aizoaceae), *Physalis peruviana* (Solanaceae) y *Callistemon* sp. (Myrtaceae) (Wang *et al.*, 2004;

Rodríguez *et al*., 2007; Moens *et al*., 2009; Santos *et al*., 2019); además, se ha encontrado a *M. enterolobii* en poblaciones concomitantes, conviviendo con *M. incognita*, *M. arenaria* y *M. javanica* (Rodríguez *et al*., 2007; Santos *et al*., 2019; Cid del Prado-Vera *et al*., 2018; Carrillo-Fasio *et al*., 2020) tal y como se observó en este estudio. Es importante resaltar: Xu *et al*. (2004) determinaron que esta especie es conespecífica con *M. mayaguensis* debido a que los marcadores moleculares IGS (espaciador intergénico largo), COII (Citocromo oxidasa II) e rRNA (RNA ribosomal) son idénticos para ambas especies, al igual que el fenotipo de esterasa; además, existe gran similitud en la gama de hospedantes y la morfología. Por tal motivo, Brito *et al*. (2008) mencionan que ambos nombres son sinónimos; sin embargo, se prefiere referir como *M. enterolobii* debido a que esta especie fue descrita primero (Yang & Eisenback, 1983). Esta especie ha sido considerada una de las más importantes por su amplia distribución geográfica, se ha detectado su presencia en África, Estados Unidos, Sudamérica, Centroamérica y Europa (Moens *et al*., 2009), en México *M. enterolobii* fue identificada por primera vez en sandía (*Citrullus lanatus* var. *sunsugar*) en el estado de Veracruz (Ramírez-Suárez *et al*., 2014). Esta especie actualmente ha sido reportada en el estado de Sinaloa en tomate (*Solanum lycopersicum* L.), en papa (Cid del Prado-Vera *et al*., 2018; Carrillo-Fasio *et al*., 2020; Rosas-Hernández *et al*., 2024) y en Veracruz parasitando zanahoria (Salinas-Castro *et al*., 2022) en estos casos la identificación se realizó a nivel morfométrico y molecular.

En el campo de zanahoria de la localidad de Santa María Aticpa, municipio de Acatzingo se identificó a *M. arenaria*, con los fenotipos de EST A1, A2a, A2b y A3, lo cual concuerda con Esbenshade & Triantaphyllou, (1985) ya que esta especie es la que presenta mayor variabilidad intraespecífica y se le ha designado seis fenotipos (Murata *et al*., 2023; Carneiro *et al*., 2024). Los fenotipos de EST más comunes son A2 y A3 y han sido reportados en Brasil y Argentina (Carneiro *et al*., 1996; Carneiro *et al*., 2000; Da Cunha *et al*., 2003; García & Sánchez-Puerta, 2012). El fenotipo de EST A1 es poco común y solo ha sido reportado por Esbenshade & Triantaphyllou, (1985) y por Cofcewicz *et al*. (2005) en un cultivo de banana (*Musa paradisiaca* L.). Además, se observaron dos fenotipos atípicos designados en este estudio como A2a y A2b, estos han sido reportados en poblaciones de *M. arenaria* en Japón provenientes de plantas de jitomate, taro, berenjena y soya (Murata *et al*., 2023). Para MDH se determinó el fenotipo N1, el cual ha sido ampliamente reportado para *M. arenaria* (Esbenshade & Triantaphyllou, 1985; Carneiro *et al*., 1996; Carneiro *et al*., 2000; Molinari, 2001; Carneiro *et al*., 2004; Cofcewicz *et al*., 2005; Brito *et al*., 2008; Brito *et al*., 2010; Quénéhervé *et al*., 2011) y también se observó un fenotipo atípico designado como N1e. A estos resultados se suma la morfología del patrón perineal, el cual fue redondeado con arco dorsal bajo, con hombreras en los costados característicos de la especie *M. arenaria* (Wesemael *et al*., 2024).

En cilantro se determinó la presencia de dos especies de *Meloidogyne* que no pudieron ser identificadas por este método, la primera con un fenotipo de EST designado como G1-VF1, el cual no coincide con alguno que haya sido reportado hasta el momento. La segunda especie mostró el fenotipo de EST designado como G1 (en este trabajo) el cual es de migración lenta, según lo reportado por Blok & Powers, (2009), el único fenotipo de EST de migración lenta reportado hasta el momento es Mg1 y corresponde a *M. graminis*. Este fenotipo de EST ha sido reportado en *Stenotaphrum secundatum* (planta arvense) (Brito *et al*., 2010), sorgo (*Sorghum vulgare* Pers.) y maíz (*Zea mays*) (Karssen, 2002; Perichi *et al*., 2006) y pastos de campo de golf (Azevedo de Oliveira *et al*., 2018). El cilantro no se encuentra dentro del grupo de las gramíneas, no ha sido reportado como un hospedante de *M. graminis* y además la morfología del patrón perineal obtenido no es característico de *M. graminis*, por lo que es necesario confirmar la identificación de la especie con técnicas moleculares en conjunto con la caracterización morfológica de hembras, machos y juveniles (Blok & Powers, 2009).

En la zona hortícola del Valle de Tepeaca, de donde proceden las muestras, se sabe de la presencia de *M. chitwoodi* (Montes-Belmont, 2000), *M. hapla*, *M. arenaria* (Medina-Canales *et al*., 2011) y *M. incognita* (Cid del Prado Vera *et al*., 2001), identificadas por caracteres morfológicos y morfométricos. La presencia de *M. chitwoodi* en calabaza y *M. javanica* en betabel en la zona constituyen nuevos registros en el país, mientras que *Meloidogyne enterolobii* en zanahoria es el primer registro en la zona. Lo que hace necesario tomar medidas para evitar su dispersión. Estos informes reafirman la importancia que tienen las especies emergentes como *M. enterolobii*, la cual cuenta con una amplia gama de hospedantes y es capaz de parasitar cultivos importantes que

poseen el gen que les confiere resistencia a otras especies de *Meloidogyne* (Moens *et al*., 2009). Es de suma importancia conocer la distribución de estos nematodos en toda la zona y para ello es necesario llevar a cabo el diagnóstico integral, el cual implicaría el análisis morfológico, morfométrico, molecular y enzimático mediante el uso de fenotipos isoenzimáticos. Este método de identificación es poco usado en el país, a pesar de que en Europa es parte del protocolo para la identificación de algunas especies de *Meloidogyne* propuesto por la EPPO (2016), por lo que es necesario incluir este método como parte de la taxonomía integrativa y crear bases de datos de los perfiles de EST y MDH de especies de *Meloidogyne* presentes en México.

La identificación precisa y rápida de las especies del género *Meloidogyne* es de gran utilidad debido a que estos nematodos son los causantes de las mayores pérdidas en los cultivos, por lo que conocer la (s) especies presentes en una zona agrícola determinada permite poder implementar las estrategias adecuadas para llevar a cabo las prácticas para el manejo integrado de estos patógenos para cada cultivo (Sikora *et al*., 2022).

CONCLUSIONES

Se identificaron a partir de los fenotipos isoenzimáticos de esterasa (EST), malato deshidrogenasa (MDH) y la morfología del patrón perineal seis especies de *Meloidogyne* en hortalizas provenientes de cuatro cultivos y cinco localidades muestreadas en el Valle de Tepeaca, Puebla; siendo de mayor importancia el hallazgo de *M. enterolobii*, *M. chitwoodi* y *M. javanica*, ya que representan nuevos registros para la zona de estudio, por lo que deben tomarse las medidas necesarias para evitar su dispersión.

Se encontraron los fenotipos de esterasa G1 y G1-VF1 los que no pudieron asociarse a ninguna especie, por lo que es necesario complementar la identificación con métodos moleculares, lo cual nos confirma la importancia de usar varias herramientas complementarias entre sí para realizar un diagnóstico certero.

En México, es importante establecer nuevos protocolos de diagnóstico que permitan la identificación precisa de las especies de *Meloidogyne*; dónde deben considerarse la determinación de los fenotipos isoenzimáticos a partir de una sola hembra, ya que es un método sensible, reproducible y confiable. Esto representa todo un reto para las autoridades fitosanitarias de nuestro país, pero los resultados serán favorables para el correcto manejo de las especies.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico de la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN, quien otorgó financiamiento para realizar la presente investigación como parte de los proyectos SIP-IPN: 20195105 y 20200707.

LITERATURA CITADA

Adam, M. A. M., Phillips, M. S., & Blok, V. C. (2007). Molecular diagnostic key for identification of single juveniles of seven common and economically important species of root-knot nematode (*Meloidogyne* spp.). *Plant Pathology*, 56(1), 190–197. https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2006.01455.x

Blok, V. C., & Powers, T. O. (2009). Biochemical Methods. In R. N. Perry, Moens M., & J. L. Starr (Eds.), Root-Knot nematodes. (pp. 100–103). CABI.

Brito, J. A., Kaur, R., Cetintas, R., Stanley, J. D., Mendes, M. L., Mcavoy, E. J., Powers, T. O., & Dickson, D. W. (2008). Identification and isozyme characterization of *Meloidogyne* spp. infecting horticultural and agronomic crops and weed plants in Florida. *Nematology*, 10(5), 757–766. www.brill.nl/nemy

Brito, J. A., Kaur, R., Cetintas, R., Stanley, J. D., Mendes, M. L., Powers, T. O., & Dickson, D. W. (2010). *Meloidogyne* spp. infecting ornamental plants in Florida. *Papers in Plant Pathology*. 441.

Brito, J., Powers, T. O., Mullin, P. G., Inserra, R. N., & Dickson, D. W. (2004). Morphological and molecular characterization of *Meloidogyne mayaguensis* isolates from Florida. *Journal of Nematology*, 36, 232–240.

Carneiro M. D. G. R., Souza F. B. C., Mattos S. V., & Correia R. V. (2024). Molecular techniques for root-knot Nematode identification. In: Molinari S. (Ed.), Plant-Nematode Interactions (pp. 227–246). Springer Nature. http://www.springer.com/series/7651

Carneiro, R., Almeida, R., & Quénéhervé, P. (2000). Enzyme phenotypes of *Meloidogyne* pp. populations. *Nematology*, 2, 645–654.

Carneiro, R., Tigano, M., Randing O., & Almeida R. (2004). Identification and genetic diversity of *Meloidogyne* spp. on cofee from Brazil, Central America and Hawaii. Nematology, 6, 287–298.

Carneiro, R. M. O. G., Ritta, M., Almeida, A., & Carneiro, R. G. (1996). Enzyme phenotypes of Brazilian populations of *Meloidogyne* spp. *Fundamental and Applied Nematology*, 19(6), 555-560.

Carrillo-Fasio, J. A., Angúlo-Castro, A., Ángel Martínez-Gallardo, J., Ayala-Tafoya, F., Gilberto Yáñez-Juárez, M., Jesús, &, & Retes-Manjarrez, E. (2020). Distribution and incidence of root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) on pepper in Sinaloa, Mexico. *Tropical Plant Pathology*, 46, 195–200. https://doi.org/10.1007/s40858-020-00400-6

Carta, L. K., Handoo, Z. A., Powers, T. O., Miller, S. A., Pérez-Zubiri, R., & Ramírez-Suárez, A. (2005). Sistema de información científica guidelines for isolation and identification of regulated nematodes of potato (*Solanum tuberosum* L.) in North America. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 23(2), 211-222. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61223216

Cid del Prado Vera I., Tovar Soto A., & Hernández Alfonsina, J. (2001). Distribución de especies y razas de *Meloidogyne* en México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 19(1), 32–39. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61219105

Cid del Prado-Vera I., Franco-Navarro F., & Godínez-Vidal D. (2018). Plant parasitic nematodes and managements strategies of major crops in Mexico. In: Subbotin, S. A., & Chitambar, J. J. (Eds.). Plant parasitic nematodes in sustainable agriculture of North America 1st Ed. (pp. 31–68). Springer.

Cofcewicz, E. T., Carneiro, R. M. D. G., Randig, O., Chabrier, C., & Quénéhervé, P. (2005). Diversity of Meloidogyne spp. on Musa in Martinique, Guadeloupe, and French Guiana. *Journal of Nematology*, 37(3), 313–322.

Cristóbal-Alejo J, Cetz-Chi JI, Tún-Suárez J Ma, Moo-Koh FA, Peraza-Luna FA, & Candelero-De la Cruz J. (2018). Fungal filtrate of Trichoderma with nematicidal activity against *Meloidogyne incognita* (Kofoid & White) Chitwood. *Revista de Protección Vegetal*, 33(3), 2224–4697.

Da Cunha, J., D´Arc, R., & Gomes. R. (2003). Variabilidade isoenzimática de populações de *Meloidogyne* spp. provenientes de regiões brasileiras produtoras de soja. *Nematologia Brasileira*, 27, 1–12

Cunha, T. G. D., Visôtto, L. E., Pinheiro, L. M., God, P. I. V. G., Rosa, J. M. O., Oliveira, C. M. G., & Lopes, E. A. (2021). Distribution of *Meloidogyne* species in carrot in Brazil. *Ciência Rural*, 51, e20200552.

De la Jara-Alcocer, F., Zeron-Bravo, F., Torres-Coronel, R., & Tovar-Soto, A. (1994). Manual de Prácticas de Nematología Agrícola. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas-IPN.

Desaeger J. (2022). A Root-knot Nematode Paradise made in Plastic: The case of Florida vegetables. In Sikora R A., Desaeger J, & Molendijk L P G (Eds.), Integrated nematode management. state-of-theart and Visions for the Future. (pp. 247–254). CABI.

Esbenshade, P. R., & Triantaphyllou, A. C. (1985). Use of Enzyme phenotypes for identification of *Meloidogyne* species. *Journal of Nematology*, 17(1), 6.

EPPO. (2016), PM 7/103 (2) *Meloidogyne enterolobii*. EPPO Bull, 46: 190-201. https://doi.org/10.1111/epp.12293

Ferris, H., Carlson, H. L., Viglierchio, D. R., Westerdahl, B. B., Wu, F. W., Anderson, C. E., Juurma, A., & Kirby, A. D. W. (1993). Host status of selected crops to *Meloidogyne chitwoodi*. *Journal of Nematology*, 25(4S), 849.

García, L. E., & Sánchez-Puerta, R. V. (2012). Characterization of a root-knot nematode population of *Meloidogyne arenaria* from Tupungato (Mendoza, Argentina). *Journal of Nematology*, 44, 291–301.

Hunt D. I., & Handoo Z. (2012). Root-knot Nematodes. In Practical plant nematology 1st Ed (pp. 359–409). Colegio de Postgraduados-Universidad Autónoma de Chapingo-Mundi Prensa.

Hunt, D. J., & Handoo Z. A. (2009). Taxonomy, identification and principal species. In Perry N. R., Moens M., & Starr L. J. (Eds.), Root-Knot nematodes (pp. 55–97). CABI.

Karssen, G. (2002). The plant-parasitic nematode genus *Meloidogyne* Göldi, 1892 (Tylenchida) in Europe. Brill.

Karssen, G., Wesemael, W., & Moens, M. (2013). Root-knot Nematodes. In N. R. Perry & M. Moens (Eds.), Plant Nematology, Second Ed. (pp. 73–108).

Machado, A. C. Z., Lemes, C. F. C., Silva, S. A., Shigueoka, L. H., Dorigo, O. F., Deuner, C. C., & Ribeiro, N. R. (2022). Variant *Meloidogyne javanica* populations from Brazil could impact the breeding programs and the management in soybean fields. *Tropical Plant Pathology*, 47(3), 442–449. https://doi.org/10.1007/s40858-022-00492-2

Medina-Canales, M. G., Rodríguez-Tovar, A. V., Manzanilla-López, R. H., Zúñiga, G., & Tovar-Soto, A. (2014). Identification and molecular characterisation of new Mexican isolates of *Pochonia chlamydosporia* for the management of *Meloidogyne* spp. *Biocontrol Science and Technology*, 24(1), 1–21. https://doi.org/10.1080/09583157.2013.838623

Medina-Canales, Ma. G., Ramírez-San Juan, E., Torres-Coronel, R. & Tovar-Soto, A. (2012). Pathogenicity of *Meloidogyne arenaria* against two varieties of carrot (*Daucus carota* L.) in Mexico. *Nematropica* 42 (2): 335-340.

Medina-Canales Ma. G., Carvajal-Sandoval A., Alejandre-Aguilar R., & Tovar-Soto A. (2011). Alteraciones histológicas inducidas por *Meloidogyne hapla* y *M. arenaria* en zanahoria (*Daucus carota* L.) en el valle de Tepeaca, Puebla, México. *Nematropica*, 41, 223–228.

Medina-Molina, C.O., Medina-Canales, MA. G., Torres-Coronel, R., Carvajal-Sandoval, A. & Tovar-Soto, A. (2018). Histological changes for root-knot nematode *Meloidogyne incognita* in beetroot roots (*Beta vulgaris* L.). *Polibotánica*, 46 (2): 58-64.

Moens, M., Perry, R. N., & Starr, J. L. (2009). *Meloidogyne* species a diverse group of novel and important plant parasites. In: R. N. Perry, M. Moens, & J. L. Starr (Eds.), Root-Knot nematodes. (pp. 1–17). CABI.

Molinari, S. (2001). Polymorphism of esterase isozyme zymograms of *Meloidogyne* populations detected by phastsystem. *Nematologia Mediterranea*, 29, 63–66.

Molinari, S., Lamberti, F., Crozzoli, R., Sharma S. B., & Sanchéz Portales L. (2005). Isozyme patterns of exotic *Meloidogyne* spp. populations. *Nematologia Mediterranea*, 33, 61–65.

Montes-Belmont, R. (2000). Nematología Vegetal en México. Investigación documental. Sociedad Mexicana de Fitopatologia.

Murata, G., Yashiro, T., Uehara, T., Uesugi, K., Iwahori, H., & Narabu, T. (2023). Characterization of the atypical Meloidogyne arenaria (Tylenchina: Meloidogynidae) in Japan. *Applied Entomology and Zoology*, 58(3), 245-255.

Perichi, G., & Crozzoli, R. (2010). Morfología, morfometría y hospedantes diferenciales de poblaciones de Meloidogyne de los estados Aragua y Zulia, Venezuela. *Fitopatología Venezolana*, 23, 5–15.

Perichi, G., Crozzoli, R., & Alcano, M. (2006). Primer reporte de *Meloidogyne graminis* (Nematoda: Tylenchida) en Venezuela. *Fitopatología Venezolana*, 19, 17–18.

Powers T O., & Ramírez-Suárez A. (2012). Molecular diagnostics of nematodes: some practical considerations. In Manzanilla-López R. H. & Marbán-Mendoza N. (Eds.), *Practical Plant Nematology* (1st ed., Vol. 1, pp. 131–145). Editorial Colegio de Postgraduados-Universidad Autónoma de Chapingo-Mundi Prensa.

Quénéhervé, P., Godefroid, M., Mège, P., & Marie-Luce, S. (2011). Diversity of *Meloidogyne* spp. parasitizing plants in Martinique Island, French West Indies. *Nematropica*, 41, 191–199.

Recibido:
3/septiembre/2024

Aceptado:
4/junio/2025

Ramírez-Suárez, A., Rosas-Hernández, L., Alcasio-Rangel, S., & Powers, T. O. (2014). First report of the root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii* parasitizing watermelon from Veracruz, Mexico. *Plant Disease*, 98, 428.

Riascos, D. H., Mosquera-Espinosa, A. T., de Agudelo, F. V., Rosa, J. M. O., Oliveira, C. M. G., & Muñoz, J. E. (2019). Morphological, biochemical, and molecular diagnostics of *Meloidogyne* spp. associated with *Musa* spp. in Colombia. *Nematropica*, 49(2), 229-245.

Rodríguez, M., L., Gómez, L., & Peteira, B. (2007). *Meloidogyne mayaguensis*, plaga emergente para la agricultura tropical y subtropical. *Revista Protección Vegetal*, 22, 183–198.

Rosas-Hernandez, L., Patiño-Espejel, M. G., & Rodríguez-Mendoza, J. (2024). Detección del nematodo agallador *Meloidogyne enterolobii* en tubérculos de papa de Ahome, Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, S123.

Rusinque, L., Inácio, M. L., Mota, M., & Nóbrega, F. (2018). Morphological, biochemical and molecular characterisation of Meloidogyne javanica, from North Portugal, in tomato. *Revista de Ciências Agrárias*, 41(1), 193-198.

Santos, D., Abrantes, I., & Maleita, C. (2019). The quarantine root-knot nematode *Meloidogyne enterolobii* a potential threat to Portugal and Europe. Plant Pathology, 68(9), 1607–1615. https://doi.org/10.1111/ppa.13079

Shurtleff M. C., & Averre C. W. (2000). Diagnosing plant diseases caused by nematodes 1st Ed, APS Press. 189 p.

SIAP. (2020). Servicio de información agroalimentaria y pesquera. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Sikora R A, Desaeger J., & Molendijk L. (2022). Integrated nematodes management: State-of-the-art and Visions for the Future 1st Ed. CABI.460 p.

Souza, F. de B. C., Rafael, G., Belot, J. L., Negri, B. F., Perina, F. J., Cares, J. E., & Carneiro, D. G. R. M. (2022). Occurrence of a new race of *Meloidogyne enterolobii* and avirulent *M. incognita* populations parasitizing cotton in western Bahia state, Brazil. Physiological and Molecular *Plant Pathology*, 121. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101874

Souza, R. (2008). Taxonomic coffee-parasitic Root-knot nematodes *Meloidogyne* spp. In R. Carneiro & Cofcewicz E.T. (Eds.), Plant-Parasitic Nematodes of coffee. (pp. 87–122). Springer.

Subbotin, S. A., Palomares-Rius, J. E. & Castillo, P. (2021). Systematics of root-knot nematodes (Nematoda: Meloidogynidae). Brill. Leiden-Boston. 585 pp.

Taylor, A. L., & Sasser, J. N. (1983). Biología, identificación y control de los nematodos del nódulo de la raíz. Departamento de Fitopatología de la universidad de Carolina del norte y agencia de Estados Unidos para el desarrollo internacional.

Trudgill, D. L., Bala, G., Blok V. C., Daudi, A., Davies, K. G., Gowen, S. R., Fargette, M., Madulu, J. D., Mateille, T., Mwageni, W., Netscher, C., Phillips, M. S., Sawadogo, A., Trivino C. G., & Voyoukalou, E. (2000). The importance of tropical root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) and factors affecting the utility of *Pasteuria penetrans* as a biocontrol agent. *Nematology*, 2, 823–845.

Van Der Beek, J. G., & Karssen, G. (1997). Interspecific hybridization of meiotic parthenogenetic *Meloidogyne chitwoodi* and *M. fallax*. *Phytopathology*, 87(10), 1061-1066.

Wang, Y. F., Xiao S., Huang, Y. K., Zhou, X., Zhang, S. S., & Liu, G. K. (2004). First report of *Meloidogyne enterolobii* on carrot in China. *Plant Disease*, 98, 1019.

Wesemael, W., Moens, M. & Bellafiore, S. (2024). Root-Knot Nematodes. Pp.74-123. In: Perry, R., Moens, M. and Jones, T.J. (Eds.). Plant Nematology 3rd edition. CABI, Wallinford, Oxon, UK. 582 pp.

Xu, J., Liu P., Meng, Q., & Long, H. (2004). Characterisation of *Meloidogyne* species from China using isozyme phenotypes and amplified mitochondrial DNA restriction fragment length polymorphism. *European Journal of Plant Pathology*, 110, 309–315.

Yang, B., & Eisenback, J. D. (1983). *Meloidogyne enterolobii* n. sp. (Meloidogynidae), a Root-knot nematode parasitizing pacara earpod tree in China. *Journal of Nematology*, 15, 381–391.

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN EL ESTADO NUTRIMENTAL DEL NOPAL-VERDURA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIEDAD MILPA ALTA

EFFECT OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES ON THE NUTRITIONAL STATUS OF NOPAL-VEGETABLE (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIETY MILPA ALTA

Zamora Morales, B.P., A. Báez Pérez, L. Bonilla-Valencia, J. A. Zegbe Domínguez, M. C. Zamora-Martínez, A. Quevedo-Nolasco

EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN EL ESTADO NUTRIMENTAL DEL NOPAL-VERDURA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIEDAD MILPA ALTA

EFFECT OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES ON THE NUTRITIONAL STATUS OF NOPAL-VEGETABLE (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIETY MILPA ALTA

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 307-324 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.18

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 307-324 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo en el estado nutrimental del nopal-verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variedad Milpa Alta

Effect of soil physical and chemical properties on the nutritional status of nopal-vegetable (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variety Milpa Alta

Bertha Patricia Zamora-Morales / zamora.patricia@inifap.gob.mx
https://orcid.org/0000-0002-8724-6681
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) Av. Progreso Núm. 5 Col. Barrio de Santa Catarina, Alcaldía Coyoacán C.P. 04110 Ciudad de México

Aurelio Báez-Pérez / baez.aurelio@inifap.gob.mx
https://orcid.org/0000-0002-4792-2817
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Centro de Investigación Regional Centro (CIR-Centro) Campo Experimental Bajío (CE-Bajío) Carretera Celaya San Miguel Allende Km. 6.5 Celaya, Gto, C.P. 38110

Leticia Bonilla-Valencia / bonilla.leticia@inifap.gob.mx
https://orcid.org/0000-0003-1246-0621
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) Av. Progreso Núm. 5 Col. Barrio de Santa Catarina, Alcaldía Coyoacán C.P. 04110 Ciudad de México

Jorge Artemio Zegbe-Domínguez / zegbe.jorge@inifap.gob.mx
https://orcid.org/0000-0002-6925-5445
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Centro de Investigación Regional Norte Centro (CIR-NOC) Campo Experimental Pabellón (C.E. Pabellón) Kilómetro 32.5 Carretera Aguascalientes – Zacatecas, Pabellón de Arteaga, Ags. C.P. 20660

Marisela Cristina Zamora-Martínez / zamora.marisela@inifap.gob.mx
https://orcid.org/0000-0003-0880-396X
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF) Av. Progreso Núm. 5 Col. Barrio de Santa Catarina, Alcaldía Coyoacán C.P. 04110 Ciudad de México

Abel Quevedo-Nolasco / anolasco@colpos.mx
https://orcid.org/0000-0003-3303-5077
Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Programa de Hidrociencias Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56264, Estado de México

RESUMEN Con el objetivo de analizar el efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo sobre el estado nutrimental de los cladodios de nopal-verdura (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variedad Milpa Alta, se recolectaron muestras de suelo y de cladodios en cuatro Unidades de Producción Familiar (UPF) en Milpa Alta, Ciudad de México.

Zamora Morales, B.P., A. Báez Pérez, L. Bonilla-Valencia, J. A. Zegbe Domínguez, M. C. Zamora-Martínez, A. Quevedo-Nolasco

EFECTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN EL ESTADO NUTRIMENTAL DEL NOPAL-VERDURA (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIEDAD MILPA ALTA

EFFECT OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES ON THE NUTRITIONAL STATUS OF NOPAL-VEGETABLE (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) VARIETY MILPA ALTA

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 307-324. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.18

Núm. 60: 307-324 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Para determinar la relación entre los resultados del análisis proximal (proteína, extracto etéreo, cenizas, fibra dietética y carbohidratos) de los cladodios y las condiciones edáficas de las UPF evaluadas, se realizó un análisis multivariado por componentes principales (CP); además de un análisis de correlación de Spearman (P <0.05) y un modelo de ecuaciones estructurales (MEE). El análisis físico y químico de los suelos indicó una textura franca con cuatro variantes, sin problemas de compactación y concentraciones elevadas de N inorgánico ($N\text{-}NO_3$ + $N\text{-}NH_4$) y fósforo extractable. El CP determinó que el N y P del suelo se relacionan con el contenido de proteínas en los cladodios, y presentan una relación antagonista con el pH y la salinidad del suelo. El MEE demostró que la optimización de los niveles de K podría mejorar la calidad proteica de los cladodios, mientras que un control adecuado de Zn y de los carbonatos en el suelo evita efectos adversos sobre el contenido de fibra. Las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados tienen un efecto significativo sobre las características nutrimentales de los cladodios de nopal variedad Milpa Alta, particularmente en las concentraciones de micronutrientes (Zn, Fe y Cu) relacionados con la calidad comercial del producto.
Palabras clave: *Opuntia ficus- indica* (L.) Mill., ceniza, fibra, macronutrientes, micronutrientes, salinidad del suelo.

ABSTRACT: In order to analyze the effect of soil physical and chemical properties on the nutritional status of nopal-vegetable cladodes (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) variety Milpa Alta, soil and cladode samples were collected in four Family Production Units (UPF) in Milpa Alta, Mexico City. To determine the relationship between the results of the proximal analysis (protein, ethereal extract, ash, dietary fiber and carbohydrates) of the cladodes and the edaphic conditions of the evaluated UPFs, a multivariate analysis by principal components (PC) was performed; in addition to a Spearman correlation analysis, (P <0.05) and a structural equation model (SEM). The physical and chemical analysis of the soils indicated a loam texture with four variants, no compaction problems and high concentrations of inorganic N (N-NO3 + N-NH4) and extractable phosphorus. The CP determined that soil N and P are related to protein content in cladodes, and present an antagonistic relationship with soil pH and salinity. The SEM showed that optimizing K levels could improve the protein quality of cladodes, while adequate control of Zn and soil carbonates avoids adverse effects on fiber content. The physical and chemical properties of the soils evaluated have a significant effect on the nutritional characteristics of nopal cladodes the Milpa Alta variety, particularly in the concentrations of micronutrients (Zn, Fe and Cu) related to the commercial quality of the product.
Key words: *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill., ash, fiber, macronutrients, micronutrients, protein, soil salinity

INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.) es una planta que presenta un sistema fotosintético denominado metabolismo ácido crasuláceo, altamente eficiente en el uso del agua lo que permite su desarrollo en zonas áridas y semiáridas del mundo (Cushman & Borland, 2002). Se cultiva para uso terapéutico, industrial, consumo animal y humano (González, 2010; Méndez-Gallegos & García-Herrera, 2006; Meraz-Maldonado *et al.*, 2012). El género *Opuntia* incluye variedades específicas productoras de fruta, para consumo animal como forraje y para nopal-verdura (cladodios tiernos o nopalito) utilizados en la alimentación humana (Roldán-Cruz & Chavarría-Miranda, 2022). Esta última forma parte de la cocina tradicional mexicana (Casas & Barbera, 2002); su consumo per cápita es de 6.4 kg^{-1} y contribuye a la lucha contra la inseguridad alimentaria en México (Inglese *et al.*, 2018).

En el país, se cultivan anualmente 12,580 ha con nopal verdura; los principales estados en superficie cultivada y producción son: Morelos (47.2%; 97.4 t ha^{-1}), Ciudad de México (22.4%; 90.4 t ha^{-1}), Tamaulipas (1.3%; 12.0 t ha^{-1}), Estado de México (10.1%; 88.8 t ha^{-1}), Michoacán (3.9%; 45.0 t ha^{-1}), Jalisco (3.4%; 39.6 t ha^{-1}) y Puebla (3.8%; 754 t ha^{-1}) (Servicio de Información

Núm. 60: 307-324 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2021; 2024). Los dos primeros estados concentran la mayor superficie cultivada con nopal-verdura, debido a su alta calidad (Inglese *et al.*, 2018).

El sistema de cultivo del nopal-verdura se caracteriza por la aplicación de conocimientos transmitidos por generaciones, lo que ha favorecido el mantenimiento de las tradiciones agrícolas (Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades [SEDEREC], 2016). También, la permanencia del régimen de tenencia comunal de la tierra (Bonilla-Rodrígez, 2014) ha contribuido a que los pobladores conserven la memoria histórica, tanto del arraigo agrícola como de sus costumbres; condiciones que han influido en el significado socio-cultural que ostenta el cultivo del nopal-verdura en la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México (Bonilla-Rodríguez, 2009).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura señala que el interés en diversas especies del género *Opuntia* se ha incrementado debido al papel sobresaliente que tienen en los sistemas de agricultura sustentable, sobre todo en áreas marginales de zonas áridas y semiáridas (Reynolds *et al.*, 2003). Esto obliga al sector agrícola a buscar e implementar estrategias y tecnologías de producción que acrecenten y mejoren la calidad del cultivo, en un contexto de sustentabilidad y en función del calentamiento global (Medina-García *et al.*, 2021).

Dado el valor comercial de los productos derivados de las partes aéreas del nopal, la investigación se ha orientado a la evaluación de los rendimientos de dichos órganos (Galicia-Villanueva *et al.*, 2017). En contraste, existe escasa investigación enfocada a estudiar los efectos de las condiciones edáficas sobre la disponibilidad de nutrimentos; así como del impacto de estas en la producción y productividad del nopal-verdura (Zúñiga-Tarango *et al.*, 2009). Por lo tanto, orientar la investigación hacia aspectos básicos, como la fertilidad del suelo y su influencia en el estado nutrimental de la planta, resulta fundamental para reducir esa brecha y desarrollar recomendaciones que promuevan un cultivo sustentable, con características nutracéuticas y funcionales óptimas para el consumo humano (Atalah & Pak, 1997; Cárdenas *et al.*, 2019). Con base en lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en determinar el efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo en el estado nutrimental de nopal-verdura variedad Milpa Alta.

La hipótesis plateada estima que las características nutrimentales de esta variedad son determinadas por las propiedades físicas y químicas del suelo en el que se establece su cultivo. Para ello, se consideró: 1) realizar un diagnóstico de sus concentraciones nutrimentales, 2) evaluar la relación entre las propiedades químicas del suelo y las concentraciones nutrimentales del nopal verdura, y 3) determinar cómo las características del suelo influyen sobre las concentraciones de las principales variables asociadas al análisis proximal: proteína, fibra y cenizas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

El estudio se realizó en marzo de 2020 en cuatro Unidades de Producción Familiar (UPF) de nopal-verdura, variedad Milpa Alta, de la alcaldía Milpa Alta Ciudad de México (Tabla 1). Milpa Alta, una de las 16 demarcaciones de la Ciudad de México, se ubica en su extremo sureste, en una zona elevada de aproximadamente 2,600 metros sobre el nivel del mar. Limita con las alcaldías Tláhuac, Xochimilco, Magdalena Contreras, Tlalpan y con el Estado de México, (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020). El clima predominante es templado semiárido con lluvias en verano, temperaturas anuales promedio entre 13 °C y 16 °C. Durante los meses cálidos, las temperaturas pueden llegar a 27 °C, mientras que en invierno se registran hasta 3 °C. La precipitación anual varía entre 600 y 800 mm, concentrándose en los meses de verano, y la humedad relativa suele ser de 60 a 70% (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2022; Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2020).

Características físicas y químicas de los suelos

En cada sitio de estudio se recolectaron muestras de suelo compuestas por cinco submuestras en cinco puntos ubicados de manera aleatoria. La profundidad de muestreo fue de 0-40 cm, y a partir de estas se generaron tres muestras compuestas. La caracterización física y química de los suelos

Núm. 60: 307-324 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

se realizó en el Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Bajío, conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). Las determinaciones físicas fueron: textura, punto de saturación, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) y densidad aparente (DA).

El análisis químico incluyó las siguientes determinaciones: pH, conductividad eléctrica (CE, en extracto de saturación), materia orgánica (MO), fósforo extractable Bray-1, macroelementos y microelementos; mientras que el estudio de la salinidad se basó en la determinación del pH (en extracto de saturación), bases intercambiables, salinidad efectiva y relaciones de cambio. El análisis proximal consistió en determinar, el contenido de proteína, extracto etéreo y cenizas por los métodos descritos por la Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1990). La fibra dietética se obtuvo mediante el método gravimétrico de (Prosky *et al.*, 1988); y los carbohidratos por diferencia porcentual con el resto de los componentes del análisis químico.

Tabla 1. Características generales de los sitios considerados en el diagnóstico nutrimental de cladodios tiernos de nopal-verdura variedad Milpa Alta.

Table 1. General characteristics of the sites considered in the nutritional diagnosis of tender cladodios of nopal-vegetable variety Milpa Alta.

Variable	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4
Localidad	BSM	SPA	SFT	SM
Latitud norte	19°13'09.7"	19°12'49.72"	19°20’41.67”	19°91’33.2”
Longitud oeste	99°01'53.1"	99°02'17.62"	98°97’63.89”	99°04’01.20”
Altitud	2 558	2 508	2 265	2 510
Superficie (ha)	0.68	0.65	0.25	0.75
DP (plantas ha^{-1})	27 776.	22 222	20 000	22 222
FE (kg ha^{-1})	144 000	4 394	144 000	120 000
Plagas	Cochinilla, chinche roja	Cochinilla	Cochinilla	Caracol
Enfermedades	Mancha negra	Mancha negra	Mancha negra	Mancha negra
Rendimiento (t ha^{-1})	88	84	88	84

BSM: Barrio Santa Martha; SPA: San Pedro Actopan; SFT: San Francisco; Tecoxpa; SM: San Mateo; DP: densidad de siembra; FE: Fertilización equina

BSM: Barrio Santa Martha; SFT: San Francisco; Tecoxpa; SM: San Mateo; SPA: San Pedro Actopan DP: sowing density; FE: equine fertilization.

Determinación nutrimental de los cladodios

Las muestras del material vegetativo se recolectaron en los mismos puntos del muestreo de suelos, se recolectaron tres submuestras, cada una compuesta por tres cladodios de tamaño comercial (18.0 – 25.0 cm de longitud). Estas fueron empaquetadas, etiquetadas y transportadas en hieleras, para los análisis nutrimentales, al Laboratorio Nacional de Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal del INIFAP-Campo Experimental Bajío. Previo a la determinación de la composición nutrimental, se registró el peso húmedo, peso seco, humedad, área y grosor de cada cladodio (AOAC, 1980). Posteriormente, las muestras fueron secadas con aire forzado (FELISA modelo: FE-292AD) a 72 °C por 72 h, en seguida se registró su peso seco y se determinó la humedad. El material vegetativo seco, se molió con un molino de cuchillas (Modelo GE 4305Arthur H. Thomas, Chadds Ford, PA, USA). El material resultante se homogenizó y nuevamente se molió en mortero de porcelana y tamizó en malla número 35 (0.5 mm).

El N se determinó por el método MicroKjeldahl (Bremner, 1965); mientras que el P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B se obtuvieron por filtrado del extracto proveniente de la digestión húmeda de cada muestra. Las concentraciones de K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu y B se cuantificaron por medio de un espectrómetro de emisión atómica (Modelo Thermo Scientific iCE 3000 Series Atomic Absorption Spectrometers, CITY, USA). La concentración de P se determinó por colorimetría del complejo fosfovanadomolibdato con el método descrito por la AOAC (1980). Las lecturas se hicieron a 470 nm en un espectrofotómetro (Modelo Milton Roy® modelo Spectronic 20, CITY, USA).

Análisis estadístico

El análisis estadístico incluyó una prueba de Kruskal-Wallis para determinar la existencia de diferencias significativas del contenido de nutrientes en los cladodios entre los cuatro sitios de producción de nopal verdura muestreados, considerando un valor de $P<0.05$ (Distribución no Gaussiana). Para determinar la relación entre los macronutrientes, micronutrientes, proteína, Na y las condiciones edáficas, se ejecutaron análisis multivariados por componentes principales (CP) con el programa R (Oksanen, 2017); además de un análisis de correlación de Spearman, con un valor de $P<0.05$ (Distribución no Gaussiana) con el programa R V 4.2 (R Development Core Team, 2024). Se construyó un modelo de ecuaciones estructurales (MEE), para analizar las relaciones de causalidad del efecto de las propiedades químicas del suelo (pH, nutrientes, materia orgánica, entre otras) sobre las concentraciones de proteína, fibra y cenizas en los cladodios, y su ajuste se determinó seleccionado el modelo acorde con el valor de P. El MEE, permite modelar relaciones multivariadas, en la cual los efectos se establecen entre interacciones directas e indirectas entre variables. El ajuste de MEE se evaluó mediante el enfoque *piecewise structural equation modeling* (piecewise SEM), utilizando el paquete piecewiseSEM en R (Lefcheck, 2016). Esto permite determinar la plausibilidad del modelo, mediante el estadístico Fisher's C, donde un valor de $P>0.05$ indica que no hay evidencia estadística para rechazar el modelo propuesto. Con base en este criterio, se compararon diversos modelos alternativos formulados a partir de hipótesis documentadas en la literatura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis físico, fertilidad y salinidad del suelo en el área de estudio

El análisis físico del suelo de los sitios evaluados sugirió que la clase textural predominante fue la franca, con cuatro variantes (Tabla 2). Sin embargo, con base en la carta de clasificación de suelos (Secretaría de Protección Civil de la CDMX [SPC], 2014) en todos los sitios de estudio correspondió al tipo Andosol (textura media). La densidad aparente (DA) fluctuó entre 1.03 y 1.1 g cm^3. Solo se observó compactación el Sitio 3 que presentó el valor más alto de DA (1.16 g cm^3). El punto de saturación varió de 58 a 65%, la capacidad de campo (CC) entre 36.5 y 47%, y el punto de marchitez permanente (PMP) de 19.2 a 24.6%. Los valores son indicativos de suelos con bajo grado de compactación, que favorece la penetración de raíces e infiltración del agua. No obstante, las diferencias en la CC (36 - 47%) y el PMPe (19.20 – 24.6%) reflejan una variabilidad en la capacidad de retención de agua entre los sitios.

En el sitio 3 se observó un mayor contenido de arcilla (27.17%) y el valor más alto de CC (47%), lo cual es benéfico para la disponibilidad de agua en periodos críticos del cultivo (Santander *et al.*, 2024). En sitios con menor capacidad de retención hídrica, como el sitio 4, se subraya la necesidad de implementar prácticas de manejo específicas, como la aplicación de materia orgánica para mejorar su estructura y así aumentar la retención de humedad (Guo *et al.*, 2016).

Tabla 2. Análisis físico de los suelos en los sitios de muestreo cultivados con nopal-verdura variedad Milpa Alta, alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.

Table 2. Physical analysis of soils in sampling sites cultivated with Milpa Alta variety nopal-vegetable, Milpa Alta municipality, Mexico City.

Sitio	Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	DA g cm^3	Saturación	CC	PMP
		%					%	
1	70.25	11.91	17.84	Areno Franco	1.03	58.67	44.00	23.10
2	56.25	18.57	25.17	Franco	1.06	56.00	42.00	22.03
3	54.92	17.91	27.17	Franco	1.02	62.67	47.00	24.60
4	65.59	14.57	19.84	Franco Arenoso	1.16	65.33	36.50	19.20

DA: densidad aparente; CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente.
DA: apparent density; CC: field capacity; PMP: permanent wilting point.

Debido a que el área de estudio está ubicada en una zona volcánica (Eje Neovolcánico Transversal), cuya vegetación original era una asociación de pino-encino, se esperaría la presencia de suelos con pH ácido (Burgess-Conforti *et al.*, 2019). No obstante, el análisis de la fertilidad de suelo indicó un pH que varió de ácido a alcalino (6.38-8.06) (Tabla 3). La alcalinidad puede deberse a la perturbación de los suelos como resultado de la deforestación, la implementación de sistemas de producción agrícola y la incorporación de estiércol y otros abonos orgánicos de diferente índole (Burgess-Conforti *et al.*, 2019).

El contenido de materia orgánica (MO) fluctuó entre 2.56 y 3.64% (Tabla 3); para este tipo de suelos un contenido de 3 a 5% de materia orgánica se considera de medio a alto (Béjar-Pulido *et al.*, 2021). Por otra parte, el contenido de N inorgánico ($N\text{-}NO_3$ + $N\text{-}NH_4$) (45.42 - 130.48) y fósforo extractable (186.14 - 405.08) fueron altos de acuerdo con Tavera-Cortés *et al*., (2018) (Tabla 3). Lo anterior se explica por la cantidad y frecuencia de aportes de materia orgánica y fertilizantes químicos en los suelos del área bajo estudio, los que incluyen el material vegetal de la poda del nopal, el estiércol usado como fertilizante (Tavera-Cortés *et al.*, 2018) y materiales como aserrín (carpinterías de la zona).

Aun cuando el análisis de Kruskall Wallis no reveló diferencias significativas entre sitios, los valores diferentes en los parámetros edáficos pueden tener implicaciones importantes para la especie de estudio. El Sitio 1 presentó un pH ácido (6.38) y alto contenido de MO (3.25%); mientras que, los contenidos de nutrientes como el nitrógeno inorgánico (45.42 mg kg^{-1}) y fósforo extraíble (P) (275.37 mg kg^{-1}) correspondieron a valores favorables para un buen desarrollo del cultivo. El Sitio 2 presentó un pH alcalino (8.06), y concentraciones de N, P. Mg, Ca y K significativamente más altos (Tabla 3); con respecto a los otros sitios bajo estudio, las condiciones de mayor alcalinidad podrían afectar la disponibilidad de estos nutrientes, en especial de P (Bejar-Pulido *et al.*, 2020). El sitio 3, con pH de 7.97 y 2.56% de MO mostró un equilibrio entre nutrientes. El sitio 4, con pH de 7,53 y 3,05% de MO (Tabla 3) tuvo el menor contenido de P extraíble (186 mg kg^{-1}); no obstante, la reserva es alta, por lo que un adecuado manejo puede mejorar los niveles de nutrientes y su disponibilidad (Vázquez, 2023). En este sentido, se debe considerar que el nopal es un cultivo perenne y durante su producción se realizan prácticas mínimas de labranza, por lo que los nutrientes se incorporan lentamente, lo cual es probable que incida en el crecimiento y balance nutrimental de las plantas (Zúñiga-Tarango *et al.*, 2009).

Estudios previos han señalado que la calidad nutritiva del nopal varía en función de factores edáficos, climáticos y culturales como la fertilización y el manejo poscosecha. Lo anterior fue señalado por Santiago-Lorenzo *et al.*, (2016) quienes indican que la calidad nutritiva del nopal-verdura responde a su composición mineral, la cual es variable según la fertilización, manejo poscosecha y el estado de madurez (Silva *et al.*, 2021).

Tabla 3. Análisis de fertilidad de suelo de los sitios cultivados con nopal-verdura variedad Milpa Alta, alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.
Table 3. Soil fertility analysis of sites cultivated with Milpa Alta variety nopal-vegetable, Milpa Alta municipality, Mexico City.

Sitio	pH	CE dS m^{-1}	MO %	N	P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu
				mg kg^{-1}									
1	6.38	0.45	3.25	45.42	275.37	1102	1812	519	55.3	94.0	12.5	10.8	3.5
2	8.06	0.51	3.64	130.48	405.08	2048	3227	839	48.7	30.3	7.6	4.8	2.1
3	7.97	0.49	2.56	76.42	293.14	1493	2802	804	44.7	37.0	6.5	3.8	1.8
4	7.53	0.35	3.05	68.01	186.14	1100	2364	668	32.0	33.7	4.1	3.1	1.3

El estudio de salinidad evidenció que los suelos no presentaban problemas serios en contenido de sales, ya que los suelos estudiados tuvieron un pH (en extracto de saturación) que indicó moderadas concentraciones de sales (Tabla 4), cuyos valores fueron atribuibles a la abundante aplicación de estiércol, como fertilizante (Tavera-Cortés *et al.*, 2018); además, el nopal es un cultivo rústico, con alta tolerancia a la alcalinidad (Hernández-Urbiola *et al.*, 2011). En el sitio 2 se registró una salinidad alta (CE = 1.39 dS m^{-1}), y concentraciones más altas de sodio (Na = 1.71 meq L^{-1}) y potasio (K = 5.28 meq L^{-1}), lo que podría generar estrés en las plantas debido a que se altera modificaciones en la absorción de agua y nutrientes (Martínez-Villavicencio et al., 2011); pero el valor de conductividad eléctrica clasifica al suelo como uno no salino (NOM-021-RECNAT-2000).

Por otro lado, en el sitio 1, hubo menor salinidad (CE = 0.56 dS m^{-1}). Los valores de Na fueron menores, lo que indica un ambiente más favorable para el crecimiento del nopal. La baja concentración de cloruros (Cl) y sulfatos (SO_4) en este sitio, también sugiere que las condiciones son menos propensas a inducir déficit hídrico en las plantas, lo cual permite una mayor disponibilidad de agua y nutrientes (Mitma-Ramírez, 2024).

Tabla 4. Análisis de la salinidad de los suelos muestreados en cuatro sitios cultivados con nopal-verdura variedad Milpa Alta, alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México. En extracto de saturación.
Table 4. Analysis of soil salinity of the soils sampled at four sites cultivated with Milpa Alta variety nopal-vegetable, Milpa Alta municipality, Mexico City. In saturation extract.

Sitio	pH	CE dS m^{-1}	Ca	Mg	Na	K	CO_3	HCO_3	Cl^-	SO_4
			meq L^{-1}							
1	7.95	0.56	2.34	3.64	1.00	0.94	0.40	0.12	1.56	3.50
2	8.53	1.39	4.12	6.92	1.71	5.28	0.70	0.12	3.01	10.08
3	8.42	0.98	3.44	5.75	1.27	2.83	0.58	0.12	2.51	6.64
4	8.56	1.10	4.68	6.97	1.77	2.31	1.05	0.12	3.81	6.07

Análisis de tejido vegetal y sistemas de producción

Atributos físicos y del crecimiento de los cladodios de nopal verdura

El análisis de los atributos físicos y de crecimiento de los cladodios evidenció la ausencia de diferencias estadísticas (p<0.05) entre sitios (Tabla 5). La humedad en las muestras frescas de nopal fluctuó entre 93.3 y 94.1% y fueron congruentes con la norma NMX-FF-068-SCFI-2006 (Secretaría de Economía [SE], 2006), la cual establece que debe ser superior a 90%; asimismo, concuerda con lo documentado por diversos autores, quienes registran valores superiores a 90%. Este resultado es soportado por aquellos valores registrados por Betancourt-Domínguez *et al.* (2006) y Maki-Díaz *et al.*, (2015). La materia seca varió entre 5.9 y 6.7%. Las longitudes de los cladodios muestreados correspondieron a la clasificación B de la norma oficial NMX-FF-068-

SCFI-2006 (Secretaría de Economía [SE], 2006): A > 25 cm; B = 18.1-25.0 cm; C = 11.-18.0 cm; Cambray = 7.0-11.0 cm (Maki-Díaz *et al.*, 2015).

En la Tabla 5 se presentan los resultados promedio del análisis proximal hecho a los cladodios. El análisis estadístico no evidenció diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los sitios para estas variables respuesta. Respecto al contenido de fibra cruda, Rives-Castillo *et al.* (2021) señalan que en el nopal corresponde al contenido total de carbohidratos digeribles y no digeribles; trabajos recientes han citado que la proporción de fibra en los cladodios de nopal oscila entre 12 y 20% en base seca, y varía según factores como la variedad, las condiciones de cultivo y el momento de cosecha (Fernández *et al.*, 2019; López & Pérez, 2021); en ese intervalo se están los valores registrados en los sitios 2 y 3, de ellos el sitio 2 presentó los más altos (22.2%) (Tabla 5); donde también se observaron los mayores contenidos en el suelo de N, P Mg, Ca, K, (Tablas 3 y 4); estas características hacen que los cladodios se consideren una fuente importante de fibra dietética, lo que incrementa su valor nutricional y su posible aplicación en dietas tanto humanas como de animales de consumo (García et al., 2018; Martínez *et al.*, 2022).

La proteína cruda, con base en peso seco, tuvo valores entre 12.41 y 14.54% (Tabla 5), que superiores a los indicados por Cornejo-Villegas *et al.* (2010) y Astello-García *et al.* (2015); también los valores promedio para grasa cruda fueron mayores a los documentados por Perucini-Avendaño *et al.* (2021). El sitio 1 presentó los valores más altos tanto para fibra como para el contenido de grasa cruda. Referente a los contenidos en fresco para proteína fueron similares a los registrados por Angulo-Bejarano *et al.*, (2014); mientras que, para grasa cruda, los porcentajes del presente estudio fueron superiores a los indicados por dichos autores (0.2%).

Respecto al contenido de ceniza en peso seco, varió de 17.2 a 19.6%. Estos resultados se asocian a la especie y coinciden con lo citado por González *et al.* (2016). Los valores de proteína cruda en los cladodios de nopal-verdura, aparentemente son altos, con base en el peso seco, pero el contenido sólo corresponde entre 6 y 7% del peso total; lo que significa que, en 100 g, de nopales frescos alrededor de 0.8 g corresponden a proteína cruda. En algunos estudios se señala que es posible asociar el valor nutricional de los cladodios de nopal verdura a su contenido de minerales y fibra dietética; y que esta última tiene un efecto potencial prebiótico, lo que se ha corroborado en estudios que abordan la evaluación de su viabilidad y actividad metabólica en intestino humano (Missaoui *et al.*, 2020).

Atributos nutrimentales de los cladodios de nopal verdura

El análisis de Kruskall-Wallis evidencio diferencias significativas ($p<0.05$) para el Zn entre los sitios 1 y 4, y para el Mn entre los sitios 1 y 3 (Tabla 5). En promedio, los cladodios del sitio 1 mostraron los valores más altos de Mn, N y proteína. El Mn desempeña un papel crucial en el proceso de la fotosíntesis, respiración y asimilación de nitrógeno, interviene en la síntesis de proteína, y podría explicar el vigor de los órganos vegetativos como los cladodios de nopal provenientes del sitio 1 (Blanco-Macías *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2019). Los cladodios del sitio 4 tuvieron en promedio, las concentraciones más altas de Zn, P, K y S; mientras que, las concentraciones promedio de Mg y Na fueron similares entre los sitios muestreados (Tabla 5). El S, aunque menos documentado en investigaciones de este cultivo, es necesario para la formación de aminoácidos como la metionina y la cisteína, fundamentales en la estructura proteica y la regulación metabólica (Zúñiga-Tarango *et al.*, 2009).

En contraste, el Zn en los humanos interviene en procesos de crecimiento y desarrollo, madurez sexual, respuesta inmune, sensibilidad de los sentidos del gusto y olfato (Solano *et al.*, 1998). Se estima que 83% de este mineral se localiza en músculos y huesos, y desempeña funciones importantes en más de 300 enzimas, incluidas las del ADN.

Cabe mencionar que las concentraciones de K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn y Cu fueron menores a las indicados por Zúñiga-Tarango *et al.*, (2009). Las concentraciones del macro y micro elementos, en términos de intervalos de suficiencia nutrimental para *O. ficus-indica* sugieren que las de N, P, K y Mg registradas en este estudio fueron óptimas de acuerdo con lo consignado por Blanco-Macías *et al.*, (2009);sin embargo, la concentración de Ca fue ligeramente deficiente; mientras que las concentraciones de Zn, Fe y Cu fueron deficientes pero suficientes para el MN.

Tabla 5. Atributos físicos de crecimiento, análisis proximal, contenido nutrimental de cladodios de nopal verdura recolectados en la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.

Table 5. Physical growth attributes, proximal analysis, nutritional content of nopal cladodes collected in the Milpa Alta municipality, Mexico City. Different letters represent significant differences by the Kruskall-Wallis test.

Variable		Sitio			
		1	2	3	4
A) Atributos físicos de crecimiento					
Largo		22.7	19.6	21.7	22.4
Ancho	cm	10.6	9.5	10	9.9
Grosor		0.7	0.7	0.7	0.8
Peso Húmedo	g	122.9	88.3	113.1	111.7
Peso Seco	g	7.4	5.6	7.2	6.6
Humedad	%	93.9	93.3	93.5	94.1
Área	cm^2	241.3	188.9	220.3	222.2
B) Análisis proximal (Base seca)					
Materia seca		6.1	6.7	6.5	5.9
Proteína cruda		14.54	12.41	12.41	13.92
Grasa cruda	%	11	9.4	9.4	10.5
Fibra cruda		11	22.2	14.5	18.5
Ceniza		17.6	17.2	19.6	19.7
c) Contenido nutrimental					
N		2.24	1.91	1.91	2.14b
P		0.26	0.24	0.24	0.35
K		5.34	5.34	5.34	5.57
Proteína	%	14.54	12.41	12.41	13.92
S		0.05	0.05	0.05	0.11b
Ca		2.06	2.42	2.42	1.94
Mg		1.07	1.16	1.16	1.24
Na		0.03	0.02	0.02	0.02
Fe		54	57	57	48.2
Zn	mg kg^{-1}	21.8b	21.1b	21.1b	23.0a
Mn		37.2a	26.1b	26.1b	25.9b
Cu		8	6.4	6.4	8.3

*Entre columnas, letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$) por la prueba de Kruskall-Wallis.

Relaciones del suelo con el contenido de macro y micronutrientes en cladodios de nopal-verdura

El análisis por componentes principales indicó que hubo una relación estrecha y positiva entre el contenido de proteína y las concentraciones de N total (%), P total (%) y K (mg kg^{-1}) de los cladodios con los macronutrientes del suelo, lo que fue más evidente en el sitio 2 (Figura 1A; Cuadrante I), el cual presentó una mayor concentración de estos elementos del suelo (Mg, Ca, K, P y N), además de los valores más altos de fibra en los cladodios de nopal-verdura (Tabla 5).

Núm. 60: 307-324 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Los resultados son coherentes con estudios previos en los que se señala que el nitrógeno es fundamental para la síntesis de proteínas. El P también juega un papel crucial en la formación de proteínas y en la transferencia de energía en las plantas, mientras que el K está involucrado en la regulación del metabolismo de carbohidratos y la fotosíntesis (Molina & Rodríguez, 2012). Con base en lo anterior, es factible que la fertilización con estos macronutrientes mejore la calidad nutricional de los cladodios de nopal. Por otro lado, la relación negativa entre el contenido de proteína del nopal con las concentraciones de Na, Mg y Ca (Figura 1B) podría explicarse por el efecto antagonista que ciertos cationes, como el Mg y Ca, tienen sobre la absorción de nutrientes que favorecen la síntesis proteica (Molina & Rodríguez, 2012).

La figura 1B, muestra la relación que se generó entre el contenido de micronutrientes en los cladodios; los resultados indican que existe una relación negativa entre el contenido de proteína, Cu, Mn y las concentraciones de Cu, Zn y Mn del suelo (mg kg^{-1}). Es posible que niveles altos de Cu, Zn y Mn en el suelo o en el tejido vegetal interfieran en la síntesis o acumulación de proteínas, dado que ambos micronutrientes están involucrados en reacciones enzimáticas esenciales (López & Pérez, 2021).

En la figura 1C y D, se presenta la relación que hubo entre el contenido nutrimental del nopal en función de la reacción del suelo y la salinidad. Se observa que existe una relación negativa entre el Mg, Na y Ca de los cladodios con la reacción del suelo y su salinidad. La respuesta en la asimilación de estos nutrientes sugiere que un pH más alto (condiciones alcalinas) puede limitar la disponibilidad de estos nutrientes para la planta, debido a la presión osmótica o menor movilidad en suelos alcalinos. Mientras que la relación con la salinidad edáfica refuerza la idea de que altos niveles de Na generan desequilibrios nutricionales. Este fenómeno se debe a que la alta concentración de ciertos cationes (como Na y Ca) compiten con otros elementos, lo cual limita su disponibilidad o absorción (Figueroa-Pérez *et al.*, 2018).

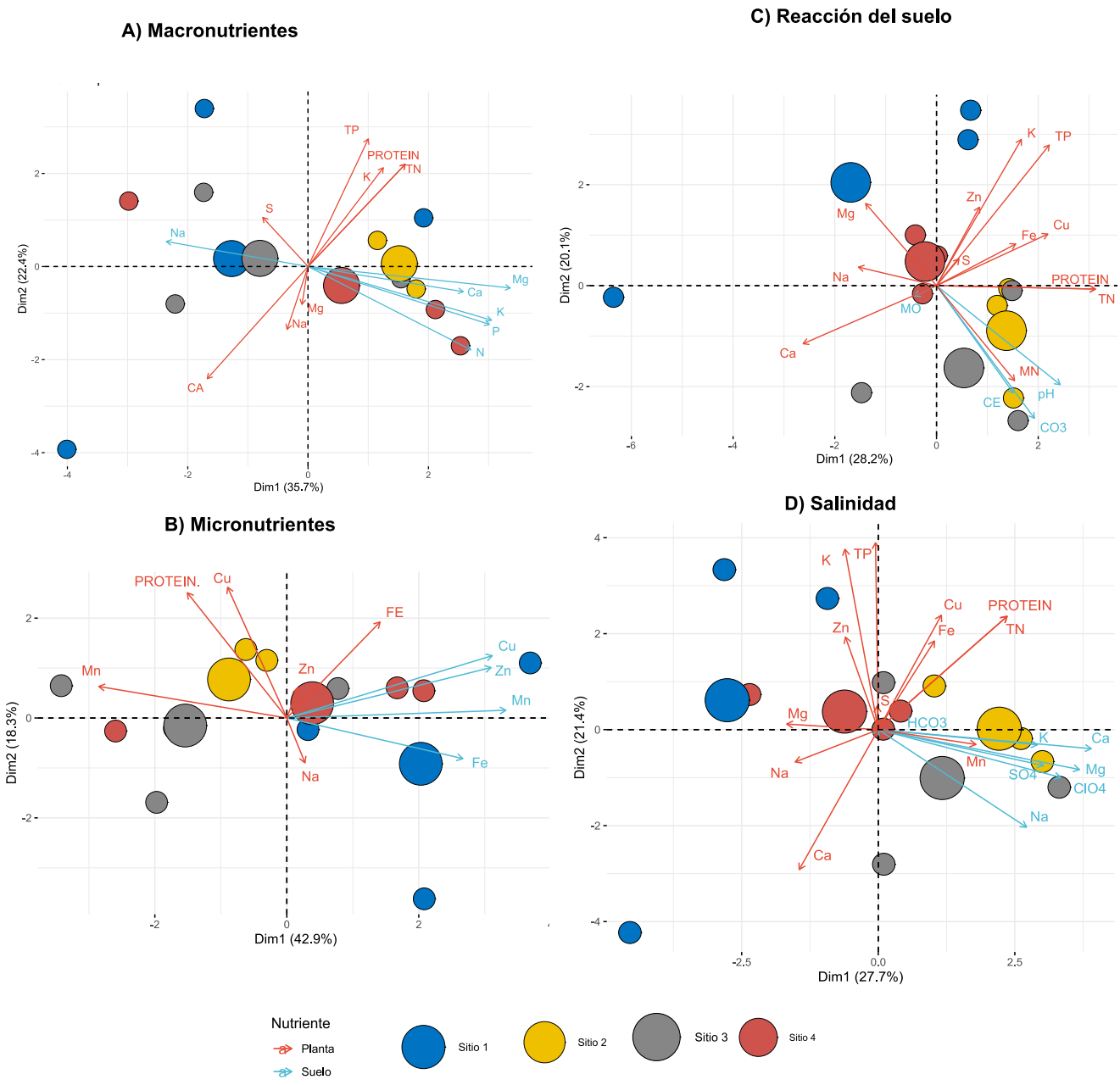


Figura 1. Análisis de componentes principales para evidenciar la relación entre el contenido de micronutrientes en cladodios de nopal-verdura (*O. ficus-indica* (L.) Mill. var. Milpa Alta y las características edáficas de macronutrientes (A), micronutrientes (B), reacción (C) y salinidad (D) de cuatro sitios productores de la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México.

Figure 1. Principal component analysis to demonstrate the relationship between micronutrient content in cladodes of nopal-vegetable (*O. ficus-indica* (L.) Mill. var. Milpa Alta and the soil characteristics of macronutrients (A), micronutrients (B), reaction (C) and salinity (D) of four production sites in the Milpa Alta municipality, Mexico City.

Efecto de las propiedades químicas del suelo sobre la proteína, ceniza y fibra de los cladodios de nopal-verdura

El modelo de ecuaciones estructurales (MEE) evidenció un buen ajuste entre el modelo propuesto y el estimado (Fisher de C=22.7, $P<0.05$). En la Figura 2 se exhiben únicamente las relaciones de las variables que fueron significativas ($P<0.05$). El análisis detectó efectos positivos y significativos del Na y el K con la proteína cruda. En contraste, estos macro elementos junto con el Cu influyeron de manera negativa en el contenido de cenizas (Figura 2), lo que sugiere una posible alteración en el equilibrio iónico y mineral de los tejidos. El Zn y los CO_3 influyeron negativamente en la fibra, mientras que la MO registró un efecto positivo en el contenido de fibra cruda (Figura 2).

La optimización de los niveles de K y Na podrían maximizar la calidad proteica de los cladodios; mientras que, un control cuidadoso del Zn y los carbonatos en el suelo evitarían efectos adversos sobre la fibra (Mondragón-Jacobo & Méndez-Gallegos, 2018). Los resultados sugieren que elementos como el Na y K tienen un papel relevante en la síntesis y acumulación de proteínas (Aguilar-Carpio *et al.*, 2016). El potasio es esencial en el mantenimiento del equilibrio osmótico, la activación enzimática, y síntesis de aminoácidos; el sodio, en cantidades controladas, desempeña funciones regulatorias en condiciones específicas, ya que ayuda en el metabolismo y balance hídrico (Aguirre & Santiago, 2018).

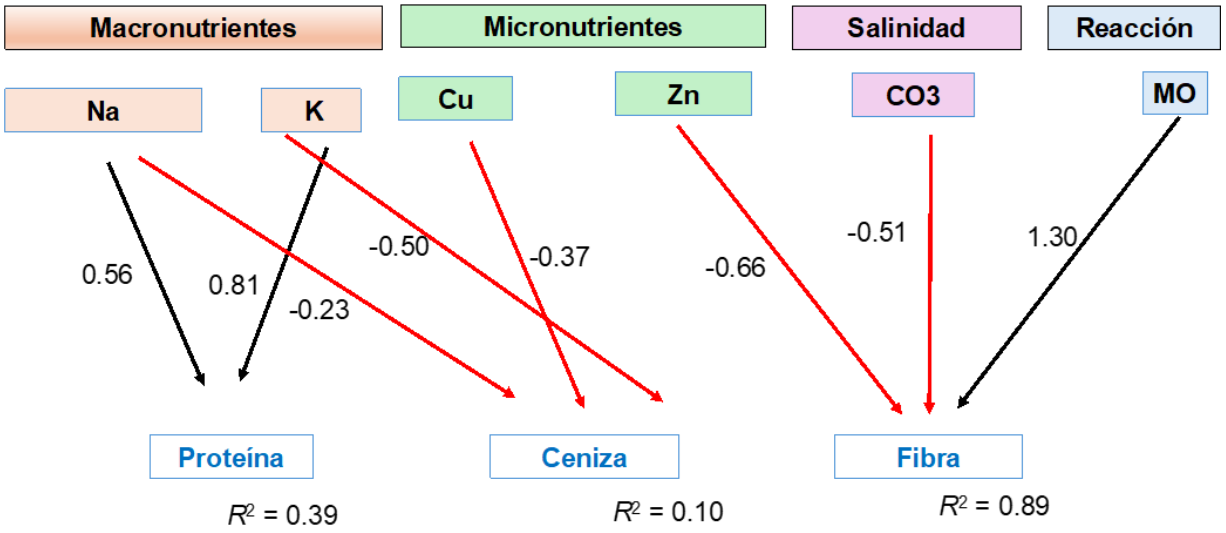


Figura 2. Modelos de ecuaciones estructurales para el efecto de las propiedades químicas del suelo sobre la proteína, ceniza y fibra de los cladodios de nopal verdura variedad Milpa Alta. Las flechas rojas representan efectos negativos y las flechas negras efectos positivos. R^2 es el coeficiente de determinación y explica en porcentaje de la cantidad de la variación *Y* en función de *X* (efectos-respuestas).

Figure 2. Structural equation models for the effect of soil chemical properties on protein, ash and fiber of Milpa Alta variety nopal cladodes. Red arrows represent negative effects and black arrows positive effects. R^2 is the coefficient of determination and explains in percentage the amount of variation Y as a function of X (effects-responses).

En su conjunto los resultados de este trabajo permitieron alcanzar el objetivo establecido y validaron la hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

Las propiedades físicas y químicas de los suelos evaluados ejercen un efecto significativo sobre las características nutrimentales de los cladodios de nopal verdura de la variedad Milpa Alta, particularmente en las concentraciones de micronutrientes Zn, Fe y Cu, los cuales están relacionados con la calidad comercial del producto.

Los suelos franco-texturales analizados presentan una buena estructura, sin compactación excesiva; sin embargo, se observaron variaciones en la capacidad de retención de agua y en la salinidad entre los diferentes sitios de muestreo. En particular, el sitio 3, con mayor contenido de arcilla, muestra una retención de agua más eficiente, lo cual resulta útil en épocas de escasez hídrica; por otro lado, el sitio 4 requeriría un manejo agronómico adaptado a su menor capacidad de retención.

A pesar de que los niveles de nitrógeno y fósforo de los suelos estudiados son adecuados para el desarrollo vegetativo del nopal, es necesario atender deficiencias en micronutrientes y ajustar el pH del suelo en algunos sitios, ya que estos factores pueden limitar la disponibilidad de nutrientes esenciales.

Aun cuando el sistema de producción bajo estudio mantiene una aportación constante y abundante de materia orgánica al suelo, los procesos de mineralización y la calidad de la materia orgánica edáfica no garantizan un aporte nutrimental suficiente, especialmente en lo que respecta a micronutrientes. Los análisis mediante ecuaciones estructurales (MEE) muestran que elementos como el potasio (K) influyen positivamente en el contenido de proteínas, mientras que las deficiencias de zinc (Zn) y la alta presencia de carbonatos (CO_3) afectan negativamente los porcentajes de fibra en los cladodios.

RECOMENDACIONES

En las áreas de producción de nopal se recomienda la implementación de programas de fertilización y prácticas de manejo que se basen en las condiciones edáficas de cada huerto.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Carpio, C., Rangel-Estrada, S. E., Sánchez-Mendoza, S. M. y Pérez-Ramírez, A. (2016). Control químico de maleza en nopal verdura [*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.er]. *Acta Agrícola y Pecuaria, 2*(1), 12-16. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6201366.pdf

Aguirre, A., y Santiago, S. (2018). Funciones fisiológicas del potasio y sodio en plantas: Implicaciones para el manejo de cultivos en condiciones de estrés. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9*(4), 589-602. https://doi.org/10.22201/fesz.20074793e.2018.9.4.289

Angulo-Bejarano P. I., Martínez-Cruz, O., & Paredes-López, O. (2014). Phytochemical content, nutraceutical potential and biotechnological applications of an ancient Mexican plant: Nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Current Nutrition & Food Science, 10*(3), 196-217. https://www.ingentaconnect.com/content/ben/cnf/2014/00000010/00000003/art00005

Association of Official Analytical Chemist. (1980). *Official Methods of Analysis.* AOAC.

Association of Official Analytical Chemist (1990). *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (Vol. II). AOAC.

Astello-García, M. G., Cervantes, I., Nair, V., Santos-Díaz, M. D. S., Reyes-Agüero, A., Guéraud, F., Negre-Salvayre, A., Rossignol, M., Cisneros-Zevallos, L., & Barba de la Rosa, A. P. (2015). Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. *Journal of Food Composition and Analysis, 43*, 119-130. https://doi.org/10.1016/j. jfca.2015.04.016

Atalah, E., y Pak, N. (1997). Aumente el consumo de verduras, frutas y legumbres. En C. Castillo, R. Uauy, y E. Atalah (Edits.), *Guías de alimentación para la población chilena.* (págs. 79-89). Imprenta La Nación.

Bejar-Pulido, S. J., Cantú Silva, I., Yáñez Díaz, M. I. y Luna Robles, E. O. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 11*(59), 31-50. https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666

Béjar-Pulido, S. J., Cantú-Silva, I., & Luna-Robles, E. O. (2021). Effect of different land use on chemical properties of an Andosol in Michoacán, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 24*(3), Article 121. http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3629

Betancourt-Domínguez, M. A., Hernández-Pérez, T., García-Saucedo, P., Cruz-Hernández, A., & Paredes-López, O. (2006). Physico-chemical changes in cladodes (nopalitos) from cultivated and wild cacti (*Opuntia* spp.). *Plant Foods for Human Nutrition, 61*, 115-119. https://doi.org/ 10.1007/s11130-006-0008-6

Blanco-Macías, F., Magallanes-Quintanar, R., Valdez-Cepeda, R. D., Vázquez-Alvarado, R., Olivares-Sáenz, E., Gutiérrez-Ornelas, E., y Vidales-Contreras, J. A. (2009). Comparación entre normas DNC y estándares nutrimentales de la técnica de curva límite: CASO *Opuntia ficus-indica* L. *Revista Chapingo Serie Horticultura, 15*, 217-223. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2009000200017&lng=es

Bonilla-Rodrígez, R. (2014). Urbanización rural y economía agrícola de sobrevivencia en la Delegación 'Milpa Alta'. *Argumentos, 27*(74), 195-215. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952014000100008&lng=es&tlng=es

Bonilla-Rodríguez, R. (2009). Agricultura y tenencia de la tierra en 'Milpa Alta': Un lugar de identidad. *Argumentos, 22*(61), 249-282. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57952009000300011&lng=es&tlng=es

Bremner, J. M. (1965). Inorganic forms of nitrogen. In A. G. Norman (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part. 2. Chemical and Microbiological Properties* (pp. 1179-1237). American Society of Agronomy. Agronomy Monograph 9.2.

Burgess-Conforti, J. R., Moore Jr., P. A., Owens, P. R., Mill.er, D. M., Ashworth, A. J., Hays, P. D., Evans-White, M. A., & Anderson, K. R. (2019). Are soils beneath coniferous tree stands more acidic than soils beneath deciduous tree stands? *Environmental Science and Pollution Research, 26*, 14920-14929. https://doi.org/10.1007/s11356-019-04883-y

Cárdenas, Y., Ríos-Silva, M., Huerta, M., López, M., Bricio-Barrios, J., Ortiz-Mesina, M., Urzúa, Z., Saavedra-Molina, A., & Trujillo, X. (2019). The comparative effect of nopal and mucilage in metabolic parameters in rats with a high-fructose diet. *Journal of Medicinal Food, 22*(5), 538-541. https://doi.org/10.1089/jmf.2018.0124

Casas, A., & Barbera, G. (2002). Mesoamerican domestication and diffusion. In P. S. Nobel, *Cacti: Biology and uses* (pp. 143-162). University of California Press.

Comisión Nacional del Agua. (2022). *Clima y precipitaciones en la Ciudad de México*. Comisión Nacional del Agua. https://www.conagua.gob.mx

Cornejo-Villegas, M. A., Acosta-Osorio, A. A., Rojas-Molina, I., Gutiérrez-Cortéz, E., Quiroga, M. A., Gaytán, M., Herrera, G., & Rodríguez-García, M. E. (2010). Study of the physicochemical and pasting properties of instant corn flour added with calcium and fibers from nopal powder. *Journal of Food Engineering, 96*(3), 401-409. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.08.014

Cushman, J. C., & Borland, A. M. (2002). Induction of Crassulacean acid metabolism by water limitation. *Plant Cell and Environment, 25*(2), 295-310. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00760.x

Fernández, A. M., González, R., y Delgado, P. (2019). Composición nutricional de cladodios de nopal en diferentes condiciones agrícolas. *Revista de Ciencias Agropecuarias, 45*(2), 134-142. https://doi.org/10.1234/rca.v45i2.5678

Fernández-Pavia, Y. L., García-Cué, J. L., López-Jiménez, A., y Mora-Aguilera, G. (2017). Inducción de deficiencias nutrimentales en nopal verdura *Opuntia ficus indica* (L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6*(6), 1417-1422. https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.586

Figueroa-Pérez, M. G., Pérez-Ramírez, I. F., Paredes-López, O., Mondragón-Jacobo, C. & Reynoso-Camacho, R. (2018). Phytochemical composition and *in vitro* analysis of nopal (*O. ficus-indica*) cladodes at different stages of maturity. *International Journal of Food Properties, 21*(1), 1728-1742. https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1206126

Galicia-Villanueva, S., EscaMill.a-García, P. E., Alvarado-Raya, H., Aquino-González, L. V., Serna-Álvarez, H., y Hernández-Cruz, L. M. (2017). Plantación experimental de nopal para evaluación de sistemas de fertilización y extracción de mucílago. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8*(5), 1087-1099. https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.110

García, M. A., López, P., & Ramírez, R. (2018). Composición nutrimental de cladodios de nopal en diferentes condiciones de cultivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9*(3), 123-132.

González, D., Ramírez, J. R., Mendoza, J. M., Mosqueda, S., y García-Muñoz, A. R. A. (2016). Estudio nutricional del nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en sus diferentes tipos de cocción. *CAUCE*, 2-16.

González, M. R. (2010). Usos y significados del nopal, la tuna, el xoconostle y la grana cochinilla. Miradas y saberes de las mujeres en el sistema producto. En J. P. Mejorada, *Memorias del VII encuentro multidisciplinario de investigación* (pp. 1). Universidad Nacional Autónoma de México.

Guo, L., Wu, G., Li, Y., Li, C., Liu, W., Meng, J., Liu, H., Yu, X., & Jiang, G. (2016). Effects of cattle manure compost combined with chemical fertilizer on topsoil organic matter, bulk density and earthworm activity in a wheat–maize rotation system in Eastern China. *Soil and Tillage Research, 156*, 140-147. http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2015.10.010

Hernández-Urbiola, M. I., Pérez-Torrero, E., & Rodríguez-García, M. E. (2011). Chemical analysis of nutritional content of prickly pads (*Opuntia ficus-indica*) at varied ages in an organic harvest. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 8*, 1287-1295. http://doi:10.3390/ijerph8051287

Inglese, P., Mondragón, C., Nefzaoui, A., y Sáenz, C. (2018). *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal.* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Centro Internacional de Investigaciones Agrícolas en Zonas Áridas. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i7628es

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Información geográfica de la alcaldía Milpa Alta, Ciudad de México*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx

Lefcheck, J. S. (2016). piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution, 7*(5), 573-579. http://doi:10.1111/2041-210X.12512

López, J., y Pérez, M. (2021). Evaluación de la fibra dietética en cladodios de *Opuntia* spp. cultivados en distintas etapas de maduración. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 39*(3), 123-132. https://doi.org/10.5678/jpnss.v39i3.91011

Maki-Díaz, G., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, R., Arévalo-Galarza, M. L., Calderón-Zavala, G., y Anaya-Rosales, S. (2015). Características físicas y químicas de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) para exportación y consumo nacional. *Agrociencia, 49*(1), 31-51. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952015000100003&lng=es&tlng=es

Martínez, L. F., Sánchez, E., & Torres, J. (2022). Perfil nutricional y potencial de uso de cladodios de nopal en alimentación humana. *Nutritional Journal, 15*(4), 210-220.

Martínez-Villavicencio, N., López-Alonzo, C. V., Pérez-Leal, R., y Basurto-Sotelo, M. (2011). Efectos por salinidad en el desarrollo vegetativo. *Tecnociencia Chuhuahua, 5*(3), 156-161. https://doi.org/10.54167/tch.v5i3.694

Medina-García, G., Zegbe, J. A., Ruiz-Corral, J. A., Casa-Flores, J. I., y Rodríguez-Moreno, V. M. (2021). Influencia del cambio climático en los requerimientos térmicos del nopal tunero (*Opuntia* spp.) en el centro-norte de México. *Revista Bio Ciencias*, Artículo e1007. https://doi.org/10.15741/revbio.08.e1007

Méndez-Gallegos, S. J., y García-Herrera, J. (2006). La tuna: producción y diversidad. *Biodiversitas, 68*, 1-15. https://www.biodiversidad.gob.mx/conabio/publicaciones/biodiversitas

Meraz-Maldonado, N., Valle-Guadarrama, S., Hernández-Morales, J., Anaya-Rosales, S., Rodríguez-Maciel, J. C., & Leyva-Ruelas, G. (2012). Quality of three sizes of prickly

pear cactus stems (*Opuntia ficus indica* L.'Atlixco'). *African Journal of Agricultural, 7*(32), 4512-4520. https://doi.org/10.5897/AJAR12.974

Missaoui, M., D'Antuono, I., D'Imperio, M., Linsalata, V., Boukhchina, S., Logrieco, A. F., & Cardinali, A. (2020). Characterization of micronutrients, bioaccessibility and antioxidant activity of prickly pear cladodes as functional ingredient. *Molecules, 25*(9), 2176. https://doi.org/10.3390/molecules25092176

Mitma-Ramírez, C. A. (2024). *Propuesta de mejora en el uso de imágenes satelitales para mitigar la salinidad en zonas agrícolas de la región Ica: Caso TECNONAVAL.* https://hdl.handle.net/20.500.12892/973

Molina, E., y Rodríguez, J. H. (2012). Fertilización con N, P, K, S, y curvas de absorción de nutrimentos en arroz var. Cfx 18 en Guanacaste. *Agronomía Costarricense, 36*(1), 39-51. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242012000100003&lng=en&tlng=es

Mondragón-Jacobo, C., y Méndez-Gallegos, S. J. (2018). Producción y utilización del nopal como hortaliza o Nopalitos. En P. Inglese, J. C. Mondragón, A. Nefzaoui, y C. Sáenz (Edits.), *Ecología del cultivo, manejo y usos del nopal* (pp. 244). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Oksanen, F. J. (2017). Vegan: Community Ecology Package (R package version 2.4. 3.). 15 de abril de 2019. https://CRAN.R-project.org/package=vegan

Osorio-Córdoba, J., Pelayo-Zaldívar, C., Verde-Calvo, J. R., Ponce-Valadez, M., Díaz de León-Sánchez, F., Bosquez-Molina, E., y Rodríguez-Huezo, M. E. (2011). Conservación del nopal verdura "'Milpa Alta'" (*Opuntia ficus indica* Mill.) desespinado en envases con atmósfera modificada. *Revista Mexicana de Ingeniería Química, 10*, 93-104. http://rmiq.org/iqfvp/eVol10No1.html

Perucini-Avendaño, M., Nicolás-García, M., Jiménez-Martínez, C., Perea-Flores, M. de J., Gómez-Patiño, M. B., Arrieta-Báez, D., & Dávila-Ortiz, G. (2021). Cladodes: Chemical and structural properties, biological activity, and polyphenols profile. *Food Science and Nutrition, 9*(7), 4007-4017. http://doi: 10.1002/fsn3.2388

Prosky, L., Asp, N. G., Schweizer, T. F., Devries, J. W., & Furda, I. (1988). Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: interlaboratory study. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists, 71*(5), 1017-1023. https://doi.org/10.1093/jaoac/71.5.1017

R Development Core Team. (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing (Version 4.2) [Software]. R Foundation for Statistical Computing.

Reynolds, S. G., Arias-Jiménez, E., Mondragón-Jacobo, C., y Pérez-González, S. (2003). *El nopal (Opuntia* spp.*) como forraje, Estudio FAO Producción y Protección Vegetal* (Vol. 169). FAO.

Rives-Castillo, S. C. H., Correa-Pacheco, Z. M., Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I., Schettino-Bermudez, B. F., Ortega-Gudiño, P., y Barajas-Cervantes, A. (2021). Análisis químico proximal y térmico en harinas de productos residuales de nopal (*Opuntia ficus-indica*) para obtención de compuestos poliméricos biobasados. *Agrociencia, 55*(5), 403-416. https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2516.

Roldán-Cruz, E. I., y Chavarría-Miranda, H. (2022). Nopal/tuna, mercado y territorio en México: Un enfoque de capacidades. *Eutopía, Revista de Desarrollo Económico Territorial, 21*, 100-132. http://doi10.17141/eutopia.21.2022.5435

Santander, J. S., Lira, B. P., Arteaga, K. A., & Camarillo, J. P. P. (2024). Physicochemical characterization of agricultural soils under a traditional system in the Mezquital Valley, Hidalgo. *South Florida Journal of Development, 5*(5), Article e3937. https://doi.org/10.46932/sfjdv5n5-017

Santiago-Lorenzo, M., López-Jiménez, A., Saucedo-Veloz, C., Cortés-Flores, J. I., Jaén-Contreras, D., y Suárez-Espinosa, J. (2016). Composición nutrimental del nopal verdura producido con fertilización mineral y orgánica. *Revista Fitotecnia Mexicana, 39*(4), 403-407. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000400403&lng=es&tlng=es

Recibido:
4/marzo/2025

Aceptado:
27/junio/2025

Secretaría de Desarrollo Rural y Equidad para las Comunidades. (2016). *La grandeza del nopal.* SEDEREC. https://www.sepi.cdmx.gob.mx/storage/app/media/recetarionopal.pdf

Secretaría de Economía. (2006). Norma Mexicana NMX-FF-068-SCFI-2006, Hortaliza Fresca-Nopal Verdura (*Opuntia* spp.)-Especificaciones. Diario Oficial de la Federación. http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2007/nmx-ff-068-scfi-2006.pdf. 12 de mayo de 2020.

Secretaría de Protección Civil de la CDMX. (2014). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México. Mapa de riesgos de la Delegación 'Milpa Alta'.* Secretaría de Protección Civil.

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. http://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf. 12 de mayo de 2020.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2021). *Avances de siembras y cosechas. Resumen por Estado. Zumpango, México. Diciembre 2020. Riego+temporal. Perennes. Nopalitos*. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/ ResumenProducto.do

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Estadísticas de Producción Agrícola*. https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119

Silva, M. A., Gonçalves-Albuquerque, T., Pereira, P., Ramalho, R., Vicente, F., Oliveira, M. B. P. P., & Costa, H. S. (2021). *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.: A multi-benefit potential to be exploited. *Molecules, 26*(4), 951. https://doi.org/10.3390/molecules26040951

Solano, L., Meertens, L., Peña, E., y Arguello, F. (1998). Deficiencia de micronutrientes. Situación actual. *Anales Venezolanos de Nutrición, 11*(1), 48-54. https://www.analesdenutricion.org.ve/ediciones/1998/1/art-9/

Tavera-Cortés, M. E., EscaMill.a-García, P. E., & Pérez-Soto, F. (2018). Impacts on productivity through sustainable fertilization of nopal (*Opuntia ficus-indica*) crops using organic compost. *Journal of Agricultural Science, 10*(4), 297-305. http://doi.org/10.5539/jas.v10n4p297

Vázquez, I. E. (2023). *Influencia de la aplicación de enmiendas orgánicas generadas a partir de residuos de Pleurotus ostreatus sobre el rendimiento del cultivo de Opuntia ficus-indica (Doctoral dissertation).* Universidad Politécnica del Estado de Morelos.

Zúñiga-Tarango, R., Orona-Castillo, I., Vázquez-Vázquez, C., Murillo-Amador, B., Salazar-Sosa, E., López-Martínez, J. D., García-Hernández, J. L., y Rueda-Puente, E. (2009). Desarrollo radical, rendimiento y concentración mineral en nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. en diferentes tratamientos de fertilización. *Journal of the Professional Association for Cactus Development, 11*(3), 53-68. https://www.jpacd.org/jpacd/article/view/113/92

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

EVALUACIÓN FITOQUÍMICA DE EXTRACTOS DE LA RESINA DE *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.

PHYTOCHEMICAL EVALUATION OF RESIN EXTRACTS FROM *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.

Díaz-Nuñez, J.L., F.I. Pastenes-Felizola, P.N. Núñez-Aragón, L.A. Flores-Hernández

EVALUACIÓN FITOQUÍMICA DE EXTRACTOS DE LA RESINA DE *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.
PHYTOCHEMICAL EVALUATION OF RESIN EXTRACTS FROM *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 325-336 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.19

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Núm. 60: 325-336 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Evaluación fitoquímica extractos de la resina de *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.

Phytochemical evaluation of resin extracts from *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl.

Flores-Hernández, L.A., F.I. Pastenes-Felizola, J.L. Díaz-Nuñez, P.N. Núñez-Aragón

EVALUACIÓN FITOQUÍMICA DE EXTRACTOS DE LA RESINA DE Bursera fagaroides (Kunth) Engl.

PHYTOCHEMICAL EVALUATION OF RESIN EXTRACTS FROM Bursera fagaroides (Kunth) Engl.

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 325-336. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.19

José Luis Díaz-Nuñez https://orcid.org/0000-0002-3274-7542
Laboratorio de Fitoquímica, Postgrado en Botánica, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Km 36.5, Carretera Federal México-Texcoco, Texcoco, Estado de México, México, CP 56230.

Fanny Imelda Pastenes-Felizola https://orcid.org/0009-0009-8913-0939
Instituto de Investigación Área Ciencias Naturales. Universidad Autónoma de Guerrero. Av. Lázaro Cárdenas s/n. Ciudad Universitaria Sur Chilpancingo, Guerrero, México, CP 39087

Pablo Noé Núñez-Aragón https://orcid.org/0000-0001-5228-201X
Centro de Estudios Profesionales, Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero, km 14 carretera Iguala-Cocula, Cocula, Guerrero, México, CP 40581

Luis Antonio Flores-Hernández / flores.luis@inifap.gob.mx
https://orcid.org/0000-0003-4224-4348
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Campo Experimental Iguala. Km. 2.5, Carretera Iguala-Tuxpan Iguala de la Independencia, Guerrero, México, CP 40000

RESUMEN El género *Bursera* Jacq. ex L. (Burseraceae) es un grupo de árboles y arbustos caducifolios representativos de bosques tropicales secos que se caracterizan por producir resinas aromáticas que presentan propiedades farmacológicas importantes. El objetivo de esta investigación fue obtener extractos de la resina de *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl., recolectada en Puebla, con disolventes de diferente polaridad, para identificar y cuantificar metabolitos secundarios, y evaluar su potencial antioxidante. Por medio de un muestreo dirigido se seleccionaron árboles adultos de *B. fagaroides* y se realizó una recolecta de resina solidificada. Luego la resina paso por una extracción secuencial con hexano, diclorometano y metanol para obtener extractos. Se obtuvo el rendimiento de los extractos y en ellos se identificaron y cuantificaron metabolitos secundarios por medio de técnicas colorimétricas y curvas estándar con moléculas de referencia. De igual manera, se analizó la actividad antioxidante de los extractos con el método 2,2-difenol-1-picrilhidrazilo (DPPH). El mayor rendimiento de extracto (990.0 ± 16.5 mg g^{-1} de resina) se obtuvo de la extracción con diclorometano (ED). En los extractos se identificaron terpenos, saponinas, fenoles y flavonoides. En el extracto de ED el rendimiento de terpenos fue de 638.2 ± 23.6 mg de equivalentes de ácido masticadienóico g^{-1} de extracto y en el extracto de extracción con metanol el rendimiento de fenoles fue de 19.9 ± 2.0 mg de equivalentes de ácido gálico g^{-1} de extracto. Los extractos no presentaron actividad antioxidante por el método de DPPH. Los extractos de la resina de *Bursera fagaroides* son una fuente de terpenos, saponinas, fenoles y flavonoides que no presentan propiedades antioxidantes.
Palabras clave: terpenos, saponinas, fenoles, flavonoides, actividad antioxidante.

ABSTRACT**:** The genus *Bursera* Jacq. ex L. (Burseraceae) comprises a group of deciduous trees and shrubs characteristic of tropical dry forests, known for producing aromatic resins with important pharmacological properties. The aim of this study was to obtain resin extracts of *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl., collected in Puebla, using

solvents of varying polarity, to identify and quantify secondary metabolites, and to evaluate their antioxidant potential. Through targeted sampling, adult *B. fagaroides* trees were selected and solidified resin was collected. The resin was subjected to sequential extraction with hexane, dichloromethane, and methanol to obtain the extracts. Extraction yield was calculated, and secondary metabolites were identified and quantified using colorimetric techniques and standard curves with reference compounds. The antioxidant activity of the extracts was evaluated using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) method. The highest extract yield (990.0 ± 16.5 mg g^{-1} of resin) was obtained with dichloromethane (DCM extract). Terpenes, saponins, phenols, and flavonoids were identified in the extracts. The DCM extract yielded 638.2 ± 23.6 mg of masticadienoic acid equivalents per gram of extract in terpenes, while the methanol extract yielded 19.9 ± 2.0 mg of gallic acid equivalents per gram of extract in phenols. None of the extracts exhibited antioxidant activity using the DPPH method. The resin extracts of *Bursera fagaroides* are a source of terpenes, saponins, phenols, and flavonoids, but do not show antioxidant properties.
Key words: terpenes, saponins, phenols, flavonoids, antioxidant activity.

INTRODUCCIÓN

El género *Bursera* es un grupo de árboles y arbustos caducifolios representativos de bosques tropicales secos, con una distribución de 94 especies en México, de las cuales 80 son endémicas y 50 se localizan en cuenca del rio Balsas (Barrales-Alcalá y Bonfil 2024; Blancas-Vázquez *et al*., 2022).

En numerosas comunidades rurales de México y desde tiempos antiguos las especies del género *Bursera* han tenido importancia cultural, económico, ecológica, medicinal y religiosa (Blancas *et al*., 2022; Rio *et al*., 2022). Los árboles y arbustos sirven de cercas vivas para delimitar propiedades, de la corteza se pueden extraer resinas aromáticas (copales) y látex, la madera sirve para fabricar herramientas agrícolas, figuras religiosas, máscaras tradicionales y en algunos casos se puede usar como leña (Blancas-Vázquez *et al*., 2022; Rio *et al*., 2022).

Las resinas del género *Bursera* son sustancias que tiene una composición química rica en terpenos (mono, sesqui y tri-terpenos), y su función es proteger a las plantas de herbívoros y microrganismo patógenos (Blancas *et al*., 2022; Antúnez-Mojica *et al*., 2021). A la vez, presentan actividad antioxidante, antimicrobiana (bactericida y fungicida), desinfectante, antiviral, antiinflamatoria y anticancerígena (Blancas *et al*., 2022).

Una resina poco estudiada es la producida por la especie de *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl., un grupo de árboles y arbustos diocos o hermafroditas que pueden alcanzar hasta diez metros de altura y se encuentran distribuidos en matorrales xerófilos, selvas tropicales caducifolias y bosques de encino de México (Blancas-Vázquez *et al*., 2022). Además, esta especie en la medicina tradicional se utiliza para tratar desordenes estomacales, inflamaciones, daños físicos, lesiones cutáneas e incluso algunos tipos de tumores y cáncer (Pérez-Mejía *et al*., 2024).

En la resina de *B. fagaroides* los metabolitos secundarios más estudiados son lignanos que presentan propiedades anticancerígenas (Antúnez-Mojica *et al*., 2021; Marcotullio *et al*., 2018). Sin embargo, aunque se sabe que el componente mayoritario de las resinas son terpenos (Blancas *et al*., 2022), las investigaciones de la identificación y actividad de otros metabolitos secundarios presentes en la resina de *B. fagaroides* son escasas (Barrales-Alcalá y Bonfil 2024; Blancas *et al*., 2022). Por lo que, el objetivo de esta investigación fue obtener extractos con disolventes de diferente polaridad de la resina de *Bursera fagaroides* recolectada en Puebla, con el propósito de identificar y cuantificar metabolitos secundarios por medio de técnicas colorimétricas, y evaluar su potencial antioxidante, para enriquecer el conocimiento fitoquímico que se tiene acerca de la resina que produce esta especie.

Núm. 60: 325-336 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Por medio de un muestreo dirigido, en el municipio de "Huehuetlan El Grande", Puebla, México, paralelos 18º 41' 06" y 18º 53' 12" de latitud norte y meridianos 98º 03' 18" y 98º 15' 06" de longitud oeste, en agosto de 2014 (verano), se seleccionaron cinco árboles adultos de *Bursera fagaroides* identificados por la Dra. Agustina Rosa Andrés Hernández investigadora de la Facultad de Biología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, al mismo tiempo, una muestra del espécimen fue herborizado y depositado en el herbario de la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGC), número de registro 14874. Los árboles seleccionados tenían alturas superiores a los cinco metros y estaban en etapa de fructificación, a los cuales se realizó una recolecta de resina solidificada (color ámbar con tonalidades blanquecinas y oscuras) con un bisturí estéril sin tomar corteza del árbol.

Obtención de los extractos de la resina

Las muestras de resina solidificada recolectadas (5 en total) se molieron en mortero hasta obtener polvo. Se pesaron 3.410 g del polvo de resina por cada muestra y se procedió a realizar una extracción secuencial con hexano (J.T. Baker®), diclorometano (J.T. Baker®) y metanol (J.T. Baker®). Las muestras permanecieron 48 h con los disolventes y después se centrifugaron (45000 rpm, durante 10 min), para recuperar las soluciones. A las soluciones se les evaporaron los disolventes, en rota-evaporador (BUCHI, R-114) a presión reducida y temperatura (60 a 70 °C), para obtener los extractos. En total se obtuvieron 15 extractos, cinco de la extracción con hexano (hexánicos), cinco de la extracción con diclorometano (diclorometánicos) y cinco de la extracción con metanol (metanólicos) y el rendimiento promedio se expresó en miligramo sobre gramo de resina (mg g^{-1} de resina).

Identificación preliminar de metabolitos secundarios en los extractos de la resina

De los 15 extractos se tomó un miligramo y se disolvieron en un mililitro de los disolventes con los que se extrajeron, en tubos de ensayo. Se obtuvieron 15 soluciones a las que se les realizaron las técnicas descritas por Yadav y Agarwala (2011) y del Laboratorio de Fitoquímica Vegetal del Colegio de Postgraduados (CP) Campus Montecillo, para la identificación de seis metabolitos secundarios:

Fenoles. Se tomaron 100 µL de las soluciones, se depositaron en tubos de ensayo (15 en total) y se agregaron tres gotas de reactivo de Folin-Ciocalteau (Sigma-Aldrich®) a 50%. La mezcla de los tubos se agito (Vórtex, GENIE II MIXER) y la reacción positiva fue un cambio de color a tonalidad azul oscuro. El control positivo fue 100 µL de una solución de ácido gálico (MERCK®) de 1 mg mL^{-1} en etanol a 80% y el control negativo fueron solo los reactivos.

Flavonoides. En tubos de ensayo (15 en total) se depositaron 100 µL de las soluciones y se les agregaron un trozo de cinta de magnesio (Sigma-Aldrich®) de cinco milímetros y tres gotas de ácido clorhídrico (HCl, MEYER®) concentrado (prueba de Shinoda). La mezcla de los tubos se agito y la reacción positiva fue la presencia de un ligero color amarillo a rosa en solución efervescente. El control positivo fue 100 µL de una solución de quercetina (MERCK®) de 1 mg mL^{-1} en metanol a 80% y el control negativo fueron solo los reactivos.

Alcaloides. Se tomaron 100 µL de las soluciones, se depositaron en tubos de ensayo (15 en total) y se agregaron dos mililitros de HCl a uno por ciento. Luego los tubos de ensayo se agruparon en un vaso de precipitados y se metieron en un recipiente de metal con agua caliente (60 a 70 °C) por 20 min. Después, se sacó el vaso de precipitados del agua caliente y los tubos de ensayo se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 20 min. Finalmente, en los tubos de ensayo se agregaron tres gotas de reactivo Dragendorff (Sigma-Aldrich®). La mezcla de los tubos se agito y la reacción positiva fue un cambio de color a tonalidad naranja. El control positivo fue 100 µL de una solución de polvo de hojas de *Lupinus* sp., de 10 mg mL^{-1} en metanol a 80% y el control negativo fueron solo los reactivos.

Saponinas. En tubos de ensayo (15 en total) se depositaron 100 µL de las soluciones y se agregaron 0.5 mL se solución AB (mezclar 1.5 mL de solución A y 1.5 mL de solución B) junto con 0.5 mL de carbonato de sodio (Na_2CO_3, MERCK®) 1 molar (prueba de Fehling). Luego los

tubos de ensayo se agruparon en un vaso de precipitados y se metieron en un recipiente de metal con agua caliente (60 a 70 °C) durante 30 min. La mezcla de los tubos se agito y la reacción positiva fue un cambio de color a tonalidad rosa. Control positivo fue 100 µL de una solución de polvo de saponina de soya, de 10 mg mL^{-1} en agua destilada y el control negativo fueron solo los reactivos.
Preparación de solución A: 0.64 g de sulfato de cobre ($CuSO_4$, MERCK®) en cinco mililitros de agua.
Preparación de solución B: 1.76 g de tartrato potasio-sodio ($KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$, MERCK®) y 0.77 g de hidróxido de sodio (NaOH, MERCK®) en cinco mililitros de agua.
Taninos. Se tomaron 100 µL de las soluciones, se depositaron en tubos de ensayo (15 en total) y agregaron tres gotas de cloruro férrico ($FeCl_3$, Sigma-Aldrich®) a 5%. La mezcla de los tubos se agito y la reacción positiva fue un cambio de color a tonalidad azul violeta. El control positivo fue 100 µL de una solución de ácido tánico (MERCK®) de 1 mg mL^{-1} en metanol a 80% y el control negativo fueron solo los reactivos.
Terpenos. En tubos de ensayo (15 en total) se depositaron 100 µL de las soluciones y agregaron dos gotas de anhídrido acético (Ac_2O, Sigma-Aldrich®) y dos gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4, MEYER®) concentrado (prueba de Liebermann-Burchard). La mezcla de los tubos se agito y la reacción positiva fue un cambio de color a tonalidad azul verdoso. El control positivo fue 100 µL de una solución de ácido masticadienónico (MERCK®) de 1 mg mL^{-1} en diclorometano a 80% y el control negativo solo los reactivos.

Cuantificación de terpenos totales en el extracto obtenido de la extracción con diclorometano

De los cinco extractos diclorometánicos se prepararon soluciones de 10 mg mL^{-1} en diclorometano a 80% y se siguió el método utilizado por el Laboratorio de Fitoquímica del CP, para cuantificar terpenos.
Por triplicado se realizó una curva estándar de ácido masticadienónico (0.1 mg mL^{-1} en diclorometano a 80%) con concentraciones de 0, 25, 75, 150 y 300 µL y se tomaron también por triplicado 10 µL de las soluciones de los extractos diclorometánicos, en tubos de ensayo. Luego a los tubos de ensayo se les adiciono diclorometano hasta completar 1000 µL, después se agregaron 25 µL de una solución Ac_2O a 50% y 975 µL de H_2SO_4 a 2.5%. Los tubos de ensayo se dejaron reposar 45 min y después se les adiciono un mililitro de agua destilada. Las mezclas de los tubos se agitaron y se les hicieron lecturas a 610 nm en espectrofotómetro de luz ultravioleta-visible (GENESYS™ 5). Con las lecturas de la curva estándar (eje Y absorbancia y eje X concentración de molécula estándar) se realizaron los cálculos del contenido de terpenos totales a partir de las lecturas de los extractos diclorometánicos y el promedio de los resultados se expresó en miligramo de equivalentes de ácido masticadienónico sobre gramo de extracto diclorometánico (mg de EAM g^{-1} de ED).

Cuantificación de saponinas totales en el extracto obtenido de la extracción con diclorometano

De los cinco extractos diclorometánicos se prepararon soluciones de 10 mg mL^{-1} en agua destilada y se siguió el método utilizado por el Laboratorio de Fitoquímica del CP, para cuantificar saponinas.
Por triplicado se realizó una curva estándar de saponina de soya (un mg mL^{-1} en agua destilada) con concentraciones de 0, 20, 25, 50 y 100 µL y se tomaron también por triplicado 10 µL de las soluciones de los extractos diclorometánicos, en tubos de ensayo. Luego a los tubos de ensayo se les adiciono agua destilada hasta completar 1000 µL, después se agregaron 1000 µL de H_2SO_4 a 70% y 100 µL de Vainillina (Sigma-Aldrich®) a 8%. Luego los tubos de ensayo se agruparon en un vaso de precipitados y se metieron en un recipiente de metal con agua caliente (60 a 70 °C) durante 20 min. Después, se sacó el vaso de precipitados del agua caliente y se pasó a otro reciente de metal con agua fría (-2 a -4 °C) durante 20 min. Finalmente, a los tubos de ensayo se le agregaron 900 µL de agua destilada. Las mezclas de los tubos se agitaron y se les hicieron lecturas a 544 nm en espectrofotómetro de luz ultravioleta-visible. Con las lecturas de la curva estándar se realizaron los cálculos del contenido de saponinas totales a partir de las lecturas de los extractos

Núm. 60: 325-336 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

diclorometánicos y el promedio de los resultados se expresó en mg de equivalentes de saponina de soya sobre gramo de extracto diclorometánico (mg de ESY g^{-1} de ED).

Cuantificación de fenoles totales en el extracto obtenido de la extracción con metanol
De los cinco extractos metanólicos se prepararon soluciones de 10 mg mL^{-1} en etanol a 80% y se siguió el método descrito por Yadav y Agarwala (2011), para cuantificar fenoles.
Por triplicado se realizó una curva estándar de ácido gálico (0.1 mg mL^{-1} en etanol a 80%) con concentraciones de 0, 25, 75, 150 y 300 µL y se tomaron también por triplicado 10 µL de las soluciones de los extractos metanólicos, en tubos de ensayo. Luego a los tubos de ensayo se les adiciono agua destilada hasta completar 1000 µL, después se agregaron 25 µL de una solución de Folin-Ciocalteau a 50% y 975 µL de Na_2CO_3 a 2.5%. Los tubos de ensayo se dejaron reposar 45 min en oscuridad y después se les adiciono un mililitro de agua destilada. Las mezclas de los tubos se agitaron y se les hicieron lecturas a 765 nm en espectrofotómetro de luz ultravioleta-visible. Con las lecturas de la curva estándar se realizaron los cálculos del contenido de fenoles totales a partir de las lecturas de los extractos metanólicos y el promedio de los resultados se expresó en miligramo de equivalentes de ácido gálico sobre gramo de extracto metanólico (mg de EAG g^{-1} de EM).

Cuantificación de flavonoides totales en el extracto obtenido de la extracción con metanol
De los cinco extractos metanólicos se prepararon soluciones de 10 mg mL^{-1} en metanol a 80% y se siguió el método descrito por Yadav y Agarwala (2011), para cuantificar flavonoides.
Por triplicado se realizó una curva estándar de quercetina (0.1 mg mL^{-1} en metanol a 80%) con concentraciones de 0, 20, 25, 50 y 100 µL y se tomaron también por triplicado 10 µL de las soluciones de los extractos metanólicos, en tubos de ensayo. Luego a los tubos de ensayo se adiciono metanol a 80% hasta completar 800 µL, después se agregaron 100 µL de acetato de potasio (CH_3CO_2K) uno molar y 100 µL de cloruro de aluminio ($AlCl_3$) a 10%. Los tubos de ensayo se dejaron reposar 30 min en oscuridad y después se les adicionaron dos mililitros de agua destilada. Las mezclas de los tubos se agitaron y se les hicieron lecturas a 420 nm en espectrofotómetro de luz ultravioleta-visible. Con las lecturas de la curva estándar se realizaron los cálculos del contenido de fenoles totales a partir de las lecturas de los extractos metanólicos y el promedio de los resultados se expresó en mg de equivalentes de quercetina sobre gramo de extracto de metanólico (mg de EQ g^{-1} de EM).

Análisis antioxidante por el método de 2, 2-difenil-1 picrilhidrazil (DPPH) de los extractos obtenidos de la extracción diclorometano y metanol
De los cinco extractos diclorometánicos y metanólicos se prepararon soluciones de 10 mg mL^{-1} en etanol a 80% y se siguió la metodología de Kuskoski *et al*., (2005) y del Laboratorio de Fitoquímica del CP, para evaluar la actividad antioxidante.
Por triplicado se realizó curvas patrón de Trolox (Sigma-Aldrich®, un miligramo sobre mililitro de metanol a 80%,) con concentraciones de 0, 25, 50, 100, 200 y 300 µL y se tomaron también por triplicado 10 µL de las soluciones de los extractos diclorometánicos y metanólicos, en tubos de ensayo. Luego a los tubos de ensayo se les adiciono etanol a 80% hasta completar 400 µL, después se agregaron 500 µL de metanol a 80% y un mililitro de DPPH (Sigma-Aldrich®, 7.5 mg en 50 mL de etanol a 80%). Las mezclas de los tubos de agitaron, se dejaron reposar 30 min en oscuridad y después se les hicieron lecturas a 517 nm en espectrofotómetro de luz ultravioleta-visible. Con las lecturas de la curva estándar se realizaron los cálculos de la actividad antioxidante a partir de las lecturas de los extractos diclorometánicos y metanólicos, y el promedio de los resultados se expresó en microgramos de equivalentes de Trolox sobre gramo de extracto diclorometánico y metanólico (µg de ET g^{-1} de ED y de EM) y en porcentaje de DPPH inhibido (% de DPPH inhibido). También como referencia se usaron 10 µL de una solución de ácido gálico de 0.1 mg mL^{-1} en etanol a 80%, la cual es una molécula con fuerte actividad antioxidante.

Análisis estadísticos
Estadística descriptiva se realizó de los datos del rendimiento de extractos y de la cuantificación de metabolitos secundarios y actividad antioxidante los extractos diclorometánicos y metanólicos. Además, se hizo comparación de medias de Student-Newman-Keuls (SNK, n=5, $p \geq 0.05$) del contenido de metabolitos secundarios y de la actividad antioxidante de los extractos diclorometánicos y metanólicos. Todos los análisis se realizaron en el programa estadístico Sigma Plot versión 14.0 (Jandel Scientifc, Erkrath, Germany).

RESULTADOS

Rendimiento de los extractos de la resina
De los cinco extractos hexánicos se obtuvo un rendimiento (promedio ± error estándar) de 1.58 ± 0.85 mg g^{-1} de resina, de los cinco extractos diclorometánicos se logró conseguir una productividad de 990.0 ± 16.5 mg g^{-1} de resina y de los cinco extractos metanólicos se consiguió un rendimiento de 42 ± 2.5 mg g^{-1} de resina. De manera que, la productividad máxima de los extractos se logró obtener a partir de la extracción con diclorometano.

Metabolitos secundarios identificados en los extractos de la resina
En los extractos hexánicos solo se identificaron terpenos (Tabla 1), mientras que en los extractos diclorometánicos se encontraron saponinas y terpenos (Tabla 1) y en los extractos metanólicos se descubrieron terpenos, saponinas, fenoles y flavonoides (Tabla 1). A la vez, en los extractos no se identificó la presencia de alcaloides y taninos (Tabla 1).

Tabla 1. Metabolitos secundarios identificados en los extractos de la resina.
Table 1. Secondary metabolites identified in the resin extracts.

Fitoquímica	Reacción	Control positivo	Extracto	Resultado
Fenoles	Folin-Ciocalteau	Ácido gálico	Hexano	-
			Diclorometano	-
			Metanol	+
Flavonoides	Prueba de Shinoda	Quercetina	Hexano	-
			Diclorometano	-
			Metanol	+
Alcaloides	Dragendorff	*Lupinus* sp.	Hexano	-
			Diclorometano	-
			Metanol	-
Saponinas	Prueba de Fehing	Saponina de soya	Hexano	-
			Diclorometano	+
			Metanol	+
Taninos	$FeCl_3$	Ácido tánico	Hexano	-
			Diclorometano	-
			Metanol	-
Terpenos	Prueba de Liebermann-Burchard	Ácido masticadenónico	Hexano	+
			Diclorometano	+
			Metanol	+

Núm. 60: 325-336 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Reacción positiva (+) y negativa (-) de las soluciones de los extractos obtenidos de la extracción con cada disolvente.
Positive (+) and negative (-) reaction of the solutions of the extracts obtained from the extraction with each solvent.

Contenido de saponinas y terpenos totales del extracto obtenido de la extracción con diclorometano

De los extractos diclorometánicos se obtuvo un contenido (promedio ± error estándar) de terpenos totales de 638.2 ± 23.6 mg de EAM g^{-1} de ED y el de saponinas fue de 142.5 ± 7.7 mg de ESY g^{-1} de ED. El contenido de terpenos totales fue mucho mayor que el de saponinas totales en los extractos diclorometánicos (Figura 1), mostrando diferencias estadísticas significativas (SNK, n=5, $p < 0.001$*).

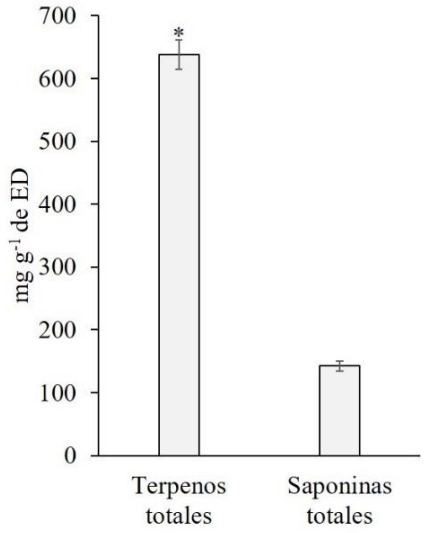


Figura 1. Contenido promedio ± error estándar terpenos y saponinas totales en los extractos diclorometánicos (ED).
Figure 1. Average content ± standard error of terpenes and total saponins in dichloromethane extracts (DE).

Contenido de fenoles y flavonoides totales del extracto obtenido de la extracción con metanol

En los extractos metanólicos se obtuvo un contenido (promedio ± error estándar) de fenoles totales de 19.9 ± 2.0 mg de EAG g^{-1} de EM y el de flavonoides totales fue de 6.4 ± 0.7 mg de EQ g^{-1} de EM. El contenido de fenoles totales fue más alto que el de flavonoides totales en los extractos metanólicos (Figura 1), teniendo diferencias estadísticas significativas (SNK, n=5, $p < 0.001$*).

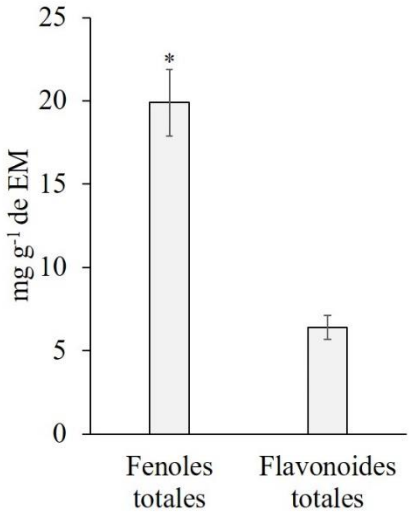


Figura 2. Contenido promedio ± error estándar de fenoles y flavonoides en el extracto metanólico (EM).
Figure 2. Average content ± standard error of phenols and flavonoids in the methanolic extract (ME).

Actividad antioxidante de los extractos obtenidos de la extracción con diclorometano y metanol de la resina

Los extractos diclorometánicos y metanólicos no mostraron efectos antioxidantes. Con altas concentraciones de microgramos equivalentes de Trolox sobre gramo de resina generaron muy poca inhibición de DPPH, con respeto a la actividad antioxidante del ácido gálico (Tabla 2).

Tabla 2. Actividad antioxidante de los extractos diclorometanicos (ED) y metanolicos.
Table 2. Antioxidant activity of dichloromethane (DE) and metabolic (ME) extracts.

Extractos	µg de ET g^{-1} de extracto	% de DPPH inhibido
ED	11400 ± 1207*	23.95 ± 1.07*
EM	6100 ± 1163*	26.15 ± 1.95*
Ácido gálico	34 ± 2.6	55.0 ± 2.5

Promedio ± error estándar de microgramos de equivalentes de Trolox sobre gramo de extracto (µg de ET g^{-1} de extracto) y porcentaje de DPPH inhibido (% de DPPH inhibido). Diferencias estadísticas significativas de los extractos diclorometanicos y metanolicos con respecto al ácido gálico (SNK, n=5, $p < 0.001$*).
Mean ± standard error of micrograms of Trolox equivalents per gram of extract (µg of ET g-1 of extract) and percentage of inhibited DPPH (% DPPH inhibited). Statistically significant differences were observed between the dichloromethane and methanol extracts with respect to gallic acid (SNK, n=5, $p < 0.001$*).

DISCUSIÓN

Rendimiento de los extractos de la resina

Las resinas del género *Bursera* tiene una constitución aproximada de 87 a 95% de terpenos (Ferreira *et al*., 2019), lo que las vuelve altamente solubles en disolventes como etanol (Antúnez-Mojica *et al.,* 2021) y diclorometano (Sánchez-Monroy *et al* 2021). Esto confirma por que el

Núm. 60: 325-336 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

mayor rendimiento se obtuvo de los extractos diclorometánicos, y la productividad de los extractos hexánicos y metanólicos fue menor. Además, debido al escaso rendimiento de los extractos hexánicos, solo se utilizaron para identificar metabolitos secundarios.

Metabolitos secundarios identificados en los extractos de la resina

En las resinas de *Bursera* está constituida por mono y sequiterpenos (Blancas *et al*., 2022; Ferreira *et al*., 2019), triterpenos (Blancas *et al*., 2022; Sánchez-Monroy *et al* 2021), flavonoides (Blancas *et al*., 2022) y líganos (Antúnez-Mojica *et al.,* 2021; Marcotullio *et al*., 2018). Lo que corrobora porque encontramos terpenos en los extractos hexánicos, diclorometánicos y metanólicos. Además, encontramos fenoles y flavonoides, pero solo en los extractos metanólicos, lo que es interesante porque los extractos hidroalcohólicos y metanólicos de hojas y tallos de especies del género *Bursera* son ricos en flavonoides (Sánchez-Monroy *et al*., 2020; Guevara-Fefer *et al*., 2017).

El contenido de fenoles en los extractos metanólicos es probable que se relacione con la presencia de lignanos, los cuales son polifenoles solubles en solventes orgánicos (Antúnez-Mojica *et al.,* 2021; Marcotullio *et al*., 2018).

En las resinas de especies de género *Bursera* no se ha reportado la presencia de saponinas, sin embargo, en el extracto etanólico del tallo de *B. fagaroide* se registró la aparición de este tipo metabolitos secundarios en 1998 y en el extracto obtenido de la combinación de diclormetano-metanol y metanol-agua de especies del género *Bursera* se identificaron glucósidos asociados a flavonoides, esteroles y triterpenos (Columba-Palomares *et al*., 2018; Guevara-Fefer *et al*., 2017). Lo que puede explicar la presencia de saponinas en los extractos diclorometánicos y metanólicos. En los extractos no se identificaron alcaloides y taninos, pero esto es de esperarse, debido a que no existen reportes de la presencia de este tipo de metabolitos secundarios en las resinas de especies del género *Bursera* (Blancas *et al*., 2022).

Contenido de saponinas y terpenos totales del extracto obtenido de la extracción con diclorometano

En los extractos diclorometánicos, por tener el mayor rendimiento, se evaluó el contenido de terpenos y saponinas. Como se mencionó antes los terpenos constituyen entre un 87 a 95% de los componentes de la resina (Ferreira *et al*., 2019). El rendimiento de terpenos del extracto fue de 63 a 66%, menor al reportado en la literatura. No obstante, los terpenos siguen siendo el componente mayoritario de los extractos diclorometánicos.

En el caso de las saponinas no hay investigaciones que respalden su contenido en especies del género *Bursera* (Blancas *et al*., 2022), sin embargo, en esta investigación constituyeron del 14 a 15% de los extractos diclorometánicos.

Contenido de fenoles y flavonoides totales del extracto obtenido de la extracción con metanol

En los extractos metanólicos se identificaron fenoles y flavonoides, por lo que, en ellos se realizó la cuantificación de estos metabolitos secundarios. Además, como en los extractos diclorometánicos se cuantificaron saponinas, no se analizó el contenido de este metabolito secundario en los extractos metanólicos.

En el extracto etanólico de hojas de *B. microphylla* se registró un contenido de fenoles del 24 a 25% (Vidal-Gutiérrez *et al*., 2020b), que si lo comparamos con la cantidad de fenoles presente en los extractos metanólicos de 1.9 a 2.1%, la presencia de estos metabolitos secundarios es poca. Lo mismo sucede en el caso de los flavonoides donde se encontró que los extractos etanólicos de tallos de especies del género *Bursera* tienen un contenido de flavonoides de 5 a 10% y el de hojas fue de 6 a 40%, si se compara con la cantidad de flavonoides de los extractos metanólicos de 0.6 a 0.7% (Sánchez-Monroy *et al*., 2020), también la presencia de estos metabolitos secundarios es baja. A la vez, *B. fagaroide* es la especie del género *Bursera* que contiene la menor cantidad de flavonoides en tallos y hojas (Sánchez-Monroy *et al*., 2020). Por lo que, es un dato relevante encontrar este tipo de metabolitos secundarios en el extracto metanólico de la resina.

Actividad antioxidante de los extractos obtenidos de la extracción con diclorometano y metanol de la resina

En la literatura se registró que los extractos metanolicos de la resina de *B. hindsiana* y *B. microphylla,* no presentaron actividad antioxidante por el método de DPPH (Vidal-Gutiérrez *et al*., 2020a). Por lo que, los extractos de la resina de *B. fagaroides* al tampoco tener propiedades antioxidantes se suman a los resultados antes mencionados. Sin embargo, hay que destacar que los extractos metanólicos de la resina de *B. laxiflora* tienen potencial antioxidante, inhiben el 50% de DPPH con 100 µg de ET g^{-1} de EM (Vidal-Gutiérrez *et al*., 2020a). A la vez, extractos hidroalcohólicos y etanólicos de hojas (Vidal-Gutiérrez *et al*., 2020b; Sánchez-Monroy *et al*., 2020; Guevara-Fefer *et al*., 2017), hidroalcohólicos de tallos (Sánchez-Monroy *et al*., 2020), etanólicos de frutos (Vidal-Gutiérrez *et al*., 2020b) y lignanos (Marcotullio *et al*., 2018) de especies del género *Bursera* presentan excelentes propiedades antioxidantes. Al igual que los extractos hidroalcohólicos de tallos y hojas de *B. fagaroides* que inhiben el 50% de DPPH con 15.41 y 5.72 µg mL^{-1} (Sánchez-Monroy *et al*., 2020).

CONCLUSIONES

Los extractos de la resina de *Bursera fagaroides* son una fuente rica de terpenos, que pueden contener saponinas, fenoles y flavonoides en baja concentración, y no presentan propiedades antioxidantes por el método de 2,2-difenil-1 picrilhidrazil. De igual manera, se realizó el primer reporte de la presencia y cuantificación de ácidos fenólicos y saponinas en el extracto de diclorometano y metanol de la resina.

Esta investigación aporta un estudio general del análisis de los extractos de resina de *Bursera fagaroides*, para futuros experimentos se recomienda un análisis fitoquímico con técnicas de cromatografía liquida de alta resolución acoplada a espectrometría de masas, resonancia magnética nuclear de protón o análisis metabolómicos masivos para identificar o corroborar el tipo de terpenos, saponinas, fenoles y flavonoides presentes en los extractos de la resina.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ramón Marcos Soto Hernández y M. C. Rubén San Miguel Chávez del Laboratorio de Fitoquímica del Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, por apoyar con las técnicas fitoquímicas de evaluación, a la Dra. Agustina Rosa Andrés Hernández, por la identificación de la especie vegetal estudiada, y al Dr. David Martínez Moreno de la Facultad de Ciencias Biológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por su aportación en la recolecta de resina. Esta investigación fue apoyada por el Programa de Investigadoras e Investigadores Cátedra-COMECYT-2024 (RCAT2024-0003).

LITERATURA CITADA

Antúnez-Mojica, M., Romero-Estrada, A., Hurtado-Díaz, I., Miranda-Molina, A., & Álvarez, L. (2021). Lignans from *Bursera fagaroides*: Chemistry, pharmacological effects and molecular mechanism. A current review. *Life,* 11(7), 685. https://doi.org/10.3390/life11070685

Barrales-Alcalá, B., & Bonfil, C. (2024). Análisis del conocimiento actual de la ecología, evolución y manejo del género *Bursera* (Burseraceae) en México. *Acta Botánica Mexicana,* (131), e2284. https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1924

Blancas, J., Abad-Fitz, I., Beltrán-Rodríguez, L., Cristians, S., Rangel-Landa, S., Casas, A., Torres-García, I., & Sierra-Huelsz J. A. (2022). Chemistry, biological activities, and uses of copal resin (*Bursera* spp.) in Mexico. In: Murthy, H. N. (eds) Gums, Resins and

Recibido:
12/febrero/2025

Aceptado:
12/junio/2025

latexes of plant origin. *Reference Series in Phytochemistry*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76523-1_21-1

Blancas-Vázquez, J. J., Abad-Fitz, I., Beltrán-Rodríguez, L., Casas, A., Maldonado-Almanza, B., Sierra-Huelsz, J. A., García-Lara, F., Cortés-Zárraga, L., Mena, F., & Ayala-Enríquez, M. I. (2022). *Bursera bipinnata* (Moc. y Sessé ex DC.) Engl. *Bursera copallifera* (Sessé & Moc. Ex DC.) Bullock *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl. *Bursera glabrifolia* (Kunth) Engl. *Bursera linanoe* (La Llave) Rzed., Calderón, and Medina *Bursera morelensis* Ramírez (L.) Sarg. BURSERACEAE. In: Casas, A., Blancas Vázquez, J. J. (eds) Ethnobotany of the mountain regions of Mexico. Ethnobotany of mountain regions. *Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77089-5_31-1

Columba-Palomares, M. C., Villarreal, M. L., Marquina, S., Romero-Estrada, A., Rodríguez-López, V., Zamilpa Alvarez, A., & Alvarez, L. (2018). Antiproliferative and anti-inflammatory acyl glucosyl flavones from the leaves of *Bursera copallifera*. *Journal of the Mexican Chemical Society,* 62(4), 214-224. https://doi.org/10.29356/jmcs.v62i4.624

Ferreira, W. C., Carrillo, M. R., Rojas, L., & Porcar, C. R. (2019). Chemical composition of essential oils from *B. simaruba* (L.) Sarg. fruits and the resins from three Bursera species*: B. simaruba* (L.) Sarg, *B. glabra* Jack and *B. inversa* Daly. *Avances en Química,* 14(1), 25-29.

Guevara-Fefer, P., Muñoz-Ocotero, V., Llanos-Romero, R. E., Zúñiga-Ruiz, B., Cárdenas-Vázquez, R. J., Contreras-Jiménez, J. L. & Ocampo-Bautista, F. (2017). Flavonoides de trece especies del género *Bursera* con potencial antioxidante. *Polibotánica*, (44), 185-193. https://doi.org/10.18387/polibotanica.44.14

Kuskoski, E. M., Asuero, A. G., Troncoso, A. M., Mancini-Filho, J., & Fett, R. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Food Science and Technology,* 25, 726-732. https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400016

Marcotullio, M. C., Curini, M., & Becerra, J. X. (2018). An ethnopharmacological, phytochemical and pharmacological review on lignans from Mexican *Bursera* spp. *Molecules*, 23(8), 1976. https://doi.org/10.3390/molecules23081976

Pérez-Mejía, N., Villarreal, M. L., Sánchez-Carranza, J. N., González-Maya, L., González Cortazar, M., Ortíz-Caltempa, A. & Alvarez, L. (2024). Phytochemical profiles and cytotoxic activity of *Bursera fagaroides* (Kunth) Engl. leaves and its callus culture. *Plants (Basel, Switzerland),* 13, 1622. https://doi.org/10.3390/ plants13121622

Rico, Y., Lorenzana, G. P., Benítez-Pineda, C. A., & Olukolu, B. A. (2022). Development of genomic resources in Mexican *Bursera* (Section: Bullockia: Burseraceae): genome assembly, annotation, and marker discovery for three copal species. Genes, 13(10), 1741. https://doi.org/10.3390/genes13101741

Sánchez-Monroy, M. B., García-Bores, D. M., Contreras-Jiménez, J. L., Torres, D. E., San Miguel-Chávez, R., & Guevara-Fefer, P. (2020). Biological activity and flavonoid profile of five species of the *Bursera* genus. *Botanical Sciences*, 98(4), 545–553. https://doi.org/10.17129/botsci.2624

Sánchez-Monroy, M. B., León-Rivera, I., Llanos-Romero, R. E., García-Bores, A. M., & Guevara-Fefer, P. (2021). Cytotoxic activity and triterpenes content of nine Mexican species of *Bursera*. *Natural product research*, 35(22), 4881-4885. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1739680

Vidal Gutiérrez, M., Torres Moreno, H., Arturo Velázquez Contreras, C., Alondra, L., Valenzuela, R., Enrique, R., & Zepeda, R. (2020a). Actividad antioxidante y antiproliferativa de seis plantas medicinales del noroeste de México. *Biotecnia,* 22(3), 40-45. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v22i3.1169

Vidal-Gutiérrez, M., Robles-Zepeda, R. E., Vilegas, W., Gonzalez-Aguilar, G. A., Torres-Moreno, H., & López-Romero, J. C. (2020b). Phenolic composition and antioxidant activity of *Bursera microphylla* A. Gray. *Industrial Crops and Products*, 152, 112412. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112412

Yadav, R., & Agarwala, M. (2011). Phytochemical analysis of some medicinal plants. *Journal of Phytology* 3(12), 10–14.

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

CALLOGÉNESIS Y ANÁLISIS FITOQUÍMICO DE *Euphorbia nutans* Lag.

CALLOGENESIS AND PHYTOCHEMICAL ANALYSIS OF *Euphorbia nutans* Lag.

Aguilar Jiménez, D., B. Reyes Trejo, J.L. Rodríguez De la O, J. Martínez Solís†
CALLOGÉNSIS Y ANÁLISIS FITOQUÍMICO DE *Euphorbia nutans* Lag.
CALLOGENESIS AND PHYTOCHEMICAL ANALYSIS OF *Euphorbia nutans* Lag.

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 337-354 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.20

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 337-354 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Callogénesis y análisis fitoquímico de *Euphorbia nutans* Lag.

Callogenesis and phytochemical analysis of *Euphorbia nutans* Lag.

Daniel Aguilar-Jiménez / aguilard229@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-8014-4167
Programa Educativo de Agrobiotecnología. Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros. Prolongación Reforma No. 168, Barrio de Santiago Mihuacán, Izúcar de Matamoros, Puebla, México. CP 74420

Benito Reyes-Trejo https://orcid.org/0000-0001-9330-2646
Laboratorio de Productos Naturales, Departamento de Preparatoria Agrícola Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco Km 38.5, 56230 Chapingo, Edo. México, México

José Luis Rodríguez-De-la-O https://orcid.org//0000-0002-2331-9984
Departamento de Fitotecnia-Área de Genética. Universidad Autónoma Chapingo Carretera México-Texcoco Km. 38.5, 56230 Chapingo, Edo. México, México

Juan Martínez-Solís † 09/04/2025
https://orcid.org/0000-0002-8216-2702
Departamento de Fitotecnia- Instituto de Horticultura Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco Km. 38.5, 56230 Chapingo, Edo. México, México

RESUMEN: *Euphorbia nutans* se utiliza de forma empírica para tratar gastritis y heridas cutáneas en la Mixteca Poblana. La propagación de especies *in vitro* es una alternativa sustentable para el aprovechamiento de su uso terapéutico, sin embargo, se desconoce si la desdiferenciación celular afecta la producción de metabolitos secundarios. Este estudio tuvo como objetivo obtener callos *in vitro* de *E. nutans* en medio Murashige & Skoog suplementado con citocininas y auxinas, para comparar su perfil fitoquímico con el obtenido de plantas silvestres. Los extractos orgánicos fueron preparados bajo reflujo con 3.41 g de callos, por dos horas, empleando hexano, seguido por diclorometano y finalmente metanol. El análisis fitoquímico de extractos de callos fue mediante comparación de metabolitos secundarios aislados previamente de 3.534 Kg de material vegetal silvestre seco y molido de *E. nutans*, empleando cromatografía en capa delgada (TLC) y espectroscopía de RMN de ^{1}H. Las variables *in vitro* fueron: porcentaje de respuesta, peso, color y textura de callos. Los resultados indican que el 100 % de segmentos foliares formaron callos color verde limón y friables, con peso superior significativamente (Tukey, $p \leq 0.05$) usando BA y ANA. El análisis mediante TLC, reveló la presencia de las mismas bandas en extractos de callos, así como bandas no encontradas en extractos de plantas silvestres. El análisis mediante RMN ^{1}H permitió identificar seis metabolitos secundarios β-sitosterol, estigmasterol, acetato de α -amirina, β-lupeol, 24-metilen-cicloartan-3β-ol y un metabolito tipo iridoide. Estos resultados son el primer estudio fitoquímico de *E. nutans*.

Palabras clave: Desdiferenciación celular, callogénesis, metabolitos secundarios, *Euphorbia nutans* células indiferenciadas, planta medicinal.

ABSTRACT: *Euphorbia nutans* is used empirically to treat gastritis and skin wounds in the Mixteca region of Puebla. *In vitro* propagation of species is a sustainable alternative for therapeutic use; however, it is unknown whether cellular dedifferentiation affects the production of secondary metabolites. This study aimed to obtain *in vitro* calli of *E. nutans*

Aguilar Jiménez, D., B. Reyes Trejo, J.L. Rodríguez De la O, J. Martínez Solís†

CALLOGÉNESIS Y ANÁLISIS FITOQUÍMICO DE *Euphorbia nutans* Lag.

CALLOGENESIS AND PHYTOCHEMICAL ANALYSIS OF *Euphorbia nutans* Lag.

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 337-354. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.20

in Murashige & Skoog medium supplemented with cytokinins and auxins, to compare its phytochemical profile with that obtained from wild plants. The organic extracts were prepared under reflux with 3.41 g of calluses, for two hours, using hexane, followed by dichloromethane and finally methanol. Phytochemical analysis of callus extracts was carried out by comparison of secondary metabolites previously isolated from 3.534 kg of dried and ground wild plant material of *E. nutans*, using thin layer chromatography (TLC) and ^{1}H NMR spectroscopy. The *in vitro* variables were: response percentage, weight, color and texture of calluses. The results indicate that 100% of leaf segments formed lemon-green, friable calluses with significantly higher weight (Tukey, $p \leq 0.05$) using BA and ANA. TLC analysis revealed the presence of the same bands in callus extracts, as well as bands not found in wild plant extracts. ^{1}H NMR analysis identified six secondary metabolites: β-sitosterol, stigmasterol, α-amyrin acetate, β-lupeol, 24-methylene-cycloartan-3β-ol, and an iridoid-type metabolite. These results are the first phytochemical study of *E. nutans*.
Key words: Cellular dedifferentiation, callogenesis, secondary metabolites, *Euphorbia nutans,* undifferentiated cells, medicinal plant.

INTRODUCCIÓN

Durante los estudios fitoquímicos de las partes de una la planta se muestra la presencia de una amplia variación de metabolitos secundarios como polifenoles, flavonoides, terpenoides, alcaloides, glucósidos, fitoesteroles, saponinas, taninos y ácidos grasos, etc. Así, en la tronadora (*Tecoma stans* L.) se ha descrito un mayor contenido de alcaloides en base seca durante la etapa de prefloración que durante la etapa de floración. Así, ambas etapas mostraron diferentes niveles de fitoquímicos en las hojas, lo que depende en gran medida de la etapa fisiológica de la planta, seguido del tipo de medio de extracción empleando disolventes de distintas polaridades. Sin embargo, la resistencia de las plantas al estrés ambiental, es decir, a las altas temperaturas, la sequía, la alta exposición solar y la salinidad del suelo, también puede ser el factor estimulante que permite la biosíntesis y la acumulación de estas sustancias durante las diferentes fases de su crecimiento (Anand & Basavaraju, 2021).

Por otro lado, en el cultivo *in vitro* de células y tejidos vegetales, un callo se define como una masa de células indiferenciadas (no especializadas) o desdiferenciadas (que pierden su especialización), las cuales proliferan de forma desorganizada como respuesta a estímulos físicos químicos u hormonales o como conjunto de células en crecimiento desorganizado, que se desarrollan en respuesta a una lesión química o física en condiciones hormonales determinadas (Pierik R, 1990). El callo se puede obtener a partir de un explante y sólo algunas de las células del callo exhiben la totipotencia celular. Esta habilidad de diferenciarse en tejidos, órganos e incluso embriones, las hace capaces de regenerar plantas enteras (Pierik R, 1990). Por otra parte, Kondamudi *et al*. (2009) mencionan que, en muchos experimentos de cultivo de tejidos, como primer paso es necesaria la inducción de callo a partir del explante; pues el cultivo de callo se utiliza para estudiar el aislamiento de protoplastos, tipos de células, la selección celular, la embriogénesis somática, la organogénesis y la producción de metabolitos secundarios. Respecto a la familia *Euphorbiaceae,* Lee & Starratt (1972) cultivaron raíces de plántulas de *Euphorbia esula* L. y *Euphorbia cyparissias* L. para obtener callos con ácido α-naftalenacético (ANA), y fue mejor regulador de crecimiento vegetal que kinetina (Kin), ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), ácido indolacético (AIA) o ácido-4-amino-3,5,6 tricloropicolínico (picloram). El ácido giberélico no tuvo algún efecto. Ripley & Preece (1986) mencionan que la citocinina 6-benciladenina (BA) no fue necesaria para la proliferación de brotes axilares en *Euphorbia lathyris* L., pero sí para la producción de callos y brotes adventicios. En *Mallotus philippensis* Lam., Abbas (1993) obtuvo callo en continuo crecimiento empleando medio de Murashige & Skoog (MS) con 2,4-D (1.3 mg L^{-1}) y Kin (0.5 mg L^{-1}). Jasrai *et al.* (2003) en *Euphorbia pulcherrima* Willd, reportaron la inducción de callos rojos con medio MS suplementado con 2.0 mg L^{-1} de 2-iso-penteniladenina (2i-p) y ANA (0.5 mg L^{-1}). Pickens *et al*. (2005), mencionan que la mayoría de callos y brotes en *Euphorbia pulcherrima* Willd, se obtuvieron a partir de secciones de la vena

media de hojas cultivadas *in vitro*, con 2.0 a 3.0 mg L^{-1} de BA y 3.0 mg L^{-1} de AIA durante un mes. Xu *et al*. (2008), plantearon un protocolo de regeneración celular para *Euphorbia ésula* L. empleando medio MS adicionado con 0.25 mg L^{-1} de 6-bencilaminopurina (BAP) y 0.4 mg L^{-1} de ácido indolbutírico (AIB), obteniendo después de 30 días de cultivo, brotes de forma directa e indirecta. En *Euphorbia pulcherrima* Willd, Perera & Trader (2010), mencionan el cultivo de yemas apicales y axilares con medio MS adicionado BA (2.25 mg L^{-1}) para producir callo color rojo, o BA y AIA (2.25 y 0.7 mg L^{-1}, respectivamente) para obtener algunos callos color blanco y gris-verde después de un mes de cultivo. En *Ricinus communis* L., se menciona la obtención de callo friable (90%) de color marrón blanquecino con medio MS más 0.5 mg L^{-1} de ANA y 2.5 mg L^{-1} de BAP a partir de tejidos de hojas cotiledonales (Naz *et al.,* 2011).

Así mismo, el cultivo de tejidos vegetales fue introducido desde finales de la década de los 60´s del siglo XX, como una alternativa posible para el estudio y producción de metabolitos secundarios (Bourgaud *et al*., 2001). A partir de entonces, se han realizado numerosos estudios con el objetivo de incrementar y obtener los compuestos deseados. Sin embargo, Kreis (2007) menciona que no es posible obtener los mismos compuestos (en cantidad y calidad) en células indiferenciadas que los obtenidos en las plantas madre, ya que muchos metabolitos se sintetizan integrados a eventos de diferenciación celular. No obstante, Janarthanam *et al*. (2010) mencionan que en *Stevia rebaudiana* Bert. (*Asteraceae*), lograron obtener callo abundante (11.6 g) con metabolitos secundarios a partir de explantes foliares cultivados en un medio MS con 0.5 mg L^{-1} de ANA, 0.5 mg L^{-1} de 2,4-D y 1.0 mg L^{-1} de Kin. También, Aguilar *et al*. (2019) mencionan el uso de BAP (0.5 mg L^{-1}) para la propagación *in vitro* de *Stevia rebaudiana* Bert. a partir de segmentos nodales, con la posible presencia de metabolitos secundarios (esteviósidos). Estos resultados fueron similares a lo publicado por Vázquez-Baxcajay *et al*. (2014), quienes encontraron que las plantas de *Stevia rebaudiana* Bert. micropropagadas, conservaron su capacidad para sintetizar distintos esteviósidos. Por otra parte, Ali & Tariq (2013) en *Momordica charantia* cv. Jaunpuri (Cucurbitaceae), mencionan a BAP, AIA, y 2,4-D en medio MS para inducir callogénesis y extraer los principios activos ahí generados, resultando BAP con 2,4-D, la mejor combinación en diferentes concentraciones para la inducción de callo a partir de diferentes explantes. Recientemente, Andújar *et al*. (2023), mencionan el aumento de niveles endógenos de diterpenos en *Stevia rebaudiana* Bert. cultivada con 12.5 mg L^{-1} de nanopartículas de planta en condiciones *in vitro*. Con base en los antecedentes sobre inducción de callo en plantas de la familia Euphorbiaceae, el uso de reguladores de crecimiento en esta familia, y la falta de estudios en *Euphorbia nutans* Lag., especie premisoria para aplicaciones farmacológicas, en este trabajo el objetivo planteado fue la inducción de callo *in vitro* de *Euphorbia nutans* Lag. para comparar mediante cromatografía en placa delgada y espectroscopía de resonancia magnética nuclear de protón (RMN de ^{1}H), los metabolitos así obtenidos contra los de las plantas silvetres.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

La inducción de callos *in vitro* se realizó a partir de segmentos nodales, hojas y segmentos foliares de plantas de *Euphorbia nutans* Lag. generadas *in vitro*. La obtención de extractos a partir de hojas y tallos de plantas silvestres de *Euphorbia nutans* Lag., fue mediante plantas recolectadas en la Mixteca Poblana México (Izúcar de Matamoros, Puebla) e identificadas en el Herbario Jorge Espinosa Salas de la Universidad Autónoma Chapingo, al igual que el material vegetal para el establecimiento y obtención de plantas *in vitro*. Las plantas recolectadas tenían aproximadamente dos meses de edad.

Inducción de callo a partir del cultivo *in vitro* de segmentos nodales de *Euphorbia nutans* Lag.

El medio de cultivo empleado fue con las sales inorgánicas de Murashige & Skoog (1962) al 100%, suplementado con mio-inositol 100 mg L^{-1}, tiamina-HCl 0.40 mg L^{-1}, sacarosa 30.0 g L^{-1} y 3.0 mg L^{-1} nitrato de plata ($AgNO_3$) de acuerdo a Aguilar-Jiménez & Rodríguez-De-la-O (2020). Además, se adicionó por separado con 10.0 mg L^{-1} de citocininas (Kin, 2i-p, BA) y de auxinas

(ANA, 2,4-D, TDZ), formando así, un diseño factorial 3x3 más un tratamiento control (MS) con diez repeticiones cada uno. A cada tratamiento se adicionaron 7.0 g L^{-1} de agar y se ajustó el pH a 5.7 ± 0.01 con hidróxido de sodio o ácido clorhídrico. Todos los reactivos empleados son marca SIGMA®. Después de disolver el agar en el medio de cultivo, éste se vertió en tubos de ensaye en una cantidad de 10 mL por recipiente, se cubrieron con tapas de polipropileno y se esterilizaron 20 minutos en una autoclave tipo horizontal a 121 °C y a 1.5 kg cm^2 de presión marca AESA®. Posteriormente, se sembró un segmento nodal por **tubo de ensayo**, fueron incubados a 26 ± 2 °C con 24 horas de luz artificial mediante lámparas de luz fluorescente blanca (38.0-45.7 µmol.m^{-2}. s^{-1}), durante ocho semanas.

Inducción de callo a partir del cultivo *in vitro* de hojas completas y segmentos foliares de *Euphorbia nutans* Lag.

A partir del caso anterior, y según los antecedentes sobre el efecto de BA para inducción de callo en otras plantas del género *Euphorbia* (Ripley & Preece, 1986; Jasrai *et al*., 2003; Pickens *et al.,* 2005 y Perera & Trader, 2010), el medio de cultivo empleado fue Murashige & Skoog (1962) 100%, suplementado con mio-inositol 100 mg L^{-1}, tiamina-HCl 0.40 mg L^{-1}, sacarosa 30 g L^{-1}, BA con ANA en 10.0 mg L^{-1}, 7.0 g L^{-1} de agar y 3.0 mg L^1 de $AgNO_3$ (Aguilar-Jiménez & Rodríguez-De-la-O, 2020), ajustando el pH a 5.7 ± 0.01. Después de disover el agar en el medio de cultivo, se vertió y se esterilizó como se mencionó anteriormente. En seguida, se elaboró un experimento con arreglo factorial 2 x 2 al sembrar hojas completas y segmentos foliares con el haz en contacto con el medio de cultivo y con el haz invertido; así como dos experimentos separados empleando segmentos foliares con el haz en posición normal e invertido, pero con hendidura de la nervadura central por la mitad. Todos los tratamientos tuvieron cinco repeticiones, considerando a cada tubo de ensayo con un explante como unidad experimental. Con respecto a los segmentos foliares, se obtuvieron tras eliminar los extremos de las hojas con ayuda de un bisturí. Posteriormente, se mantuvieron en incubación a 26 ± 2 °C y con 24 horas de luz artificial mediante lámparas de luz fluorescente blanca (38.0-45.7 µmol.m^{-2}. s^{-}1) por un periodo de ocho semanas.

Análisis fitoquímico de extractos a partir de plantas silvestres y de callos obtenidos *in vitro* de *Euphorbia nutans* Lag.

Para la extracción de metabolitos secundarios a partir de plantas silvestres recolectadas, 3.534 Kg de material vegetal se secó por dos semanas a temperatura ambiente y bajo sombra. A partir de este material, se efectuaron extracciones por meceración con diferentes disolventes siguiendo un orden ascendente de polaridad. Se añadieron 12 L de hexano y se dejó reposar por tres días; después se filtró el extracto y se destiló a vacío con ayuda de un rotaevaporador Büchi Heating Bath B-491 para recuperar el disolvente; esta operación se repitió tres veces. A continuación, al residuo vegetal se agregaron 10 L de cloruro de metileno bajo maceración por tres días, esta operación se repitió también tres veces; y finalmente, también se agregaron 10 L de metanol (MeOH) al residuo vegetal recuperado, efectuando el mismo procedimiento tres veces. Se obtuvieron 107.1 g de extracto hexánico, 85.8 g de extracto de diclorometano y 167.6 g de extracto de metanol, cuyo proceso de extracción se aprecia en la Figura 1.

Núm. 60: 337-354 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

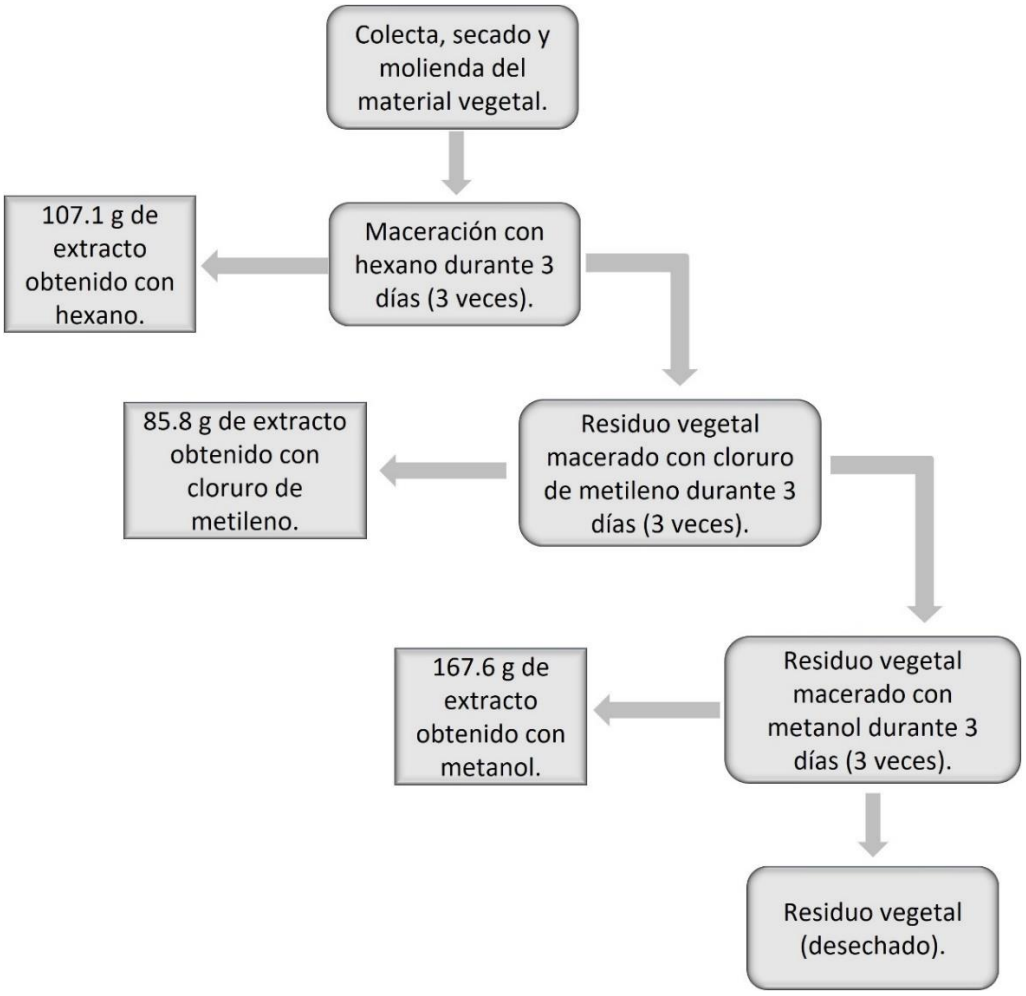


Figura 1. Diagrama del proceso para la obtención de extractos vegetales a partir de plantas silvestres de *Euphorbia nutans* Lag.

Figure 1. Diagram of the process for obtaining plant extracts from wild *Euphorbia nutans* Lag. plants.

Posteriormente, cada extracto se analizó mediante cromatografía en columna de vidrio (4.5 cm x 130 cm), empacada con 250 g de silicagel 60 (Malla 0.063-0.200 mm, Merck); se inició la separación de metabolitos secundarios con hexano y con cantidades crecientes de AcOEt y finalmente con AcOEt puro; se recogieron fracciones de 20 mL, mismas que fueron monitoreadas empleando cromatografía en capa delgada (Merck, TLC Silica gel 60 F254 25 Aluminium sheets 20 x 20 cm). Las fracciones fueron reunidas por su semejanza cromatográfica y se sometieron a estudios de RMN de ^{1}H.

Para la extracción de metabolitos secundarios a partir de callos *in vitro* de *Euphorbia nutans*, primero se retiraron de los frascos de cultivo y se dejaron a temperatura ambiente por 24 horas. Posteriormente, se pesaron 3.41 g y se sometieron a la técnica de reflujo por dos horas, la cual se repitió tres veces con tres disolventes diferentes, iniciando con el de menor a mayor polaridad (hexano, diclorometano y metanol, respectivamente) según lo recomendado por (Harborne, 1984). Los extractos obtenidos se concentraron con ayuda de un Rota evaporador Büchi Heating Bath B-491 y se mantuvieron en frascos color ambar hasta su posterior análisis mediante cromatografía en capa delgada y RMN de ^{1}H

Análisis de datos

Los datos obtenidos para cada variable se sometieron a análisis de varianza y se aplicó la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para definir la diferencia entre los efectos medios de los tratamientos. El paquete estadístico empleado fue Minitab 17.

Para el análisis de metabolitos secundarios, los espectros de Resonancia Magnética Nuclear de ^{1}H, ^{13}C y DEPT en una dimensión, y los bidimensionales HSQC, HMBC y COSY, se determinaron en un espectrómetro Agilent 400 MHz DD2 (Santa Clara, CA, USA) con sintonías a 100 MHz para RMN de ^{13}C y a 400 MHz para RMN de ^{1}H. Los desplazamientos químicos se midieron en $CDCl_3$ (Cloroformo deuterado), las muestras fueron disueltas en 600 µL y colocadas en tubos de RMN de 5 mm de diámetro, empleando TMS (Tetrametil silano) como referencia interna y realizar su respectiva comparación. El equipo se ubica en el Laboratorio de Productos Naturales, Área de Química, Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Inducción de callo a partir del cultivo *in vitro* de segmentos nodales de *Euphorbia nutans* Lag.

La inducción de callo estuvo influenciada principalmente por el tipo de auxina, siendo ANA la auxina con mejor efecto independientemente de la citocinina empleada (Kin, 2i-p o BA), a excepción del tratamiento con Kin + 2,4-D, que también favoreció la formación de tejido calloso, los resultados se presentan en la Figura 2 y Tabla 1. Por lo tanto, en *Euphorbia nutans* Lag. estos resultados no coinciden con lo publicado por Lozzi *et al*. (2018), quienes emplearon 2,4-D (0.55 mg L^{-1}) para formar callos de color blanco cremoso a partir de cotiledones maduros en *Ceratonia siliqua* L.; así como la respuesta obtenida por Hernández-Amasifuen *et al*. (2021) en *Capsicum pubescens* al emplear medio MS con 0.7 y 1.0 mg L^{-1} de 2,4-D; y por Millones-Yamunaqué *et al*. (2021), quienes obtuvieron una tasa del 100 % de callos friables en *Loxopterygium huasango* Spruce ex Engl. cultivando nudos cotiledonales en medio MS con 2,4-D desde 0.1 a 5.0 mg L^{-1}. Esto sugiere que, la respuesta a formar callo depende de la especie vegetal y 2,4-D no es de uso universal, o debe emplearse sin otros reguladores de crecimiento para favorecer esa respuesta. También, las respuestas obtenidas difieren de lo mencionado por Pierik (1990) y Kondamudi *et al*. (2009), pues la formación de callo en *Euphorbia nutans* Lag. no sucedió en el corte del tejido, sino en el segmento nodal donde existen yemas axilares (Figura 2, A-F) y tejidos con crecimiento activo. Esto coincide con lo reportado por Isah (2019), quien menciona la obtención de callo a partir de meristemos apicales en *Gymnema sylvestre* R. para regenerar brotes de forma indirecta; por lo tanto, estos resultados indican de la importancia de tejidos en crecimiento activo para favorecer la formación de callo, sin depender de la especie, coincidiendo con lo publicado por Perera & Trader (2010) en *Euphorbia pulcherrima* Will, quienes mencionan la obtención de callo a partir de yemas apicales y axilares empleando un medio de cultivo MS adicionado con BA y AIA, e incluso, adicionando únicamente BA como publicó Jasrai *et al*. (2003). Al analizar los resultados obtenidos con los de otras especies, parce indicar que, en *Euphorbia nutans* Lag., los explantes a partir de segmentos nodales no son idóneos para regenerar plantas *in vitro* de forma indirecta (Figura 2), pues según Albarrán-Mondragón *et al*. (2022), la mejor respuesta para inducción de callo a partir de secciones foliares en *Bromelia karatas* L., fue empleando un medio MS con BA (1.0 mg L^{-1}) + 2,4-D (0.0, 0.5, 1.0 y 2.0 mg L^{-1}); y Fallah *et al*. (2022), mencionan algo similar para inducir callo a partir de brotes en zanahoria con medio MS adicionando BAP y 2,4-D (0.5 mg L^{-1}). También, tal vez falta evaluar otros reguladores de crecimiento, concentraciones y combinaciones como lo publicado por López-Ramírez *et al*. (2021), quienes lograron inducir callo en *Yucca carnerosana* Trel. empleando un medio MS adicionado con BA y ácido 4-aminotricloropicolínico (Picloram); pues con BA y 2,4-D, obtuvieron callos de aspecto compacto y necróticos como los obtenidos en la presente investigación con *Euphorbia nutans* Lag. (Figura 2).

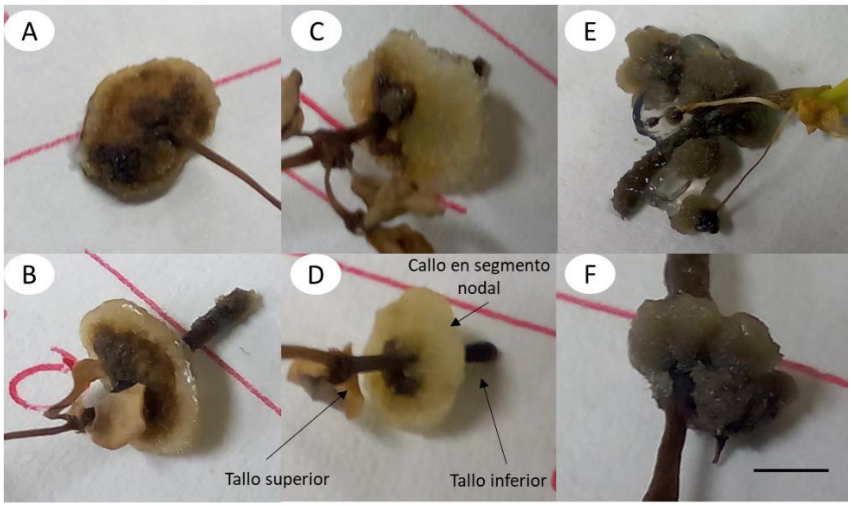


Figura 2. Formación de callos a partir de segmentos nodales de *Euphorbia nutans* Lag. en condiciones *in vitro*. A y B) Callos obtenidos con Kin + ANA, C y D) Callos obtenidos con 2i-p + ANA, E) Callos obtenidos con BA + ANA, F) Callos obtenidos con Kin + 2,4-D. Barra = 5 mm.
Figure 2. Callus formation from nodal segments of *Euphorbia nutans* Lag. in *in vitro* conditions. A and B) Calluses obtained with Kin + NAA, C and D) Calluses obtained with 2i-p + NAA, E) Calluses obtained with BA + NAA, F) Calluses obtained with Kin + 2,4-D. Bar = 5 mm.

Por otra parte, el peso de los callos parcialmente formados en los tratamientos con ANA, fue significativamente mejor con respecto a los demás tratamientos evaluados (Tukey, $p \leq 0.05$). No obstante, al comparar esa respuesta con la obtenida en otras especies empleando los mismos reguladores de crecimiento, son resultados inferiores, por ejemplo, a lo reportado por Lozzi *et al*. (2018), quienes a partir de explantes de cotiledones en *Ceratonia siliqua* L. lograron 32.5 g de callos blancos cremosos con 2,4-D (0.55 mg L^{-1}). Sin embargo, la respuesta para formar callo en *Euphorbia nutans* Lag. a partir de segmentos nodales, tal vez dependa de ANA sin citocinina y en diferente concentración (Tabla 1). Tal es el caso de 2,4-D, ya que los resultados obtenidos no coinciden con lo publicado por Lozzi *et al.* (2018), Hernández-Amasifuen *et al*. (2021) y Millones-Yamunaqué *et al*. (2021), quienes mencionan a 2,4-D para formar callo. Pero en este trabajo, el efecto de 2,4-D se vio inhibido por las citocininas, excepto cuando se combinó con Kin y favoreció parcialmente callo tipo 2 en el 70 % de explantes, respuesta que coincide con Abbas (1993) al emplear 2,4-D y Kin. También, ANA + BA tuvieron menor respuesta (40%) que Kin y 2i-p con ANA (70%), posiblemente porque BA está indicada para organogénesis directa como indica Rangel-Estrada *et al*. (2015) en *Euphorbia pulcherrima* Will*,* a partir de segmentos nodales y en concentraciones menores (2.0 y 1.0 mg L^{-1}) a las manejadas en este trabajo, pudiendo causar antagonismo con ANA. Esto sugiere que, en estudios posteriores, se evalue con otras citocininas, diferentes concentraciones y otros explantes; pues Preciado *et al*. (2016) mencionan al ANA con cinetina (1.0 mg L^{-1}) para formar callos en *Jatropha cuneata* Wiggins & Rollins a partir de hojas. Por otra parte, Rodríguez *et al.* (2014) publicaron que ANA fue el mejor regulador para inducir callo en *Ugni molinae* T., igualmente son resultados similares a los publicados por Lee & Starratt (1972) en *Euphorbia esula* L. y *Euphorbia cyparissias* L. para obtener callos con ANA, coincidiendo parcialmente con los obtenidos en *Euphorbia nutans* Lag. Esto indica que ANA, favorece la desdiferenciación celular, resultando interesante para regenerar plantas *in vitro* de manera indirecta independientemente de la especie (Tabla 1).

Tabla 1. Inducción de callos *in vitro* a partir de segmentos nodales de *Euphorbia nutans* Lag.
Table 1. *In vitro* callus induction from nodal segments of *Euphorbia nutans* Lag.

Tratamiento	Porcentaje de respuesta (%)	Características del callo		Peso de callo (g)
		Color	Textura	
Kin con ANA	70	Marrón/cremoso	Compacta	0.0321 a
2i-p con ANA	90	Cloróticos	Compacta	0.0381 a
BA con ANA	40	Gris obscuro	Compacta	0.0401 a
Kin con 2,4-D	70	Gris obscuro	Compacta	0.0245 b

Respuestas a la formación de callo *in vitro* en segmentos nodales de *Euphorbia nutans* Lag., por tratamiento. Los tratamientos que tienen la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).
Responses to callus formation *in vitro* in nodal segments of *Euphorbia nutans* Lag., by treatment. Treatments that have the same letter are not statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

No obstante, Ripley & Preece (1986) mencionan que BA no es necesaria para la proliferación de brotes axilares en *Euphorbia lathyris* L., pero sí fue fundamental para la obtención de callo y brotes adventicios. Sin embargo, en *Euphorbia nutans* Lag. BA no fue favorable para obtener callo cuando se combinó con 2,4-D y TDZ, sólo con ANA; esto sugiere que BA no es compatible con otras auxinas para formar callo, coincidiendo esta observación con lo mencionado por Janarthanam *et al*. (2010) en *Stevia rebaudiana* Bert. (*Asteraceae*), quienes obtuvieron callo para análisis de metabolitos secundarios empleando 0.5 mg L^{-1} de ANA + 0.5 mg L^{-1} de 2,4-D y 1.0 mg L^{-1} de Kin, sin BA. Sin embargo, BA sí es importante para el proceso de organogénesis como mencionan Xu *et al*. (2008) en *Euphorbia ésula* L., quienes obtuvieron brotes a partir de callo después de treinta días de cultivo *in vitro* en medio MS adicionando BAP y AIB, así como a lo reportado por Ali & Tariq (2013) en *Momordica charantia* cv. Jaunpuri (*Cucurbitaceae*) cuando emplearon BAP, AIA y 2,4-D, al ser mejor la combinación BAP + 2,4-D al igual que lo publicado por Fallah *et al*. (2022); o a lo mencionado por Preciado *et al*. (2016) en *Jatropha cuneata* Wiggins & Rollins, y ser mejor ANA con cinetina que 2,4-D. Sin embargo, Arzate-Fernández *et al.* (2020) publican que a mayor concentración de 2,4-D en todos los explantes de *Agave marmorata* R., el peso de callo aumentó, resultados totalmente diferentes a los obtenidos en *Euphorbia nutans* Lag., donde la única combinación que favoreció la formación de callo de coloración gris obscuro y poco friable, de manera similar a López-Ramírez *et al*. (2021), fue con Kin + 2,4-D. Así mismo, Álvarez-Aragón *et al.* (2020) mencionan el empleo de 2,4-D con BA para la obtención de callo a partir de semillas maduras en *Agave marmorata* R., y Fallah *et al.* (2022) también mencionan a 2,4-D y BAP para inducir callo a partir de brotes de zanahoria. Sin embargo, en el presente trabajo con *Euhorbia nutans* Lag., esa respuesta no fue favorecida. Esto sugiere que las respuestas morfogénicas pueden estár controladas a nivel de receptores celulares, y dichos receptores pueden variar no sólo de la especie, sino del tipo de explante; o incluso, dichas respuestas dependan de la especie, de la concentración y combinación de reguladores de crecimiento como señala Gätjens-Boniche *et al*. (2018) en *Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews (Orchidaceae) al obtener callos protocórmicos con BAP y 2,4-D en 1.0 y 0.5 mg L^{-1} respectivamente; y a lo mencionado por Wu *et al*. (2019), quienes lograron mantener cultivos de callos de *Lilium brownii* FEBr. ex Meillez. empleando medio MS suplementado con 30.0 g L^{-1} de sacarosa, 8.0 g L^{-1} de agar, adicionado con 2,4-D, ANA y BA o thidiazuron (TDZ) o zeatina.

Inducción de callo a partir del cultivo *in vitro* de hojas completas y segmentos foliares de *Euphorbia nutans* Lag.

Los resultados indican que la posición de la hoja en el medio de cultivo no representa un factor determinante en la formación de callo (Tabla 2), sino el contacto de la parte basal de la hoja con éste. Como se puede apreciar en la Figura 3, el callo se formó en el peciolo de las hojas, por lo tanto, la formación de callo será positiva siempre y cuando la hoja lleve parte del peciolo y éste

quede en contacto con el medio de cultivo, independientemente de si el haz foliar se coloca hacia arriba o hacia abajo sobre el medio de cultivo. Por ello, las respuestas obtenidas con hojas como explantes sí coinciden con lo citado por Pierik (1990) y Kondamudi *et al*. (2009), ya que parece ser necesario causar una herida para inducir respuesta callogénica en los explantes, lo que resulta similar a la respuesta obtenida (callo) en otras especies como reporta Albarrán-Mondragón *et al*. (2022) cuando cultivaron secciones de hojas en *Bromelia karatas* L. De igual forma, los resultados obtenidos fueron similares a lo mencionado por Mathur & Hülskamp (2002) sobre la importancia de los microtúbulos y microfilamentos de actina, así como el citoesqueleto en el control de la morfogénesis de las plantas; pues como es evidente, en ninguna otra parte de la hoja se indujo la formación de callo sino sólo en el peciolo, el cual fue "herido" con el bisturí. No obstante, es fundamental que el tejido herido quede en contacto con el medio de cultivo, ya que los peciolos heridos que quedaron sin contacto con el medio no tuvieron respuestas (Figura 3).

Tabla 2. Inducción de callos *in vitro* a partir de hojas completas y segmentos foliares de *Euphorbia nutans* Lag.
Table 2. *In vitro* callus induction from complete leaves and leaf segments of *Euphorbia nutans* Lag.

Explante	Porcentaje de respuesta (%)	Características del callo		Peso de callo (g)
		Color	Textura	
Hoja completa HazA	100	Verde claro	Poco cristalino	0.0174 c
Hoja completa HazB	40	Clorótico	Poco cristalino	0.0113 c
Segmento foliar HazA	100	Gris obscuro	Compacta	0.8830 b
Segmento foliar HazB	100	Gris obscuro con tonos rojos	Compacta	0.8220 b
Segmento foliar HazA con nervadura central hendida	100	Verde limón	Friable	1.9355 a
Segmento foliar HazB con nervadura central hendida	100	Verde limón	Friable	1.9078 a

Respuestas a la formación de callo *in vitro* en segmentos nodales de *Euphorbia nutans* Lag., por tratamiento. Los tratamientos que tienen la misma letra no son estadísticamente diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).
HazA: Envés de la hoja en contacto con el medio de cultivo.
HazB: Haz de la hoja en contacto con el medio de cultivo.
Responses to callus formation *in vitro* in nodal segments of *Euphorbia nutans* Lag., by treatment. Treatments that have the same letter are not statistically different (Tukey $p \leq 0.05$).
BeamA: Underside of the leaf in contact with the culture medium.
BeamB: Beam of the leaf in contact with the culture medium.

Núm. 60: 337-354 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

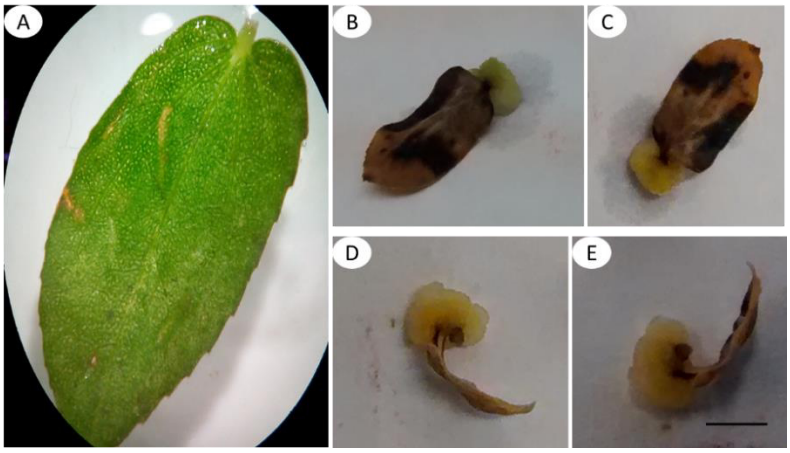


Figura 3. Callos formados en hojas completas *in vitro* de *Euphorbia nutans* Lag. A) Hoja completa *de Euphorbia nutans* Lag., B) y C) Respuesta para formación de callo en hojas completas con el haz hacia arriba, D y E) Respuesta para formación de callo en hojas completas con el haz hacia abajo. Barra = 5 mm.
Figure 3. Calluses formed on complete leaves *in vitro* of *Euphorbia nutans* Lag. A) Complete leaf of *Euphorbia nutans* Lag., B) and C) Response for callus formation on complete leaves with the bundle facing up, D and E) Response for callus formation on complete leaves with the bundle facing down. Bar = 5 mm.

Con respecto al color de callo obtenido en *Euphorbia nutans*, los resultados son similares a lo publicado por Perera & Trader (2010) en *Euphorbia pulcherrima* Will empleando medio MS + BA y BA + AIA, así como a lo mencionado por Jasrai *et al*. (2003), pues también observaron la presencia de callos color blanco y color gris-verde después de un mes de cultivo. Esto sugiere que probablemente, son respuestas en común para plantas de la familia *Euphorbiaceae* (Figura 4); aclarando que en *Euphorbia nutans* Lag., las tonalidades color rojo aparecieron después de tres semanas de cultivo *in vitro* y no fue una coloración homogénea del callo, sólo en ciertos sitios de manera similar a lo que sucede en las hojas de las plantas en campo (Figura 4).

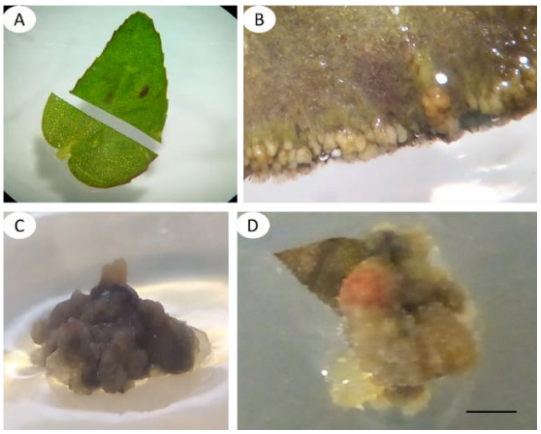


Figura 4. Respuestas a la formación de callo *in vitro* en segmentos de lámina foliar media de *Euphorbia nutans* Lag. sin hendir la nervadura central por la mitad. A) Restos de hoja después de aislar la parte media, B) Inicio de respuesta a callo en el margen foliar herido con el bisturí, C) Formación de callo a los 30 días de cultivo *in vitro* a partir del segmento de lámina foliar con el haz en contacto con el medio de cultivo, D) Formación de callo con coloración rojiza en segmento de lámina foliar a los 15 días de cultivo *in vitro* con el envés en contacto con el medio de cultivo. Barra = 5 mm.

Figure 4. Responses to *in vitro* callus formation in middle leaf blade segments of *Euphorbia nutans* Lag. without splitting the central rib in half. A) Leaf remains after isolating the middle part, B) Beginning of callus response on the leaf margin wounded with the scalpel, C) Callus formation after 30 days of *in vitro* culture from the leaf blade segment with the side in contact with the culture medium, D) Formation of callus with reddish color in leaf blade segment after 15 days of *in vitro* culture with the underside in contact with the culture medium. Bar = 5 mm.

Por otra parte, la inducción de callo friable en *Euphorbia nutans* Lag., sucedió de forma significativa (Tukey, $p \leq 0.05$) cuando se sembraron segmentos de lámina foliar y se escindió la nervadura central justo por la mitad (Tabla 2 y Figura 5). Con ello, la respuesta obtenida fue independientemente de la posición del explante, resultados que refuerzan lo publicado por Šamaj *et al*. (2004) y Mathur & Hülskamp (2002) sobre la importancia de exponer dichas estructuras celulares directamente con el medio de cultivo. Así mismo, Pickens *et al*. (2005) mencionan que la mayoría de callos y brotes en *Euphorbia pulcherrima* Will., se obtuvieron a partir de secciones de la vena media de las hojas cultivadas *in vitro* con BA y AIA durante un mes, y Naz *et al*. (2011) menciona tejidos de hojas cotiledonales de *Ricinus communis* L. para inducción de callo. De acuerdo a las respuestas obtenidas en *Euphorbia nutans* Lag., y a lo citado por Ripley & Preece (1986) en *Euphorbia lathyris* L. con BA para formación de callo, Jasrai *et al*. (2003) y Perera & Trader (2010) en *Euphorbia pulcherrima* Will. con BA y AIA, se puede ver que BA juega un papel muy importante para la formación de callo con o sin auxinas, dependiendo de la concentración, especie vegetal y explante utilizado como explicó Arzate-Fernández *et al*. (2020) para obtener callos compactos color crema, compactos amarillentos y hasta callos friables con cubierta mucilagenosa en especies de *Agave*. No obstante, recordar que la mejor respuesta para obtener callo en *Jatropha cuneata* a partir de hojas por Preciado *et al*. (2016), fue cuando emplearon ANA con cinetina y no con 2,4-D. Esto sugiere que, la combinación de BA y ANA, puede ser una excelente alternativa para la desdiferenciación celular de tejidos vegetales *in vitro*, y que explantes a partir de hojas pueden ser una excelente alternativa como fuente de explantes para la formación de tejido calloso (Hernández-Amasifuen *et al.,* 2021; Albarrán-Mondragón *et al*., 2022). Por lo tanto, es importante seguir trabajando en detallar protocolos de respuestas morfogénicas en *Euphorbia nutans* Lag. de acuerdo a los estudios posteriores que resulten de interés.

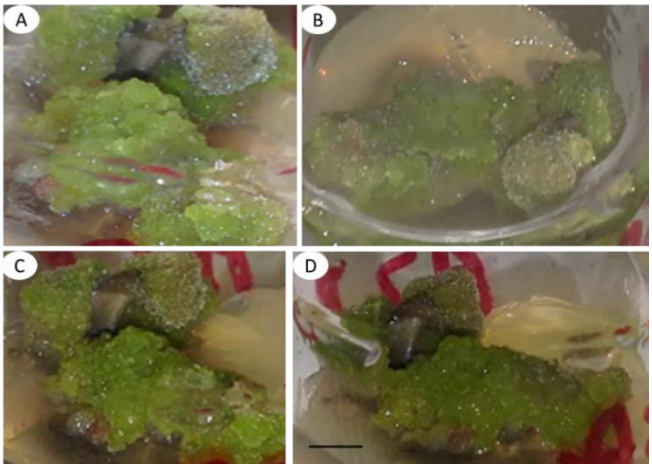


Figura 5. Obtención de callos *in vitro* en *Euphorbia nutans* Lag. a partir de segmentos de lámina foliar, con la nervadura central hendida por la mitad a 7 días de cultivo en medio MS 100% + BA y ANA 10.0 mg L^{-1}. A-B) Haz foliar en contacto con el medio de cultivo, C-D) Envés foliar en contacto con el medio de cultivo. Barra = 5 mm.
Figure 5. Obtaining *in vitro* callus in *Euphorbia nutans* Lag. from leaf blade segments, with the central vein split in half after 7 days of culture in 100% MS medium + BA and NAA 10.0 mg L-1. A-B) Leaf surface in contact with the culture medium, C-D) Leaf surface in contact with the culture medium. Bar = 5 mm.

Núm. 60: 337-354 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Los metabolitos identificados en el extracto hexánico fueron: en las fracciones 139-148 eluidas con hexano:AcOEt (95:5), se aisló un solido cristalino denominado acetato de α- amirina, identidad que fue confirmada al comparar sus propiedades espectroscópicas con las descritas en la literatura (Bhattacharyya & Barros, 1985; Ipav *et al*., 2022b), de las fracciones 200-223 eluidas con hexano:AcOEt (9:1), se obtuvo otro sólido cristalino identificado como β-lupeol, mismo que que coincidió con las características espectroscópicas publicadas recientemente (Ipav *et al*., 2022a), de las fracciones 252-303 eluidas con hexano:AcOEt (9:1); se visualizaron en su espectro de RMN de ^{1}H, β-sitosterol, estigmasterol y β-lupeol, mismos que fueron separados por recromatografias sucesivas cuyos datos espectroscópicos correspondieron a los esteroles aislados previamente de *Rubus suavissimus* (Chaturvedula & Prakash, 2012). Por otro lado, los metabolitos identificados en el extracto de diclorometano (CH_2Cl_2) son: en las fracciones 97-100 eluidas con hexano:AceOEt (95:5) se aisló e identificó β-sitosterol y una mezcla de 24-metilen cicloartan-3β-ol (Kikuchi *et al*., 1986). De las fracciones 101-126 eluidas con hexano:AceOEt (95:5) se aisló β-lupeol (Aguilar-Jiménez *et al*., 2015). En el extracto de metanol los metabolitos identificados fueron: de las fracciones 1-40 eluidas con cloruro de metileno, estigamasterol y β-sitosterol; y de las fracciones 511-570 eluidas con CH_2Cl_2:MeOH (1:1), se encontró un metabolito tipo iridoide por comparación de sus datos espectroscópicos de RMN de ^{1}H con los descritos en la literatura (El-Naggar & Beal, 1980).

El análisis de extractos mediante TLC, reveló algunas diferencias entre extractos de callos producidos *in vitro* con respecto a los obtenidos de plantas silvestres (Figura 6). Por lo tanto, sí se está de acuerdo de forma parcial con Kreis (2007), porque existe la posibilidad de no haber obtenido los mismos metabolitos a partir de células indiferenciadas como se aprecia en la placa TLC, específicamente en extracto con hexano de plantas silvestres; observándose en el primer carril, de izquierda a derecha, dos bandas (señaladas con flechas color rojo) que corresponde a dos posibles metabolitos no presentes en el extracto hexánico de callos (Figura 6). Sin embargo, resulta lógico que haya variaciones entre los dos extractos porque las condiciones en campo son diferentes a las condiciones *in vitro.* Por lo tanto, existen variaciones en la biosíntesis de metabolitos secundarios, moléculas que ayudan a sobrevivir a las plantas bajo ciertas situaciones de estrés (Taiz & Zeiger, 2006; Verpoorte *et al*., 2000), y no porque se trate de células indiferenciadas. Además, se aprecian en la placa cromatográfica, para los extractos de callos con cloruro de metileno (CH_2Cl_2) y con metanol (CH_3OH), la presencia de las mismas bandas que en extractos de plantas silvestres (Figura 6, carriles 4 y 6, respectivamente), y además, otras bandas (señaladas con flechas color amarillo y azul) que no se observan en los extractos de plantas silvestres con los mismos disolventes (Figura 6, carriles 4 y 5). Estos resultados son similares a los obtenidos en especies diferentes como mencionan Janarthanam *et al*. (2010) en *Stevia rebaudiana,* ya que encontraron los principales compuestos activos en células indiferenciadas cultivadas *in vitro*. Así mismo, López-Ramírez *et al*. (2021) mencionan que un análisis cromatográfico y espectrométrico, les permitió separar e identificar 22 compuestos en callos, 26 en plantas *in vitro* y 27 en plantas *ex vitro* de *Yucca carnerosana* Trel. De forma similar, Ali & Tariq (2013) mencionan que las plantas de *Momordica charantia* cv. Jaunpuri cultivadas en campo, mostraron mayor cantidad de metabolitos secundarios que los callos a partir de plántulas *in vitro*. Sin embargo, al emplear cotiledones como explantes para formar callo, observaron que los metabolitos secundarios obtenidos eran comparativamente similares con ligeras variaciones. Incluso, al comparar la extracción de metabolitos a partir de entrenudos de plantas crecidas en campo, con los obtenidos en cultivos de callo, en ambos casos se encontró el ácido alfa-eleosteárico, un ácido graso específico de *Momordica* sp. Todo ello sugiere que, la biosíntesis de metabolitos a partir de tejidos indiferenciados (callos) sí es posible, e incluso, pueden obtenerse otros metabolitos secundarios que no se encuentran en plantas silvestres o en campo, pero se debe contar con protocolos rigurosos para controlar su producción mediante el empleo de elicitores celulares y cultivos específicos (Baldi *et al*., 2007), e incluso, considerar que el éxito en ello puede depender del tipo de explante empleado (Ali & Tariq, 2013). Por ello, se sugiere que en estudios fitoquímicos posteriores se consideren callos, plantas diferenciadas *in vitro* y material vegetal silvestre.

Núm. 60: 337-354 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

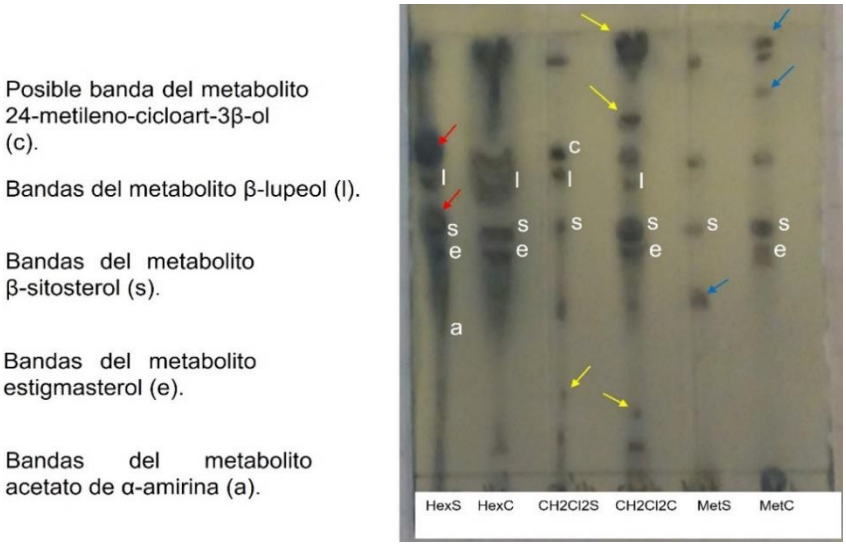


Figura 6. Placa cromatográfica en capa delgada en la que se utilizó una mezla de CH_2Cl_2/MeOH, 7/3 (v/v) como eluyente, para comparar los metabolitos obtenidos en extractos de plantas silvestres *vs* extractos de callos *in vitro* de *Euphrbia nutans* Lag. HexS: Extracto hexánico de plantas silvestres, HexC: Extracto hexánico de callos, CH_2Cl_2S: Extracto con diclorometano de plantas silvestres, CH_2Cl_2C: Extracto con diclorometano de callos, MetS: Extracto con metanol de plantas silvestres, MetC: Extracto con metanol de callos.
Figure 6. Thin layer chromatographic plate in which a mixture of CH_2Cl_2/MeOH, 7/3 (v/v) was used as eluent, to compare the metabolites obtained in wild plant extracts *vs in vitro* callus extracts of *Euphrbia nutans* Lag. HexS: Hexane extract of wild plants, HexC: Hexane extract of calluses, CH_2Cl_2S: Dichloromethane extract of wild plants, CH_2Cl_2C: Dichloromethane extract of calluses, MetS: Methanol extract of wild plants, MetC: Methanol extract of calluses.

Por otra parte, el análisis mediante RMN ^{1}H reveló que los metabolitos secundarios obtenidos a partir de plantas silvestres en el extracto con hexano, fueron: β-sitosterol (1), estigmasterol (2), β-lupeol (3) y acetato de α-amirina (4); cuyas estructuras moleculares se muestran en la Figura 7. En el extracto de diclorometano se identificaron los metabolitos 1, 2, 3, y 24-metileno-cicloart-3β-ol (5), cuyas características espectroscópicas coincidieron con el un cicloartano, aislado e identificado, presente en *Nervilia purpurea* S. (Kikuchi *et al*., 1986). En el extracto metanólico, se identificaron los metabolitos 1 y 2; y se detectó un metabolito interesante de tipo iridoide (**6**), sus características espectroscópicas corresponden a la estructura general de un iridoide (El-Naggar & Beal, 1980), el cual no ha sido descrito en plantas de la familia *Euphorbiaceae*, por lo que este estudio es el primero en reportarlo, así como el primer estudio fitoquímico que se describe para la planta *Euphorbia nutans* Lag. (Aguilar-Jiménez *et al*., 2015). Así mismo, el análisis mediante RMN ^{1}H del extracto con metanol a partir de callos, reveló sacarosa abundante; posiblemente porque el medio de cultivo fue adicionado con sacarosa, y las condiciones *in vitro* permitieron mayor biosíntesis de ella, entre otros metabolitos secundarios (Baldi *et al.,* 2007; Sakunphueak & Panichayupakaranant, 2010; Pérez-Alonso & Jiménez, 2011) y no se inhibieron por tratarse de tejidos no diferenciados como menciona Kreis (2007), pues se ha demostrado la posibilidad de obtener metabolitos secundarios en células indiferenciadas (Janarthanam *et al*., 2010; Ali & Tariq, 2013; Aguilar *et al*., 2019). Así mismo, es importante realizar comparaciones fitoquímicas en igualdad de condiciones, y no argumentar que en cultivos *in vitro* no se obtienen los mismos metabolitos o las mismas cantidades, cuando se consideran partes botánicas diferentes, como frutos maduros *vs* callo u hojas *in vitro* (Albarrán-Mondragón *et al*., 2022), ya que los metabolitos secundarios de plantas no siempre se encuentran de forma generalizada, e incluso, pueden estar presentes sólo en partes muy específicas de ellas (Harborne, 1984). Por lo tanto, es importante ajustar las condiciones *in vitro* que permitan obtener respuestas deseadas a partir de cultivos diferenciados e indiferenciados (Pérez-Alonso & Jiménez, 2011).

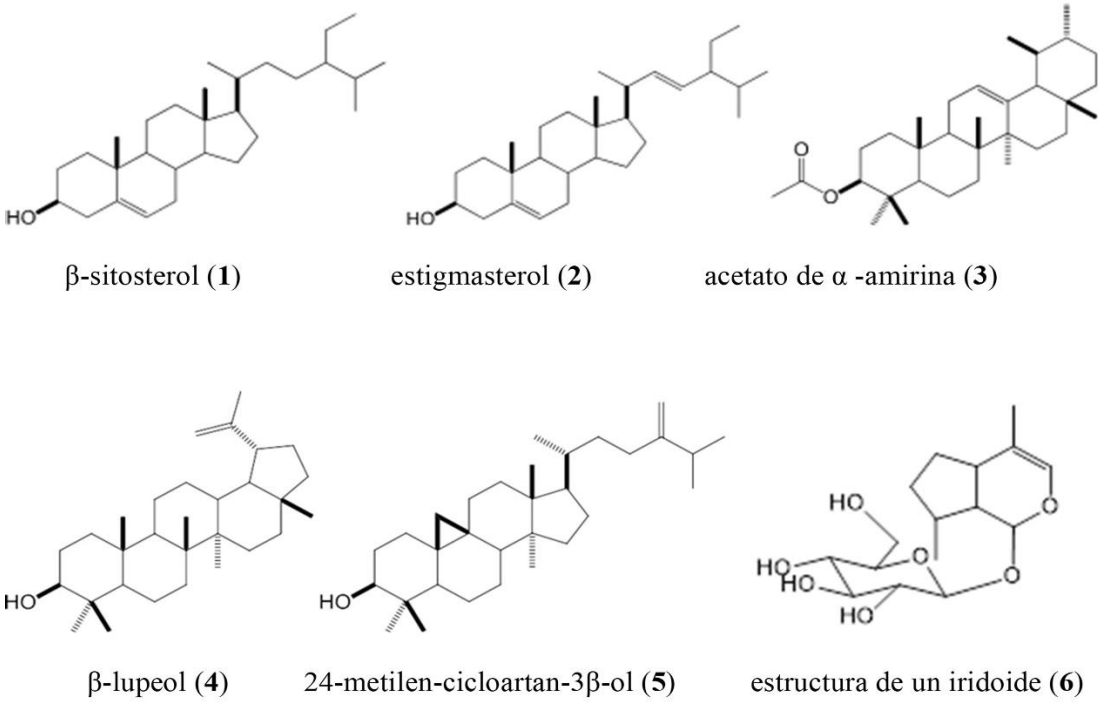


Figura 7. Estructura molecular de los metabolitos secundarios aislados de *Euphorbia nutans* Lag.
Figure 7. Molecular structure of the secondary metabolites isolated from *Euphorbia nutans* Lag.

CONCLUSIONES

Fue posible la inducción de callo en segmentos nodales, de forma significativa solo en los medios de cultivo con ANA, independientemente de la citocinina empleada. Con el empleo de segmentos de lámina foliar con nervadura central hendida por la mitad, sin importar su posición en el medio de cultivo, se logró la máxima producción de callo friable con color verde limón y apariencia mucilaginosa.

Las placas cromatográficas, revelaron la presencia de los mismos metabolitos en extractos de callos *in vitro* y en extractos de plantas silvestres de *Euphorbia nutans* Lag. con algunas variaciones, que posiblemente correspondan a otros metabolitos secundarios presentes en callos. Finalmente, el análisis mediante RMN ^{1}H permitió identificar seis metabolitos secundarios conocidos: β-sitosterol, estigmasterol, acetato de α -amirina, β-lupeol, 24-metilen-cicloartan-3β-ol y un metabolito tipo iridoide; confirmado que el cultivo de células indiferenciadas *in vitro*, también pueden realizar la biosíntesis de metabolitos secundarios.

LITERATURA CITADA

Abbas, N. (1993). *Studies on somatic embryogenesis and organogenesis in three economic plants, Mallotus philippensis, Aleurites fordii - mature endosperm, Trachyspermum ammi, seedling explants*. India: Thesis submitted to University of Delhi.

Aguilar Jiménez, D., Rodríguez De la O, J. L., Piña Guillén, J., & Silva Díaz, V. (2019). Propagación *in vitro* de *Stevia rebaudiana* y análisis preliminar de esteviósidos. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas, 10*(1), 197-204. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1543

Aguilar-Jiménez, D., & Rodríguez-De-la-O, J. L. (2020). Efecto de nitrato de plata en la germinación *in vitro* de *Euphorbia nutans* Lag. *Biotecnología Vegetal, 20*(4), 338-350. eISSN 2074-8647, RNPS: 2154.

Aguilar-Jiménez, D., Rodríguez-De-la-O, J. L., Reyes-Trejo, B., & Martínez-Solís, J. (2015). Respuestas morfogénicas *in vitro* y caracterización fitoquímica de la *Euphorbia nutans* Lag. Texcoco, Estado de México: Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo. https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/1255.

Albarrán-Mondragón, F. J., Orozco-Villafuerte, J., Mulia-Rodriguez, J., Hernández-Jaimes, C., Cruz-Sosa, F., & Buendía-González, L. (2022). Total phenolic content in fruits and in *in vitro* cultures of *Bromelia karatas* L. *Revista Mexicana de Ingeniería Química, 21*(1), Bio2685. https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio2685

Ali, S., & Tariq, A. (2013). Analysis of secondary metabolites in callus cultures of *Momordica charantia* cv. Jaunpuri. *Biologia (Pakistan), 59*(1), 23-32.

Alvarez-Aragón, C., Arzate-Fernández, A. M., Martínez-Martínez, S. Y., & Martínez-Velasco, I. (2020). Regeneración de plantas de *Agave marmorata* Roezl, vía embriogénesis somática. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 23*(36). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/349107101.

Anand, M., & Basavaraju, R. (2021). A review on phytochemistry and pharmacological uses of *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth. *Journal of ethnopharmacology, 265*(113270). https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113270

Andújar, I., González, M., García-Ramos, J. C., Hajari, E., Bogdanchikova, N., Pestryakov, A., Escalona, M. (2023). Are silver nanoparticles the "silver bullet" to promote diterpene production in *Stevia rebaudiana*? *Plant Cell Tissue and Organ Culture, 155*(2), 447-453. https://doi.org/10.1007/s11240-023-02450-5

Arzate-Fernández, A. M., Martínez Velasco, I., Alvarez-Aragón, C., Martínez Martínez, S. Y., & Norman-Mondragón, T. H. (2020). Respuesta morfogenética de dos especies de agave regeneradas *in vitro*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 23*(47). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/342535024.

Baldi, A., Bisaria, V. S., & Srivastava, A. K. (2007). Biotechnological Approaches for the Production of some Promising Plant-Based Chemotherapeutics. En O. K. Quax, *Medicinal Plant Biotechnology. From Basic Research to Industrial Applications* (págs. 117-156). Weinheim, Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/9783527619771.ch7

Bhattacharyya, J., & Barros, C. B. (1985). Triterpenoids of *Cnidoscolus urens. Phytochemistry, 25*(1), 274-276. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)94550-3

Bourgaud, F., Gravot, A., Milesi, S., & Gontier, E. (2001). Production of plant secondary metabolites: a historical perspective. *Plant science, 161*(5), 839-851. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(01)00490-3

Chaturvedula, V. S., & Prakash, I. (2012). Isolation of stigmasterol and β-sitosterol from the dichloromethane extract of *Rubus suavissimus*. *International Current Pharmaceutical Journal, 1*(9), 239-242. https://doi.org/10.3329/icpj.v1i9.11613.

El-Naggar, L. J., & Beal, J. L. (1980). Iridoids. A review. *Journal of Natural Products, 43*(6), 649-707. https://doi.org/10.1021/np50012a001

Fallah Ziarani, M., Tohidfar, M., & Navvabi, M. (2022). Modeling and optimizing *in vitro* percentage and speed callus induction of carrot via Multilayer Perceptron-Single point discrete GA and radial basis function. *BMC Biotechnology, 22*, 34. https://doi.org/10.1186/s12896-022-00764-4

Gätjens-Boniche, O., Acuña-Matamoros, C. L., Montero-Carmona, W., Díaz, C., & Torres, S. (2018). Propagación masiva y formación de callos protocórmicos de *Vainilla* a partir de ápices radicales. *Polibotánica 45*, 157-180. https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.12

Harborne, H. B. (1984). *Phytochemical Methods (A guide to modern techniques of plant analysis)* (Second edition ed.). New York: Chapman and Hall. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5570-7

Hernández-Amasifuen, A. D., Argüelles-Curaca, A., Cortez-Lázaro, A. A., & Díaz-Pillasca, H. B. (2021). Inducción *in vitro* de callos a partir de explantes foliares en rocoto (*Capsicum*

pubescens Ruiz & Pav.). *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, 34*(2), 131-140. https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.09

Ipav, S. S., Igoli, J. O., Tor-Anyiin, T. A., & Anyam, J. V. (2022a). Isolation and characterisation of lupeol and lupeol acetate from propolis obtained from Benue state. *Journal of Chemical Society of Nigeria, 47*(1). https://doi.org/10.46602/jcsn.v47i1.708

Ipav, S. S., Igoli, J. O., Tor-Anyiin, T. A., & Anyam, J. V. (2022b). Isolation and characterisation of alpha and beta amyrins from propolis obtained from Benue state. *Journal of Chemical Society of Nigeria, 47*(2). https://doi.org/10.46602/jcsn.v47i2.723

Isah, T. (2019). De novo *in vitro* shoot morphogenesis from shoot tip-induced callus cultures of *Gymnema sylvestre* (Retz.) R.Br. ex Sm. *Biological Research, 52*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s40659-019-0211-1

Janarthanam, B., Gopalakrishnan, M., & Sekar, T. (2010). Secondary metabolite production in callus cultures of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research, 45*(3), 243-248. https://doi.org/10.3329/bjsir.v45i3.6532

Jasrai, Y., Thaker, K., & D´Souza, M. (2003). *In vitro* Propagation of *Euphorbia pulcherrima* Willd. Through Somatic Embryogenesis. *Plant Tissue Culture*, 31-36.

Kikuchi, T., Kadota , S., & Tsubono, K. (1986). Studies on the Constituents of Orchidaceous Plants. IV. Proton and Carbon 13 Signal Assignments of Cycloeucalenol –Tipe Triterpenes from *Nervilia purpurea* Schlechter by Two-Dimensional Nuclear Magnetic Ressonance Spectroscopy. *Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 34*(6), 2479-2486. https://doi.org/10.1248/CPB.34.2479

Kondamudi, R., Sri R, M. K., & Pullaiah, T. (2009). Euphorbiaceae - a critical review on plant tissue culture. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10*(3), 313-335.

Kreis, W. (2007). *In vitro* culturing techniques of medicinal plants. En O. Q. Kayser, *Medicinal plant biotechnology. From basic research to industrial applications* (págs. 157-185). Weinheim, Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/9783527619771.ch8

Lee T, T., & Starratt A, N. (1972). Growth substance requirements and major lipid constituents of tissue cultures of *Euphorbia esula* and *E. cyparissias*. *Canadian Journal Botany, 50*, 723-726. https://doi.org//10.1139/b72-090

López-Ramírez, Y., Cabañas-García, E., Areche, C., Trejo-Tapia, G., Pérez-Molphe-Balch, E., & Gómez-Aguirre, Y. A. (2021). Callus induction and phytochemical profiling of *Yucca carnerosana* (Trel.) McKelvey obtained from *in vitro* cultures. *Revista Mexicana de Ingeniería Química, 20*(2), 823-837. https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio2209

Lozzi, A., Abdelwahd, R., Alami-Halimi, D., Mentag, R., & Abousalim, A. (2018). Optimization of a mature cotyledons-based *in vitro* culture system for embryogenic-callus induction in carob (*Ceratonia siliqua* L.). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 25*(1), 71-84. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2018.06.053

Mathur, J., & Hülskamp, M. (2002). Microtubules and microfilaments in cell morphogenesis in higher plants. *Current Biology, 12*(19), R669-76. https://doi.org/10.1016/s0960-9822(02)01164-8

Millones-Yamunaqué, A. M., Delgado-Paredes, G. E., Vásquez-Díaz, C., & Rojas-Idrogo, C. (2021). Callus induction, clonal propagation and *in vitro* germplasm conservation of 'hualtaco' *Loxopterygium huasango* Spruce ex Engl. (Anacardiaceae). *Scientia Agropecuaria, 12*(4), 545-556. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.059

Mukul, A., & Basavaraju, R. (2021). A review on phytochemistry and pharmacological uses of *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth. *Journal of Ethnopharmacology*, 265. https://doi.org/10.1016/j.jep.2020.113270.

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco. *Physiologia Plantarum, 15*(3), 473-497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

Naz, S., Tabassum, F., Javad, S., Ilyas, S., Aslam, F., Munir, N., & Ali, A. (2011). Micropropagation and callogenesis of a recalcitrant species *Ricinus communis. Pakistan Journal of Botany, 43*(5), 2419-2422.

Recibido: *14/diciembre/2024*

Aceptado: *23/junio/2025*

Perera, D., & Trader, B. (2010). Poinsettia 'Prestige™ Red' (*Euphorbia pulcherrima*) *In Vitro* Propagation. *HortScience horts, 45*(7), 1126-1128. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.7.1126

Pérez-Alonso, N., & Jiménez, E. (2011). Producción de metabolitos secundarios de plantas mediante el cultivo *in vitro*. *Biotecnología Vegetal, 11*(4), 195-211. https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/255/837.

Pickens, K., Cheng, Z., & Trigiano, R. (2005). Axillary bud proliferation and organogenesis of *Euphorbia pulchurrima* Winter Rose. *In Vitro Cellular and Developmental Biology - Plant, 41*(6), 770-774. https://doi.org/10.1079/IVP2005706

Pierik R, L. M. (1990). *Cultivo in vitro de las plantas superiores.* Madrid-España: Mundi-Prensa.

Preciado Paredes, P. M., Ayala Astorga, G. I., & Martínez Heredia, D. (2016). Enraizamiento a partir de callos de *Jatropha cuneata* (Wiggins & Rollins) *in vitro*. *CIBA Revista Iberoamericana De Las Ciencias Biológicas Y Agropecuarias, 4*(8), 58-72. https://ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/34

Rangel-Estrada, S. D., Canul-Ku, J., Osuna-Canizales, F. J., García-Pérez, F., Del-Rosario-Montes, P., Vences-Hernández, A. B., & Hernández-Meneses, E. (2015). Regeneración *in vitro* de híbridos de nochebuena vía organogénesis. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 6*(7), 1571-1585.

Ripley, K., & Preece, J. (1986). Micropropagation of *Euphorbia lathyris* L. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 5*(3), 213-218. https://doi.org/10.1007/BF00040132

Rodríguez Beraud, M. M., Latsague Vidal, M. I., Chacón Fuentes, M. A., & Astorga Brevis, P. K. (2014). Inducción *in vitro* de callogénesis y organogénesis indirecta a partir de explantes de cotiledón, hipocótilo y hoja en *Ugni molinae*. *BOSQUE, 35*(1), 111-118. https://doi.org/10.4067/S0717-92002014000100011

Sakunphueak, A., & Panichayupakaranant, P. (2010). Increased production of naphthoquinones in *Impatiens balsamina* root cultures by elicitation with methyl jasmonate. *Bioresour Technology, 101*(22), 8777-8783. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.067.

Šamaj, J., Baluška, F., & Hirt, H. (2004). From signal to cell polarity: mitogen-activated protein kinases as sensors and effectors of cytoskeleton dynamicity. *Journal of Experimental Botany, 55*(395), 189-198. https://doi.org/10.1093/jxb/erh012

Taiz, L., & Zeiger W. E. (2006). *Fisiología Vegetal*. 3a. ed. Castellón de la Plata, España: Universitat Jaume. https://doi.org/10.1093/aob/mcg079

Vázquez-Baxcajay, L., Robledo-Paz, A., Muratalla-Lúa, A., & Conde-Martínez, V. (2014). Micropropagation of *Stevia rebaudiana* Bertoni, and steviosides detection. *Bioagro* (online)*, 26*(1), 49-56. ISSN 1316-3361.

Verpoorte , R., van der Heijden, R., & Memelink, J. (2000). Engineering the plant cell factory for secondary metabolite production. *Transgenic Research, 9*(4-5), 323-343. https://doi.org/10.1023/a:1008966404981

Wu, Y., Ma, Y.-D., Li, Y., Zhang, L., & Xia, Y.-P. (2019). Plantlet regeneration from primary callus cultures of *Lilium brownii* F.E.Br. ex Miellez var. *giganteum* G. Y. Li & Z. H. Chen, a rare bulbous germplasm. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant, 55*(1). https://doi.org/10.1007/s11627-018-09955-1

Xu, B., Dai, W., & Chao, W. (2008). An efficient method for in vitro regeneration of leafy spurge (*Euphorbia esula* L.). *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant, 44*(6), 548-556. https://doi.org/10.1007/s11627-008-9139-9

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DESINFECCIÓN DE SUSTRATOS PARA LA PRODUCCIÓN DE *Pleurotus ostreatus*

EVALUATION OF TWO SUBSTRATE DISINFECTION METHODS FOR THE PRODUCTION OF *Pleurotus ostreatus*

Hernández Hernández, R.E., V. Rosales Martinez, C. Flota Bañuelos, M.L. Osnaya González, P. Morales Almora

EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DESINFECCIÓN DE SUSTRATOS PARA LA PRODUCCIÓN DE *Pleurotus ostreatus*
EVALUATION OF TWO SUBSTRATE DISINFECTION METHODS FOR THE PRODUCTION OF *Pleurotus ostreatus*

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 355-366 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.21

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 355-366 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Evaluación de dos métodos de desinfección de sustratos para la producción de *Pleurotus ostreatus*

Evaluation of two substrate disinfection methods for the production of *Pleurotus ostreatus*

Hernández Hernández, R.E., V. Rosales Martinez, C. Flota Bañuelos, M.L. Osnaya González, P. Morales Almora

EVALUACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DESINFECCIÓN DE SUSTRATOS PARA LA PRODUCCIÓN DE *Pleurotus ostreatus*

EVALUATION OF TWO SUBSTRATE DISINFECTION METHODS FOR THE PRODUCTION OF *Pleurotus ostreatus*

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 355-366. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.21

Rosa Elena Hernández Hernández https://orcid.org/0009-0001-3414-4753
Verónica Rosales Martínez / vrosales@colpos.mx
https://orcid.org/0000-0002-5895-1250
Carolina Flota Bañuelos https://orcid.org/0000-0001-5533-6722
Mónica Leticia Osnaya González https://orcid.org/0000-0003-0836-4936
Porfirio Morales Almora https://orcid.org/0000-0002-4407-2335
SECIHTI-Colegio de Colegio de Postgraduados Campus Campeche
Dirección postal: Carretera Federal Haltunchén-Edzna Km. 17.5 Sihochac, Champotón, Campeche. CP 24450 Teléfono: 01 (55) 58 045 991 Ext. 64706 y 54722

RESUMEN: El objetivo de este trabajo fue evaluar dos métodos de desinfección de sustratos de rastrojo de maíz (M) y paja de sorgo (S) utilizados como sustratos para la producción de *Pleurotus ostreatus,* de manera rústica. Se probaron dos métodos de desinfección de los sustratos: a) agua con óxido de calcio (CaO) (400 g) y sulfato cálcico hidratado ($CaSO_4$ $2H_2O$) (400 g) más aplicación térmica (T1M y T5S), b) agua con CaO (400 g) y $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) sin aplicación térmica (T2M y T6S), c) agua con hipoclorito de sodio comercial (NaClO) (400 ml) más aplicación térmica (T3M y T7S) y d) agua con NaClO (400 ml) sin aplicación térmica (T4M y T8S), tanto para el rastrojo de maíz como para el rastrojo de sorgo. Se obtuvieron ocho tratamientos, cada uno con cinco repeticiones. La aplicación térmica fue un factor muy importante en la desinfección, debido a que, los tratamientos con este método presentaron menor porcentaje de contaminación (T1M, T3M, T5S y T7S), contario a aquellos que no tenían aplicación térmica, los cuales se contaminaron al 100%; a excepción de T2M con 43%, respecto al total de bolsas sembradas. De los no contaminados se pudo obtener cosechas de carpóforos; se obtuvo mayor cantidad de primordios en T3M (65) y T1M (48), mayor producción de carpóforos en T7S y T3M con un peso total de 87.33 g y 85.25 g en promedio, respectivamente. La longitud del estípite de los carpóforos fue mayor en T7S con 3.94 cm. El diámetro del estípite de los carpóforos fue mayor en T7S con 1 cm. Se recomienda que para la producción de *P. ostreatus* de manera rústica y a pequeña escala, se utilicen residuos agrícolas disponibles en la región, además, que la desinfección del sustrato sea a través del tratamiento térmico, con adición de NaClO o bien con CaO y $CaSO_4$ $2H_2O$ al agua.

Palabras claves: Desinfección, Hongos comestibles, Micelio, Producción, Residuos agrícolas.

ABSTRACT: The objective of this work was to evaluate two disinfection methods for corn stover (M) and sorghum straw (S) substrates used as substrates for the production of *Pleurotus ostreatus*, in a rustic manner. Two substrate disinfection methods were tested: a) water with calcium oxide (CaO) (400 g) and hydrated calcium sulfate (CaSO4 $2H_2O$) (400 g) plus thermal application (T1M and T5S), b) water with CaO (400 g) and $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) without thermal application (T2M and T6S), c) water with commercial sodium hypochlorite (NaClO) (400 ml) plus thermal application (T3M and T7S) and d) water with NaClO (400 ml) without thermal application (T4M and T8S), both for corn stover and sorghum stover. Eight treatments were obtained, each with five replicates. Thermal application was a very important factor in disinfection, because treatments with this method presented a lower percentage of contamination (T1M, T3M,

Núm. 60: 355-366 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

T5S and T7S), contrary to those that did not have thermal application, which were 100% contaminated; except for T2M with 43%, with respect to the total number of bags planted. From the uncontaminated ones, carpophore harvests could be obtained; a greater quantity of primordia was obtained in T3M (65) and T1M (48), greater carpophore production in T7S and T3M with a total weight of 87.33 g and 85.25 g on average, respectively. The length of the carpophore stipe was greater in T7S with 3.94 cm. The diameter of the carpophore stipe was greater in T7S with 1 cm. It is recommended that for the production of P. ostreatus in a rustic and small-scale manner, agricultural residues available in the region be used, in addition to the disinfection of the substrate through thermal treatment, with the addition of NaClO or with CaO and $CaSO_4$ $2H_2O$ to the water.
Key words: Disinfection, Edible mushrooms, Mycelium, Production, Agricultural waste.

INTRODUCCIÓN

La producción mundial de hongos comestibles ha aumentado significativamente de 1978 al 2022, se registró poco más de 48 millones de toneladas en este último año, el principal productor fue China con 45 millones de toneladas, seguido de Japón con 469, 491 t, y en tercer lugar Estados Unidos con 318,600 t (FAOSTAT, 2023). De las especies más comercializadas, se encuentran *Agaricus bisporus* (Champiñón de París), *Lentinula edodes* (Shiitake), *Pleurotus ostreatus* (hongo ostra), *Auricularia* (oreja de judas) y *Flammulina* (seta de aguja de oro) (Briceño y Morales, 2019). El cultivo de hongos comestibles es una alternativa para aprovechar los residuos lignocelulósicos que se encuentran disponibles por ser una abundante materia prima existente (Díaz- Muñoz *et al*., 2019). Para la producción del género *Pleurotus*, se utilizan diversos residuos agrícolas y agroindustriales, como las pajas, entre las cuales se pueden encontrar las de trigo, de arroz, de cebada, de soya, de frijol, de sésamo; rastrojos maíz, de tomate, sorgo, de jamaica, de quinua, pulpa de café, de limón, de cardamomo; bagazos de caña, de cebada, yuca, y remolacha azucarera, así mismo, de árboles forestales como el aserrín, viruta de cedro, viruta de pino, astillas de eucalipto, otros como la hierba de india, malezas y especies arbustivas del bosque (Piña-Guzmán *et al*., 2016). No obstante, la elección del sustrato está ligada a la disponibilidad de residuos agrícolas presentes en una región.

Sin embargo, para utilizar los sustratos en el cultivo del hongo, es necesario proporcionarles un tratamiento previo, se puede aplicar calor para disminuir la flora microbiana nociva que se encuentra presente en ellos y así evitar que los microorganismos compitan por espacio y nutrientes con el micelio a cultivar. De esta manera, la pasteurización es un método cuyo propósito es preparar el substrato para un eficaz desarrollo del hongo al eliminar microorganismos patógenos y se puede aplicar de dos formas: pasteurización con vapor y pasteurización por inmersión en agua caliente (Chen *et al*., 2021; Gaitán-Hernández *et al*., 2006; Grassi & Restelli, 2019).

La pasteurización con vapor consiste en colocar el substrato en un área cerrada, puede ser un cuarto pequeño o un recipiente metálico, se aplica vapor generado por una caldera eléctrica, ya sea de diesel o gasolina, por medio de tubos de cobre o mangueras resistentes al calor. La temperatura debe alcanzar entre 70-80 °C, además, el substrato debe mantenerse de 2 a 4 h a esta temperatura. Esta técnica ha sido utilizada por diversos autores como Fernández *et al*. (2020), Filippi *et al*. (2019), Garzón-Gómez & Cuervo-Andrade (2008), entre otros.

Por otro lado, Chanchao *et al*. (2023) desinfectaron a una temperatura de 121 °C durante 30 min el aserrín y harina de arroz utilizados como sustrato para el cultivo de *Volvariella volvacea*. Así mismo, Ye *et al*. (2023), para las bolsas con carrizo (*Phragmites autrales)* utilizaron la misma temperatura (121 °C), no obstante, el tiempo fue de 2 h en la autoclave, para el cultivo de *P. ostreatus* y *P. eryngii* (Yin *et al*., 2025), utilizaron la misma temperatura al pasteurizar, sin embargo, el tiempo fue de 3 h con los sustratos de aserrín, paja de trigo y salvado de trigo para el cultivo de Shiitake, ostra y reishi.

La desinfección por inmersión en agua caliente consiste en sumergir el sustrato en agua (75-80 °C) durante 1 h. Autores como Cruz-Moreno (2019), Díaz Muñoz *et al*. (2019), Fernández-Uribe

Núm. 60: 355-366 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

(2014) y Romero-Arenas *et al*. (2018) por mencionar algunos, han utilizado esta técnica, la cual ha sido efectiva para la producción.
Otro método para desinfectar los sustratos fue el utilizado por Cruz *et al*. (2010) quienes sumergieron el sustrato en agua a temperatura ambiente durante un periodo de tiempo 24-30 h, en una solución de agua y CaO, para posteriormente escurrirlo durante 12 horas en época de verano y 24 horas en época de invierno. Lograron cosechas de entre 0.270 g a 1.59 kg de hongo fresco en sustratos de olote de maíz y pulpa de café, solos y combinados a distintas proporciones.
Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar dos métodos de desinfección de rastrojo de maíz y de paja de sorgo utilizados como sustratos para la producción de *Pleurotus ostreatus* de manera rústica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este experimento se realizó dentro de las instalaciones del Colegio de Postgraduados Campus Campeche ubicado en la Carretera Haltunchén – Edzná, km. 17.5 Sihochac, Champotón, Campeche, el cual se ubica entre los paralelos 17°49' y 20°51 N, 89°06' y 92° 27' O, en el municipio de Champotón en el Estado de Campeche. La fase de pasteurización de los sustratos se realizó en el campo experimental, la fase de siembra y producción se realizó en el laboratorio de Fitopatología del campus con una temperatura controlada de 23 °C.
El rastrojo de maíz y la paja de sorgo se obtuvieron mediante donación de algunos productores que se dedican a la producción de estos cultivos en la región, en cuanto al micelio con la cepa de *P. ostreatus* utilizado para la siembra fue adquirido de manera comercial.

Desinfección del sustrato
Se utilizaron dos tipos de residuos agrícolas: rastrojo de maíz (M) y paja de sorgo (S), los cuales se picaron con una picadora de forraje con criba de 5 cm, para posteriormente colocarlos en una arpilla para su desinfección, esto se realizó de manera rústica como se menciona a continuación.
Se utilizaron dos métodos de desinfección de los sustratos: 1) inmersión en agua caliente e 2) inmersión en agua a temperatura ambiente. En los tratamientos con aplicación térmica, se utilizaron dos recipientes de aluminio con una capacidad de 200 litros aproximadamente; los cuales se llenaron con agua potable hasta aproximadamente ¾ del recipiente y se colocaron en una fogata encendida con leña. Una vez que el agua alcanzó los 90 ºC (cuya temperatura fue medida con un termómetro de mercurio) a uno de los recipientes se le vertió 400 g de óxido de calcio (CaO) (evita que se modifique el pH) y 400 g de sulfato cálcico hidratado ($CaSO_4$ $2H_2O$) (evita que se pierdan los nutrientes), posteriormente el agua se agitó hasta homogeneizar los ingredientes añadidos; al segundo contenedor solo se añadió 400 ml de hipoclorito de sodio comercial (NaClO) al 10%, de igual manera se homogeneizó la mezcla (Gaitán-Hernández *et al*., 2006; Pineda-Insuati *et al*., 2016).
Para los tratamientos en inmersión en agua a temperatura ambiente, se utilizaron dos recipientes de plástico con capacidad de 200 litros aproximadamente, los cuales se llenaron con agua potable hasta ¾, a uno de los recipientes se le añadió la misma cantidad de NaClO y de $CaSO_4$ $2H_2O$ antes mencionado (400 g) y al segundo recipiente la misma cantidad de NaClO (400 ml). El agua de los recipientes fue agitada de manera manual para mezclar completamente los ingredientes añadidos, una vez mezclados todos los ingredientes dentro del recipiente, las arpillas se sumergieron y se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 24 h siguiendo la metodología realizada por Cruz *et al*. (2010).

Inoculación del sustrato
Una vez que los sustratos fueron desinfectados, para el caso de los tratamientos con aplicación térmica, se dejaron enfriar hasta alcanzar una temperatura de 30 ° C aproximadamente, según Gaitán-Hernández *et al*. (2006), y en el caso de los tratamientos de inmersión a temperatura ambiente, el sustrato solo se escurrió, para que ambos sustratos alcanzaran un porcentaje de humedad aproximada del 30%. Posteriormente se procedió a la siembra, para ello se colocaron 4 kg de sustrato en peso húmedo en bolsas de polietileno y se inoculó con 150 g de micelio de *P.*

ostreatus, se colocó una capa alterna al sustrato y el micelio hasta llegar a tres cuartas partes de la bolsa, con el propósito de una mejor invasión micelial (Flores-Montes de Oca, 2012; Gaitán-Hernández *et al*., 2006; Pineda-Insuati *et al*., 2016), al final, se selló con un amarre de la misma bolsa. Los tratamientos evaluados se enlistan en la Tabla 1:

Tabla 1. Tratamientos evaluados en la desinfección de los sustratos para la producción de *P. ostreatus*.
Table 1. Treatments evaluated in the disinfection of substrates for the production of *P. ostreatus*.

Clave	Descripción
T1M	Rastrojo de maíz + agua + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + aplicación térmica
T2M	Rastrojo de maíz+ agua + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) +sin aplicación térmica
T3M	Rastrojo de maíz + inmersión en agua con NaClO (400 ml) + aplicación térmica
T4M	Rastrojo de maíz + inmersión en agua con NaClO (400 ml) +sin aplicación térmica
T5S	Paja de sorgo + agua + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + aplicación térmica
T6S	Paja de sorgo +agua + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + sin aplicación térmica
T7S	Paja de sorgo + inmersión en agua con NaClO (400 ml) + aplicación térmica
T8S	Paja de sorgo + inmersión en agua con NaClO (400 ml) + sin aplicación térmica

Por cada tratamiento se hicieron cinco repeticiones, con un total de 40 unidades para todo el diseño experimental.

Fase de incubación

Las bolsas inoculadas fueron colocadas en un estante de metal, el cual se cubrió con una tela color negra para proporcionar oscuridad. Se mantuvo una temperatura ambiente de 26 °C en el área durante toda la fase de incubación y producción mediante un aire acondicionado. Una vez que las bolsas fueron invadidas completamente por el micelio, se les proporcionó iluminación, por lo que se retiró la tela negra que cubría el estante donde se depositaron las bolsas (Flores-Montes de Oca, 2012; Gaitán-Hernández *et al*., 2006; Pineda-Insuati *et al*., 2016).

Fase de fructificación

Durante esta fase se brindó iluminación y aireación a las bolsas para inducir a la emergencia de los primordios, para este caso se abrieron las ventanas del área. Una vez que los primordios emergieron, se realizó un corte a la bolsa en forma triangular para cada uno de ellos y así proporcionarles mejor aireación, se procuró no levantar el corte de la bolsa completamente; en casos donde los primordios estuvieron muy cerca uno del otro, se eligió sólo uno, de esta manera, para no competir por el espacio y nutrientes, lo que les ayudó a tener un mejor desarrollo (Flores-Montes de Oca, 2012; Gaitán-Hernández *et al*., 2006; Pineda-Insuati *et al*., 2016).

Cosecha

Una vez que los carpóforos alcanzaron su madurez, se procedió a la cosecha, esto ocurrió aproximadamente entre los cinco a los siete días a partir de la aparición de cada primordio. La cosecha se realizó cuidadosamente con la ayuda de una navaja para realizar el corte; realizar la cosecha de esta manera, ayuda a que broten primordios nuevamente en el mismo sitio, a diferencia de cuando se hace de forma manual (girando el pie del hongo con la mano), esto se comprobó al realizar el corte con una navaja y también de forma manual durante experimentos previos.

Las variables evaluadas fueron: % de contaminación de las bolsas por tratamiento (manejándose como el 100% = 5 repeticiones o bolsas), número de primordios (mediante el conteo de cada carpóforo), peso de los carpóforos (g) (con una báscula digital), diámetro del píleo (cm), la longitud y diámetro del estípite (cm) fueron medidos con un vernier digital, los datos fueron recopilados durante dos cosechas realizadas (Flores-Montes de Oca, 2012; Gaitán-Hernández *et al*., 2006; Pineda-Insuati *et al*., 2016).

Análisis de datos

Los datos fueron analizados mediante el paquete estadístico InfoStat/E. Se realizó análisis de varianza (ANOVA), posteriormente se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey

(P≤0.05) para determinar las diferencias entre los tratamientos evaluados, además se realizó la correlación de Spearman con el paquete estadístico Statística V. 7.0.

RESULTADOS

Eficiencia del tipo de esterilización de los sustratos

Se detectó que no existe correlación entre los métodos de desinfección del sustrato utilizado para cada tratamiento y las variables evaluadas, derivado de los resultados obtenidos con la prueba de Spearman (P≤0.05), no obstante, se encontró que los hongos con el mayor diámetro del píleo están correlacionados con la variable peso (rs=0.53), es decir, a mayor tamaño de los carpóforos, mayor es el peso de ellos. Así mismo, el peso se correlaciona con el número total de carpóforos cosechados (rs=0.58), la longitud y diámetro del estípite también poseen buena correlación con el tamaño del píleo (rs=0.59; rs=0.67). Por ende, a mayor diámetro y longitud del estípite, diámetro del sombrero y número total de carpóforos, mayor es el peso de éstos.

Así mismo, el mejor método para desinfectar los sustratos utilizados en este trabajo fue el de inmersión en agua caliente + CaO + $CaSO_4$ $2H_2O$, esto debido a que los tratamientos que incluían esta forma de desinfección no presentaron contaminación (T1M y T3M) y en algunos casos (T5S y T7S) presentaron menor porcentaje de contaminación del total de las bolsas por tratamiento. Por el contrario, todas las bolsas de los tratamientos T4M, T6S y T8S se contaminaron por otro tipo de hongos no comestibles, del género *Trichoderma* spp; a estos tratamientos no se les proporcionó aplicación térmica, por lo que las bolsas dañadas se desecharon completamente para evitar contaminación al resto de ellas. Sin embargo, de los tratamientos sin aplicación térmica, se encontró que el tratamiento T2M fue una excepción, debido a que el 57% de sus repeticiones no se contaminó y se lograron cosechar los cuerpos fructíferos (Figura 1).

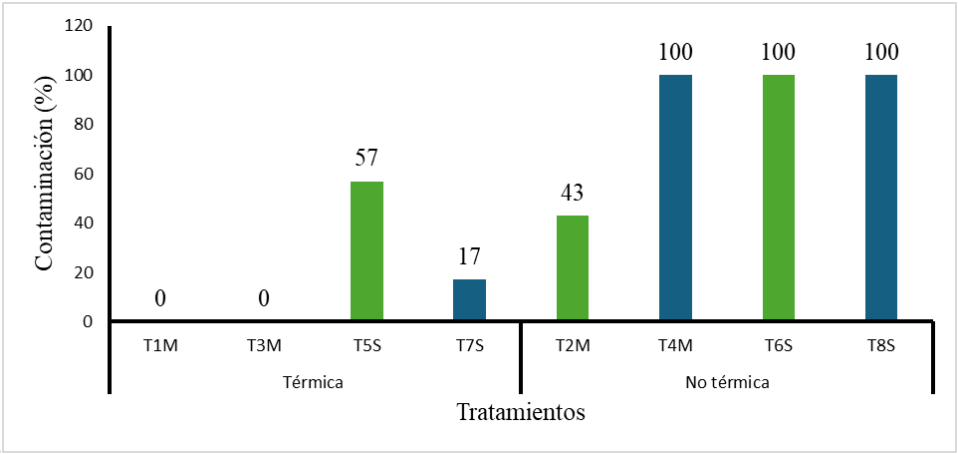


Figura 1. Bolsas de *P. ostreatus* contaminadas (%) en los diferentes tratamientos realizados. T1M: Rastrojo de maíz + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + aplicación térmica. T2M: Rastrojo de maíz + CaO (400 g) + CaSO4 2H2O (400 g) + sin aplicación térmica. T3M: Rastrojo de maíz + NaClO (400 ml) + aplicación térmica. T4M: Rastrojo de maíz + NaClO (400 ml) + sin aplicación térmica. T5S: Paja de sorgo + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + aplicación térmica. T6S: Paja de sorgo + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + sin aplicación térmica. T7S: Paja de sorgo + NaClO (400 ml) + aplicación térmica. T8S: Paja de sorgo + NaClO (400 ml) + sin aplicación térmica.

Figure 1. Bags of contaminated *P. ostreatus* (%) in the different treatments carried out. T1M: Corn stover + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + thermal application. T2M: Corn stover + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + without thermal application. T3M: Corn stover + NaClO (400 ml) + thermal application. T4M: Corn stover + NaClO (400 ml) + without thermal application. T5S: Sorghum straw + CaO (400 g) + $CaSO_4$ $2H_2O$ (400 g) + thermal application. T6S: Sorghum straw + CaO (400 g) + CaSO4 2H2O (400 g) + without thermal application. T7S: Sorghum straw + NaClO (400 ml) + thermal application. T8S: Sorghum straw + NaClO (400 ml) + no thermal application.

Núm. 60: 355-366 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Primordios obtenidos por tratamiento
Debido a la presencia de tratamientos completamente contaminados, los cuales se desecharon, sólo se logró la producción de carpóforos en los tratamientos T1M, T2M, T3M, T5S y T7S. Es importante destacar que los tratamientos con mayor cantidad de primordios fueron T3M y T1M, con 65 y 48 unidades, respectivamente, lo que resultó en un promedio de 8.13 y 6.7 primordios por tratamiento (Tabla 2). No obstante, no todos los primordios llegaron a desarrollarse, debido a que aquellos que se encontraban muy próximos entre sí fueron reducidos, eligiéndose sólo uno de ellos.

Peso (g) de los carpóforos
De acuerdo con los resultados de la comparación de medias de Tukey sobre la variable peso (g) de los carpóforos cosechados, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (P=0.22), no obstante, se obtuvo mayor peso en T7S y T3M con 87.33 y 85.25 g en promedio, respectivamente, a diferencia del tratamiento 5S con menor peso (35.17 g en promedio), es decir, en T7S y T3M se obtuvo más del doble que en el tratamiento 5S (Tabla 2).

Longitud de estípite de los carpóforos
Respecto a la variable longitud de estípite, no se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados (P=0.43). Sin embargo, el tratamiento T7S presentó el valor más alto, con un promedio de 3.94 cm, seguido de T2M, T5S, T3M y T1M, con 3.82, 3.37, 3.36 y 3.19 cm, respectivamente (Tabla 2).

Diámetro del píleo de los carpóforos
Por otro lado, no se observaron diferencias significativas en el diámetro del píleo entre los tratamientos (P>0.52) (Tabla 2). El diámetro mínimo registrado fue de 2.4 cm y el máximo de 14.19 cm, con promedios de 10.61 cm en T3M, 7.83 cm en T2M, 6.94 cm en T5S, 6.84 cm en T7S y 6.43 cm en T1M.

Diámetro del estípite
En cuanto al diámetro del estípite de los carpóforos, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (P>0.97). Sin embargo, el tratamiento T7S presentó el mayor diámetro del estípite, con un promedio de 1 cm, mientras que el tratamiento T2M tuvo el diámetro más pequeño, con un promedio de 0.81 cm (Tabla 2).

Total de carpóforos obtenidos de las dos cosechas realizadas
Respecto al número de carpóforos obtenidos por tratamiento, la comparación de medias de Tukey no reveló diferencias significativas entre ellos (P=0.15). No obstante, el mayor número de carpóforos se observó en T7S, con un promedio de 23.4, seguido de T3M y T1M en segundo y tercer lugar, con 18.64 y 15.09, respectivamente. En cuarto y quinto lugar se ubicaron T2M, con un promedio de 14.39, y T5S, con 13.37 carpóforos (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de medias de Tukey sobre las variables evaluadas.
Table 2. Comparison of Tukey means on the variables evaluated.

Tratamientos	Diámetro del estípite (cm)	Peso de las setas (g)	Longitud del estípite (cm)	Diámetro del sombrero (cm)	Número de primordios emergidos	Número total de hongos
T1M	0.94±0.90[a]	51.62±84.94[a]	3.19±1.50[a]	6.14±1.50[a]	6.67±11.40[a]	15.09±13.60[a]
T2M	0.81±0.90[a]	41.9±84.94[a]	3.82±1.50[a]	3.82±1.50[a]	3.40±11.40 [a]	14.39±13.60[a]
T3M	0.88±0.90[a]	85.25±84.94[a]	3.36±1.50[a]	3.36±1.50[a]	8.13±11.40 [a]	18.64±13.60[a]
T5S	0.94±0.90[a]	35.17±84.94[a]	3.37±1.50[a]	3.37±1.50[a]	2±11.40 [a]	12.37±13.60[a]
T7S	1±0.90[a]	87.33±84.94[a]	3.94±1.50[a]	3.94±1.50[a]	2.83±11.40 [a]	23.4±13.60[a]

Núm. 60: 355-366 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

DISCUSIÓN

Respecto a la desinfección de los sustratos, se observó que el método por inmersión en agua caliente es el más viable para evitar la contaminación en la producción de *P. ostreatus* (Cruz-Moreno, 2019; Díaz-Muñoz *et al*., 2019; Fernández-Uribe, 2014; Guzmán-Mejía *et al*., 2019 y Romero-Arenas *et al*., 2018).

Con este método se reduce la producción de hasta un 20% comparado con otros métodos como la utilización de vapor, uso de químicos e incluso cuando no se proporciona ningún tratamiento al sustrato (Jaramillo y Albertó, 2013).

La importancia de realizar una buena desinfección de los sustratos radica también en la presencia de azúcares solubles que no se eliminan por lixiviación en ellos, lo que provoca un incremento importante en la temperatura dentro de él durante la fase de incubación, factor que contribuye a un rápido desarrollo de hongos y mohos antagonistas para *Pleurotus* spp, principalmente *Mucor, Trichoderma* y *Trichurus*. Para ello, es necesario remojar la paja por periodos de 60 h, para inducir a un lixiviado de la mayoría de los componentes solubles, azúcares entre ellos (Sánchez-Vázquez *et al*., 2007).

El número de primordios obtenidos en el presente trabajo es menor al obtenido por Michel-Aceves *et al*. (2015) con un promedio de 17.2 primordios, también con paja de sorgo como sustrato; aunque estos autores añadieron algunos compuestos químicos y biológicos (Agromil plus, sulfato de cobre, extracto de primordios de las variedades BCL, BGAT y BSMA, metabolitos de Trichoderma y pasta de sorgo, ajenos a la presente investigación) para favorecer el desarrollo de *P. ostreatus*. Así mismo, Acevedo-Cárdenas (2017) obtuvieron 94.80 primordios en promedio, sólo en la primera cosecha. Sin embargo, ellos utilizaron mezclas de diversos sustratos entre ellos 57% rastrojo de maíz, 30% de aserrín, 10% de residuos de pan, 1% de calcio y 2% de azúcar; colocaron 3 kg de sustrato por cada bolsa y realizaron 10 réplicas por cada tratamiento evaluado. Los resultados de estas investigaciones proporcionan información importante sobre usar aditivos nutrimentales que pueden ayudar al crecimiento y desarrollo de carpóforos en la producción *P. ostreatus*.

Respecto al peso de los carpóforos obtenido en esta investigación, es bajo comparado con lo reportado por Caicedo Ruiz *et al*. (2024), quienes obtuvieron 154 y 153.4 g en la primera y segunda cosecha en cultivo de *P. pulmonarius* sobre cáscara de cacahuate como sustrato. Por su parte, Acevedo-Cárdenas (2017) cosecharon 269.50 gramos en promedio, utilizando mezclas de sustratos y otros aditivos nutrimentales, los cuales no fueron considerados en esta investigación. Cuando se compara la producción de carpóforos en esta investigación, con otras donde utilizan otros sustratos, la cantidad obtenida en este trabajo es menor, ejemplo de ello es lo que reportan Morán-Arellanos *et al.* (2020) al haber obtenido 187.37 g en promedio en rastrojo de frijol, 93.75 g en cascarilla de Huaxin y 178 g en paja de trigo, no obstante, se observó que el rastrojo de maíz y el rastrojo de sorgo es más productivo que el rastrojo de pulpa de calabaza con 35 g y en fruto de pixoi sólo con 10 g, sólo con cuatro repeticiones por tratamiento, además de haber colocado 200 g de sustrato en peso seco por cada bolsa.

Por otro lado, Roblero-Mejía *et al*. (2021) señalaron haber obtenido un mínimo de 64.9 g y un máximo de 147.8 g de peso promedio de hongos cosechados por bolsa, en cuyos tratamientos utilizaron como sustratos al olote de maíz, pasto pangola y pulpa de café, todos ellos mezclados en diferentes proporciones y de manera individual. Asimismo, el peso promedio obtenido por Fufa *et al*. (2021) fue de los 101.11 a 253.07 g con rastrojo de olote de maíz, paja de mijo africano (*Eleusina coracana*) y residuos de bambú, solos y en combinación, en bolsas con 500 g de sustrato. La explicación puede deberse a que el rastrojo de maíz contiene alto contenido de celulosa y hemicelulosa (40-25 y 17%, respectivamente) (Fuentes *et al*., 2001).

La longitud del estípite de los carpóforos obtenida es similar a los valores reportados por Dedousi *et al*. (2024), los cuales se encontraron entre un rango de 3.18 a 3.91 cm en promedio, al utilizar paja de trigo, paja de cebada y avena, combinados con sustrato reutilizado del cultivo de *P. ostreatus* junto con residuos de setas (estípites/setas deformes), en bolsas con 1 kg de sustrato y cinco repeticiones por tratamiento. Por su parte, Melanouri *et al*. (2022) obtuvieron entre 2.1 a 3.7 cm en promedio de longitud para la cepa 144 de *P. ostreatus* y entre 2.7 a 3.3 cm para la cepa 150, con los mismos sustratos que evaluaron Dedousi *et al*. (2024) pero en esta ocasión cada

Núm. 60: 355-366 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

sustrato por separado. A su vez, Subedi *et al*. (2023) señalaron entre 3.05 a 3.44 cm de la longitud de estípite en producción de *P. ostreatus* utilizando paja de arroz, y jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) como sustratos, combinados y en distintas proporciones. Caicedo Ruiz *et al*. (2024) mencionan que la longitud del estípite se encuentra relacionada con la concentración de nitrógeno y proteínas contenidas en el sustrato.

Los datos sobre el diámetro del píleo de los carpóforos obtenidos en el presente trabajo son más elevados de acuerdo con López-Rodríguez *et al*. (2008), al obtener promedios para el diámetro del píleo de 5.77 cm en sustrato de aserrín; 5.53 cm con olote de maíz; 5.47 cm con cáscara de arveja y 5.81 cm con capacho de uchuva (*Physalis peruviana*). Por su parte, Fufa *et al*. (2021) obtuvieron entre 2.95 a 4.58 cm en promedio del diámetro de píleo de los cuerpos fructíferos, al utilizar el olote de maíz, paja de mijo africano (*Eleusine coracana*) y residuos de bambú, solos y combinados como sustratos.

Así mismo, Romero *et al*. (2010) registraron de entre 4.7 a 8.5 cm para el diámetro del píleo de setas crecidas con residuos de plátano y de 5.1 a 10.2 cm en paja de trigo. Por su parte, Dedousi *et al*. (2024) reportaron de entre 3.55 a 5.89 cm de diámetro en sustrato de paja de trigo, paja de cebada y avena, combinados con sustrato gastado del cultivo de *P. ostreatus* junto con residuos de setas (estípites/setas deformes). No obstante, se han reportado resultados más bajos, siendo de entre 4.63 a 5.21 cm de diámetro al utilizar como sustratos a la paja de arroz y jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) (Subedi *et al*., 2023).

El diámetro del estípite es similar al obtenido por Dedousi *et al*. (2024) entre 0.80 a 1.16 cm en promedio, producidos con sustratos de paja de trigo, paja de cebada y avena, residuo de café, combinados con sustrato reciclado del cultivo de *P. ostreatus* junto con residuos de setas (estípites/setas deformes). Esta medida está relacionada con la concentración de nitrógeno que contenga el sustrato (Caicedo Ruiz *et al*., 2024). Por lo que se infiere que los sustratos utilizados pudieran tener una baja concentración de nitrógeno.

Finalmente, el valor total de carpóforos cosechados es similar al valor obtenido por Dedousi *et al*. (2024) de 17-32 carpóforos en promedio con los sustratos evaluados en *P. ostreatus*. Así mismo, Subedi *et al*. (2023) obtuvieron entre 16.50-34.50 carpóforos en promedio, en sustratos de paja de arroz y jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) en distintas combinaciones. El rastrojo de maíz es ampliamente recomendable para la producción de *P. ostreatus* debido a que contiene grandes cantidades de celulosa, proteína en un 4.90%, Fibra en un 72.45%, entre otros (*Fuentes et al., 2001*).

CONCLUSIÓN

Se demostró que el mejor método para desinfectar el sustrato para la producción de *P. ostreatus* es el de inmersión en agua proporcionando aplicación térmica, además de la adición de CaO y $CaSO_4$ $2H_2O$ para evitar la modificación del pH y la pérdida de los nutrientes del sustrato. De esta manera se asegura mayor inocuidad y menos probabilidad de contaminación.

Se recomienda utilizar tanto a la paja de sorgo como al rastrojo de maíz para la producción de *P. ostreatus*, debido a que con el primero se obtuvo mayor producción de carpóforos (23.4), mayor peso en promedio (87.33 g) y mayor longitud del estípite (3.94 cm). Así mismo, el mayor diámetro de los carpóforos se obtuvo con el sustrato rastrojo de maíz (6.14 cm) a diferencia de T7S con 3.94 cm en promedio.

Así mismo, al producir *P. ostreatus* de manera rústica y a pequeña escala, se pueden utilizar como sustratos residuos agrícolas disponibles y desinfectarse a través de inmersión con agua y NaClO (opción 1) o bien añadir CaO y $CaSO_4$ $2H_2O$ (opción 2) más aplicación térmica.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada a la primera autora durante el postgrado. Al proyecto 7108 Rescate de saberes agrícolas en los agroecosistemas para el diseño de estrategias sostenibles y contribuir a la soberanía alimentaria, en Campeche. Al Colegio de Postgraduados Campus Campeche.

LITERATURA CITADA

Acevedo-Cárdenas, C. (2017). Valoración y crecimiento del cultivo de *Pleurotus ostreatus* en cuatro sustratos generados a partir de procesos productivos agropecuarios, en el municipio de Málaga Santander. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, *4*. https://doi.org/10.23850/24220582.857

Briceño-P. Erika., y Morales R. (2019). Producción de hongos comestibles: una alternativa novedosa de negocio para el agro en el sur de Chile. Universidad Austral de Chile. *Campo y tecnología, 14, 14-16. En* https://hdl.handle.net/20.500.14001/38922

Caicedo Ruiz, W., Cuadrado Cano, B., & Infante Jiménez, C. (2024). Apreciación de residuos orgánicos agrícolas como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus pulmonarius*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *26*(1), 81–90. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v26n1.111029

Chanchao, C., Phoura, Y., Sreyneang, N., Lita, C., Eneang, O., Norong, U. O., & Chansorphea, S. (2023). Recycling of spent Oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) sawdust waste for the production of Straw mushroom (*Volvariella volvacea*). *Insight: Cambodia Journal of Basic and Applied Research*, *5*(01), 8–16. https://doi.org/10.61945/cjbar.2023.5.1.1

Chen, F., Grimm, A., Eilertsen, L., Martín, C., Arshadi, M., & Xiong, S. (2021). Integrated production of edible mushroom (*Auricularia auricular-judae*), fermentable sugar and solid biofuel. *Renewable Energy*, *170*, 172–180. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.124

Cruz, D., López De León, E., Pascual, L. F., & Battaglia, M. (2010). Guía técnica de producción de hongos comestibles de la especie *Pleurotus ostreatus*. In *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 104(4). https://doi.org/10.12895/jaeid.20103/4.16

Cruz-Moreno, B. A. (2019). *Cultivo de hongos comestibles Pleurotus djamor y Pleurotus ostreatus utilizando residuos de Agave tequilana*. Universid ad Autónoma de Querétaro. 100 p.

Dedousi, M., Melanouri, E. M., Karayannis, D., Kaminarides, E. I., & Diamantopoulou, P. (2024). Utilization of spent substrates and waste products of mushroom cultivation to produce new crops of *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus eryngii* and *Agaricus bisporus*. *Carbon Resources Conversion*, *7*(2). https://doi.org/10.1016/j.crcon.2023.08.001

Díaz Muñoz, K., Guajardo, M. C., Alberto, C., Torres, L., Luis, &, Gil Ramírez, A., Betzabet, C., Vásquez, B., & Cabos Sánchez, J. (2019). Production of *Pleurotus ostreatus* (Pleurotaceae) ICFC 153/99 grown on different waste lignocellulosic. *Arnaldoa*, *26*(3), 1177–1184. https://doi.org/10.22497/arnaldoa.263.26322

FAOSTAT (Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2023). *Cultivos y productos de ganadería*. https://www.fao.org/faostat/es/#data

Fernández, N., Gaggino, R., Positieri, M. J., & Kreiker, J. (2020). Materiales biopoliméricos desarrollados a partir de micelio y residuos lignocelulósicos. Estado de la técnica actual y perspectivas de aplicación en el campo del hábitat. *AJEA*, *5*. https://doi.org/10.33414/ajea.5.774.2020

Fernández-Uribe, Y. del S. (2014). *Cultivo de orellanas (Pleurotus ostreatus) en cinco sustratos generados en los procesos productivos agropecuarios, en dos épocas de siembra, en el municipio de Ituango*. 92 p.

Filippi, M. V., Cayolo, F., Maldonado, J. F., Martínez, D. A., & Belén Buglione, M. (2019). *Control de contaminantes durante el proceso de producción de hongos comestibles*. 9 p.

Flores-Montes de Oca, A. (2012). *Índice manual de cultivo de hongo seta Pleurotus ostreatus de forma artesanal*. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 36 p.

Fuentes, J., Magaña, C., Suárez, L., Peña, R., Rodríguez, S., Ortíz de la Rosa, B. (2001). Análisis químico y digestibilidad *in vitro* de rastrojo de maíz (*Zea mays* I.) *Agronomía Mesoamericana*, 12 (2), 189-192.

Fufa, B. K., Tadesse, B. A., & Tulu, M. M. (2021). Cultivation of *Pleurotus ostreatus* on Agricultural Wastes and Their Combination. *International Journal of Agronomy*, *2021*. https://doi.org/10.1155/2021/1465597

Gaitán-Hernández, R., Salmones, R., Perez-Merlo, R., & Mata, G. (2006). *Manual práctico del cultivo de setas: Aislamiento, siembra y producción*.

Garzón-Gómez, J. P., & Cuervo-Andrade, J. L. (2008). Producción de *Pleurotus ostreatus* sobre residuos sólidos lignocelulósicos de diferente procedencia. In *Julio-Diciembre*, *6* (10).

Grassi, E., & Restelli, M. F. (2019). *Guía para la producción de hongos comestibles*. https://www.researchgate.net/publication/338655295

Guzmán-Mejía, D. M., Herrera-Ardón, J. A., Fuentes-Paz, E. S., & Hernández-Archila, A. V. C. (2019). *Evaluación del crecimiento y producción del hongo ostra Pleurotus ostreatus bajo condiciones artesanales utilizando restos de cosecha en el municipio de Camotán, Chiquimula, Guatemala*. 24–40. https://www.researchgate.net/publication/335833822

Jaramillo, M., S., & Albertó, E. (2013). Heat treatment of wheat Straw by immersion in hot water decreases mushroom yield in *Pleurotus ostreatus*. Revista Iberoamericana de Micología, 30(2), 125-129. https://doi.org/10.1016/j.riam.2012.11.004

López-Rodríguez, C., Hernández-Corredor, R., Suárez-Franco, C., & Borrero, M. (2008). Evaluación del crecimiento y producción de *Pleurotus ostreatus* sobre diferentes residuos agroindustriales del departamento de Cundinamarca. In *Universitas Scientiarum* (Vol. 13). www.javeriana.edu.co/universitas_scientiarum

Melanouri, E. M., Dedousi, M., & Diamantopoulou, P. (2022). Cultivating *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus eryngii* mushroom strains on agro-industrial residues in solid-state fermentation. Part II: Effect on productivity and quality of carposomes. *Carbon Resources Conversion*, *5*(1), 52–60. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.12.005

Michel-Aceves, A. C., Ariza-Flores, R., Otero-Sánchez, A., & Barrios-Ayala, A. (2015). *Chemical and biological products as supplements that increase the production of Mushroom oyster Pleurotus ostreatus. Interciencia,* 40(8), 542-548.

Morán-Arellanos, T., Bautista-Ortega, J., Sobal-Cruz, M., Rosales-Martínez, V., Candelaria-Martínez, B., & Huicab-Pech, Z. G. (2020). Potencial biotecnológico de residuos vegetales para producir *Pleurotus ostreatus* en zonas rurales de Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *11*(3), 685–693.

Piña-Guzmán, A. B., Nieto-Monteros, D. A., & Robles-Martínez, F. (2016). Utilization of agricultural and agroindustrial residues in the cultivation and production of edible mushrooms (*Pleurotus* spp.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, *32* (Especial Residuos Sólidos), 141–151. https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.10

Pineda-Insuati, J., Duarte-Trujillo, A., & Ponce-Vásquez, C. (2016). *Champiñón ostra: guía de producción artesanal / Pleurotus ostreatus: guide for homemade production*. https://www.researchgate.net/publication/307858229

Roblero-Mejía, D. O., Aguilar-Marcelino, L., & Sánchez, J. E. (2021). Efecto de la variación del sustrato en la productividad de dos cepas de *Pleurotus* spp. *Scientia Fungorum*, *52*, e1377. https://doi.org/10.33885/sf.2021.52.1377

Romero, O., Huerta, M., Damián, M. A., Macias, A., Tapia, A. M., Parraguirre, J. F. C., & Juárez, J. (2010). Evaluación de la capacidad productiva de *Pleurotus ostreatus* utilizando hoja de plátano deshidratada (*Musa paradisiaca* L.), en relación con otros sustratos agrícolas. *Agronomía Costarricense*, *34*(1), 53–63. www.cia.ucr.ac.cr

Romero-Arenas, O., Ángeles Valencia-De Ita, M., Rivera-Tapia, J. A., Tello-Salgado, I., Villarreal Espino-Barros, O. A., & Ángel Damián-Huato, M. (2018). Capacidad productiva de *Pleurotus ostreatus* utilizando alfalfa deshidratada como suplemento en diferentes sustratos agrícolas. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15 (2), 145-160.

Sánchez-Vázquez, J. E., Martínez-Carrera, D., Mata, G., & Leal-Lara, H. (2007). *El cultivo de setas Pleurotus* spp *en México* (1a. Edición, Vol. 1).

Subedi, S., Kunwar, N., Ray-Pandey, K., & Raj-Jhosi, Y. (2023). Performance of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) on paddy straw, water hyacinth and their combinations. *Heliyon*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19051

Recibido:
10/septiembre/2024

Aceptado:
4/junio/2025

Ye, D., Hu, Q., Bai, X., Zhang, W., & Guo, H. (2023). Increasing the value of Phragmites australis straw in a sustainable integrated agriculture model (SIAM) comprising edible mushroom cultivation and spent mushroom substrate compost. *Science of the Total Environment*, *869*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161807

Yin, Y., Chen, B., Xu, S., Zuo, J., Xu, Y., Xiong, S., & Chen, F. (2025). Investigation of crop straw for edible and medicinal fungi cultivation: Assessment of lignocellulose preprocessing and spent substrate biofuel properties. *Industrial Crops and Products*, *223*. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120004

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

CONSERVACIÓN GENÓMICA DE DOS ESPECIES DEL ORDEN ASPARAGALES CON CARIOTIPO BIMODAL, EMPLEANDO HIBRIDACIÓN GENÓMICA *in situ* (GISH)

GENOMIC CONSERVATION OF TWO SPECIES OF THE ORDER ASPARAGALES WITH BIMODAL KARYOTYPE, USING GENOMIC *in situ* HYBRIDIZATION (GISH)

García Castillo, M.J., L.C. Rodríguez Zapata, L.F. Sánchez Teyer

CONSERVACIÓN GENÓMICA DE DOS ESPECIES DEL ORDEN ASPARAGALES CON CARIOTIPO BIMODAL, EMPLEANDO HIBRIDACIÓN GENÓMICA *in situ* (GISH)
GENOMIC CONSERVATION OF TWO SPECIES OF THE ORDER ASPARAGALES WITH BIMODAL KARYOTYPE, USING GENOMIC *in situ* HYBRIDIZATION (GISH)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 367-379 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.22

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 367-379 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Conservación genómica de dos especies del orden Asparagales con cariotipo bimodal, empleando hibridación genómica *in situ* (GISH)

Genomic conservation of two species of the order Asparagales with bimodal karyotype, using genomic *in situ* hybridization (GISH)

María José García Castillo https://orcid.org/MJGC: 0000-0001-7595-7809
Luis Carlos Rodríguez Zapata https://orcid.org/LCRZ:0000-0002-4872-8231
Lorenzo Felipe Sánchez Teyer / santey@cicy.mx
https://orcid.org/LFST: 0000-0002-1714-0240
Unidad de Biotecnología. Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130, Colonia Chuburná de Hidalgo, CP. 97200, Mérida, Yucatán, México

García Castillo, M.J., L.C. Rodríguez Zapata, L.F. Sánchez Teyer

CONSERVACIÓN GENÓMICA DE DOS ESPECIES DEL ORDEN ASPARAGALES CON CARIOTIPO BIMODAL, EMPLEANDO HIBRIDACIÓN GENÓMICA *in situ* (GISH)

GENOMIC CONSERVATION OF TWO SPECIES OF THE ORDER ASPARAGALES WITH BIMODAL KARYOTYPE, USING GENOMIC *in situ* HYBRIDIZATION (GISH)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 367-379. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.22

RESUMEN: El orden Asparagales, una de las principales subdivisiones de las monocotiledóneas, comprende 14 familias y más de 36,000 especies, destacando por su alta tasa de diversificación. Dentro de este orden, se observa una amplia variabilidad en el tamaño del genoma y en el cariotipo, con algunos géneros mostrando un cariotipo bimodal. El género *Aloe*, perteneciente a la familia Asphodelaceae, es notable por su diversidad y aunque la mayoría son diploides, se han identificado también especies tetraploides y hexaploides. A pesar de esta variabilidad en el número de cromosomas, el cariotipo bimodal de *Aloe* se mantiene relativamente estable, con diferencias en el contenido de ADN entre especies. En contraste, el género *Agave* de la familia Asparagaceae, presenta un cariotipo bimodal conservado con 30 cromosomas en el genoma haploide, que incluye 5 cromosomas grandes y 25 pequeños. Las especies de *Agave* muestran variaciones naturales en ploidía, pero el patrón básico del cariotipo se conserva. La filogenia basada en genomas completos sugiere que *Agave* está estrechamente relacionado con otros géneros como *Manfreda* y *Polianthes*. La investigación sobre la hibridación *in situ* y la técnica GISH ha permitido identificar y analizar reordenamientos genómicos y componentes de cariotipos en diversas especies. En este contexto, se ha llevado a cabo un estudio para hibridar el genoma de *Aloe vera* en núcleos en interfase y células en metafase de *Agave* híbrido H11648 para evaluar cómo un género evolutivamente distanciado se integra en el genoma del *Agave*, buscando entender mejor las dinámicas de cariotipo en estas plantas. Nuestros resultados mostraron conservación de regiones genómicas de *Aloe* en *Agave* al observarse hibridación genómica en todos los cromosomas y en núcleos en interfase de *Agave* hibrido H11648. Estos datos fuertemente sugieren que el cariotipo bimodal de agaves no fue adquirido por la fusión de genomas con diferentes tamaños de cromosomas, sino más bien por rearreglos, fusiones y fisiones durante el período de evolución del género.
Palabras clave: *Agave*, *Aloe*, GISH, Cariotipo bimodal.

ABSTRACT**:** The Asparagales order, one of the main subdivisions of the monocots, comprises 14 families and more than 36,000 species, notable for its high rate of diversification. Within this order, a wide variability *in* genome size and karyotype is observed, with some genera showing a bimodal karyotype. The genus *Aloe*, belonging to the family Asphodelaceae, is notable for its diversity and although most are diploid, tetraploid and hexaploid species have also been identified. Despite this variability in chromosome number, Aloe's bimodal karyotype remains relatively stable, with differences in DNA content between species. In contrast, the *Agave* genus of the Asparagaceae family, presents a conserved bimodal karyotype with 30 chromosomes in the haploid genome, which includes 5 large chromosomes and 25 small chromosomes. *Agave* species show natural variations in ploidy, but the basic karyotype pattern is

preserved. Phylogeny based on whole genomes suggests that *Agave* is closely related to other genera such as *Manfreda* and *Polianthes*. Research on *in situ* hybridization and the GISH technique has made it possible to identify and analyze genomic rearrangements and karyotype components in various species. In this context, a study has been carried out to hybridize the genome of *Aloe vera* in interphase nuclei and metaphase cells of hybrid *Agave* H11648 to evaluate how an evolutionarily distanced genus integrates into the *Agave* genome, seeking to better understand the karyotype dynamics in these plants. Our results showed preservation of genomic regions of *Aloe* in *Agave* by observing genomic hybridization in all chromosomes and in interface nuclei in hybrid *Agave* H11648. These data strongly suggest that the bimodal karyotype of agaves was not acquired by the fusion of genomes with different chromosome sizes, but rather by rearrangements, fusions, and fissions during the period of evolution of the genus.
Key words: *Agave*, *Aloe*, GISH, Bimodal Karyotype

INTRODUCCIÓN

El orden Asparagales, dentro de las monocotiledoneas, incluye 14 familias (Amaryllidaceae, Asparagaceae, Asphodelaceae, Asteliaceae, Blandfordiaceae, Boryaceae, Doryanthaceae, Hypoxidaceae, Iridaceae, Ixioliriaceae, Lanariaceae, Orchidaceae, Tecophilaeaceae y Xeronemataceae), 1122 géneros y más de 36,000 especies (APG). Este orden representa la mayor tasa de diversificación de las monocotiledóneas (Magallón and Castillo 2009), con una edad estimada del grupo corona de aproximadamente 125.3 millones de años (Tank *et al.*, 2015) y una gran diversidad en tamaños de genoma desde 0,3 -82,2 pg (Leitch and Leitch 2013). En este orden existen reportes de diversos géneros que presentan un cariotipo bimodal como *Aloe*, *Agave*, *Camasia*, *Yucca*, *Chologalum*, *Hastingsiana*, *Hesperocallis*, entre otros (Halpin and Fishbein 2013; Robert *et al*., 2008; McKain *et al.*, 2016).

Aloe L. pertenece a la familia Asphodelaceae que contiene alrededor de 940 especies y una edad aproximada de 45 a 63 millones de años. *Aloe* L. es conocida como una Lili del desierto, con gran aplicación como planta medicinal (Carter and Royal Botanic Gardens 1994), de la cual se conocen alrededor de 500 especies distribuidas alrededor del mundo, principalmente en zonas tropicales (Carter and Royal Botanic Gardens 1994; Gunjan and Roy 2010). El género presenta una gran diversidad en tamaño y morfología desde árboles que crecen 15 m de altura hasta pequeñas plantas con una roseta de 30 mm y aunque en su mayoría son diploides (2n=14), se han identificado algunas especies tetraploides y una especie hexaploide (Brandham and Doherty 1998).

Las especies analizadas del género *Aloe* L. en general muestran una estabilidad en el cariotipo bimodal con una estructura básica haploide de un cromosoma grande, submetacéntrico (un brazo del cromosoma es ligeramente mayor que otro), tres cromosomas grandes acrocéntricos (se refiere a cromosomas con el centrómero cercano a un extremo) y tres cromosomas pequeños acrocéntricos (Brandham and Doherty 1998), sin embargo existen reportes de asimetría cariotípica en algunas especies del género (Gunjan and Roy 2010). En contraste con la uniformidad de la estructura básica cromosómica, este género presenta una gran variación en el contenido de ADN 1C desde 10.5 pg en *A. tenuori* hasta 23.9 pg en *A. peckii*, (Brandham and Doherty 1998).

Al evaluar la distribución de la posición de los loci 5S y 45S en 13 especies de *Aloe*, se evidenció una conservación en localización intersticial en cromosomas grandes para 5S, en comparación con diferencias en el número, localización y tamaño de loci encontrado entre las especies analizadas en 45S (Adams *et al.*, 2000) posiblemente originados durante la especiación de *Aloe*.

Por su parte, los agaves, pertenece a la familia Asparagaceae que incluye aproximadamente 2900 especies distribuidas alrededor del mundo y se estima que la divergencia del grupo corona comenzó hace unos 89 millones de años (Eguiarte 1994).

El género *Agave* L. es un género joven dentro de Asparagales con una edad estimada entre 7.8 y 10.1 millones que incluye más de 290 especies Good-Avila *et al.* (2006), todas ellas con cariotipo bimodal conservado de 30 cromosomas en genoma haploide que consiste en 5 cromosomas grandes y 25 cromosomas pequeños. En este género se aprecia una serie de ploidías naturales desde diploides hasta octoploides, con una conservación en los sitios y distribución de las

regiones 5S y 45S, independientemente del nivel de ploidía y un incremento proporcional del contenido de ADN con relación al nivel de ploidía (Robert *et al.*, 2008).

El *Agave* híbrido H11648 fue desarrollado en Tanzania a principios del siglo pasado, originado de la cruza de las especies *A. angustifolia* x *A. amaniensis* y retrocruzado con *A. amaniensis*. Es un híbrido con gran capacidad para generar fibra larga con un alto rendimiento, por lo que ha sido la base productiva de fibra natural en Tanzania y el único híbrido comercial de agaves.

El clado agavoide descrito por Bogler and Simpson (1996) incluye 15 géneros y 10 de ellos presentan un cariotipo bimodal constante de 5 cromosomas grandes y 25 cromosomas pequeños mientras que los 5 géneros restantes muestran números variables de cromosomas grandes y pequeños. A este grupo se le denominó como ABK (Agavoid Bimodal Karyotype), por sus siglas en inglés (McKain *et al.*, 2012).

En diversas referencias se propone la hipótesis de que el cariotipo bimodal en *Agave* se establece como la integración de dos genomas ancestrales, con diversos eventos posteriores de rearreglos internos, duplicaciones, poliploidía y diversos cambios evolutivos (Ramos *et al.*, 2023; McKain *et al.*, 2012). Por su parte, la filogenia basada en genomas completos de cloroplasto agrupa a los géneros *Agave*, *Manfreda*, *Polianthes* y *Bescornia*, dentro del clado ABK de cloroplasto, sugiriendo diversidad evolutiva con relación a otros géneros de cariotipo bimodal (McKain e*t al.*, 2016).

La hibridación *in situ* (ISH) ha sido una herramienta clave para identificar rearreglos, inserciones, patrones de distribución y numero de sitios de hibridación, así como componentes parentales de cariotipos en diversas especies como fresa, trigo, cebada, algodón, entre otros (Humphreys *et al.*, 1995; Rey *et al.*, 2018; Yu-xiang *et al.*, 2013). En particular, la hibridación genómica *in situ* (GISH) se ha empleado ampliamente para la identificación de componentes genómicos tanto en híbridos como en alopoliploides como *Nicotiana tabacum* (Shibata *et al.*, 2013).

Derivado de lo anterior, en esta investigación hibridamos el genoma de *Aloe vera* en las células en interfase y cromosomas en metafase de *Agave* híbrido H11648 con el objetivo de determinar la representatividad de *Aloe vera*, especie con cariotipo bimodal y alejada evolutivamente por varios millones de años, en el genoma del *Agave*, empleando GISH.

MÉTODOS

Preparación de células en interfase

La colecta de raíces se realizó de plantas de *A.* híbrido H11648 mantenidas en maceta. Los cromosomas en metafase se obtuvieron a partir de ápices de la raíz incubados en una solución saturada de paradiclorobenceno (PDB) durante 3 horas a temperatura ambiente y posteriormente fijadas en una solución de alcohol absoluto y ácido acético glacial (3:1) durante 24 horas.

Las puntas de raíz fueron incubadas con viscozyma (SIGMA cat. V2010) a 37°C por 25 minutos y posteriormente, se realizaron dos lavados con agua. Bajo estereoscopio se retiró la cofia de la raíz y se preparó una suspensión celular con ácido acético al 60% y se colocaron 10 ml de la suspensión celular en el portaobjetos y se colocó un cubreobjetos para realizar la homogenización mediante “squash”. El análisis de preparaciones se realizó en un microscopio de contraste de fases. A las preparaciones que presentaban cromosomas en metafase y núcleos en interfase, se les retiró el cubreobjetos para su uso en la técnica de GISH.

Marcaje de la sonda

Por su parte el marcaje de ADN genómico de *Aloe* se realizó por Nick Translation para la incorporación de DIG-11dUTP empleando el kit para marcaje con digoxigenina 'DIG DNA Labeling Kit', (RocheTM). La incorporación se verificó mediante dot-blot de acuerdo con lo reportado por Robert *et al.*, (2008).

GISH de ADN genómico de Aloe

Las preparaciones seleccionadas que contenían núcleos en interfase y cromosomas en metafase de *Agave* híbrido fueron tratadas con 100 µg/ml de RNasa A, incubando durante 1 hora a 37°C con dos lavados posteriores con 2X SSC, durante 5 min. Transcurrido el tiempo, las preparaciones se incubaron en 10 mM de HCL por 5 min y posteriormente se incubaron con pepsina (10 µl/ml)

Núm. 60: 367-379 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

(SIGMA cat. P6887) a 37 °C por 15 min. Posteriormente fueron lavadas dos veces en 2X SSC por 5 min. Se fijaron en paraformalehído 4% (p/v) (SIGMA cat. P6148), durante 10 min. Transcurrido el tiempo las preparaciones se lavaron dos veces en 2X SSC por 5 min y se deshidrataron con etanol a diferentes concentraciones 70%, 90% y 96%, por 3 min cada una, secando a temperatura ambiente. La desnaturalización de éstas se realizó incubando 2 minutos con 70% de formamida (v/v) (SIGMA cat. F5786) a 75°C. Inmediatamente a la desnaturalización, fueron deshidratadas en etanol al 70%, 90% y 96%, en hielo durante 5 min en cada paso.

A cada preparación se le aplicaron 40µl de la mezcla de hibridación compuesta de formamida 50% (v/v) (SIGMA cat. F5786), 2X SSC, 10% de Sulfato de Dextrano (p/v) (SIGMA cat. D8906), 0.17% de SDS y 100 ng del ADN genómico de *Aloe* con marcaje) previamente desnaturalizada a 75 °C durante 10 min y mantenida en hielo hasta su aplicación. Las preparaciones con la mezcla de hibridación se incubaron a 42 °C en cámara húmeda durante toda la noche. Posterior a la hibridación, se procedió a la detección de la sonda en donde las preparaciones fueron lavadas dos veces en 2X SSC por 5 min. Después de los lavados fueron colocadas por 5 min (una preparación a la vez) en una serie de 20% de formamida (v/v) y 2X SSC atemperadas a 42 °C a baño húmedo. Enseguida, las preparaciones se lavaron dos veces en 4X SSC y 0.2% (v/v) de tween 20 (SIGMA cat. P1379) durante 5 min.

Transcurrido el tiempo de lavados astringentes, a las preparaciones se les adicionó BSA 5% (p/v) (SIGMA cat. A2153) y se incubaron a 37 °C durante 20 min para posteriormente aplicar 5 µl (0.75U/µl) de estreptavidina acoplada con CY3 para la detección del ADN genómico de *Aloe vera*, y se incubó a 37°C durante una hora. Pasado el tiempo de detección, las preparaciones se lavaron dos veces en 4x SSC y 0.2% de tween 20 (v/v) (SIGMA cat. P1379). Las preparaciones se escurrieron y se aplicaron 30 µl (1.5 µg/ml) del medio de montaje Vectashield con DAPI (VECTOR cat. H-1200), un cubreobjetos fue colocado sobre la preparación y por último se mantuvo en oscuridad por 10 min. Las preparaciones fueron a analizadas en un microscopio de epifluorescencia Carl Zeiss Axioplan y las imágenes se capturan mediante una cámara Axiocam MRm y el software AxioVision de Carl Zeiss.

Las imágenes fueron procesadas en los parámetros de curvas de nivel, brillo y contraste en el programa Photoshop versión 25.3.1.

RESULTADOS

En este trabajo, a partir de puntas de raíz colectadas a primeras horas de la mañana se obtuvieron tanto núcleos en interfase como cromosomas en metafase de *Agave* híbrido H11648 y en los cuales se analizó, mediante GISH el perfil de hibridación del genoma *Aloe*.

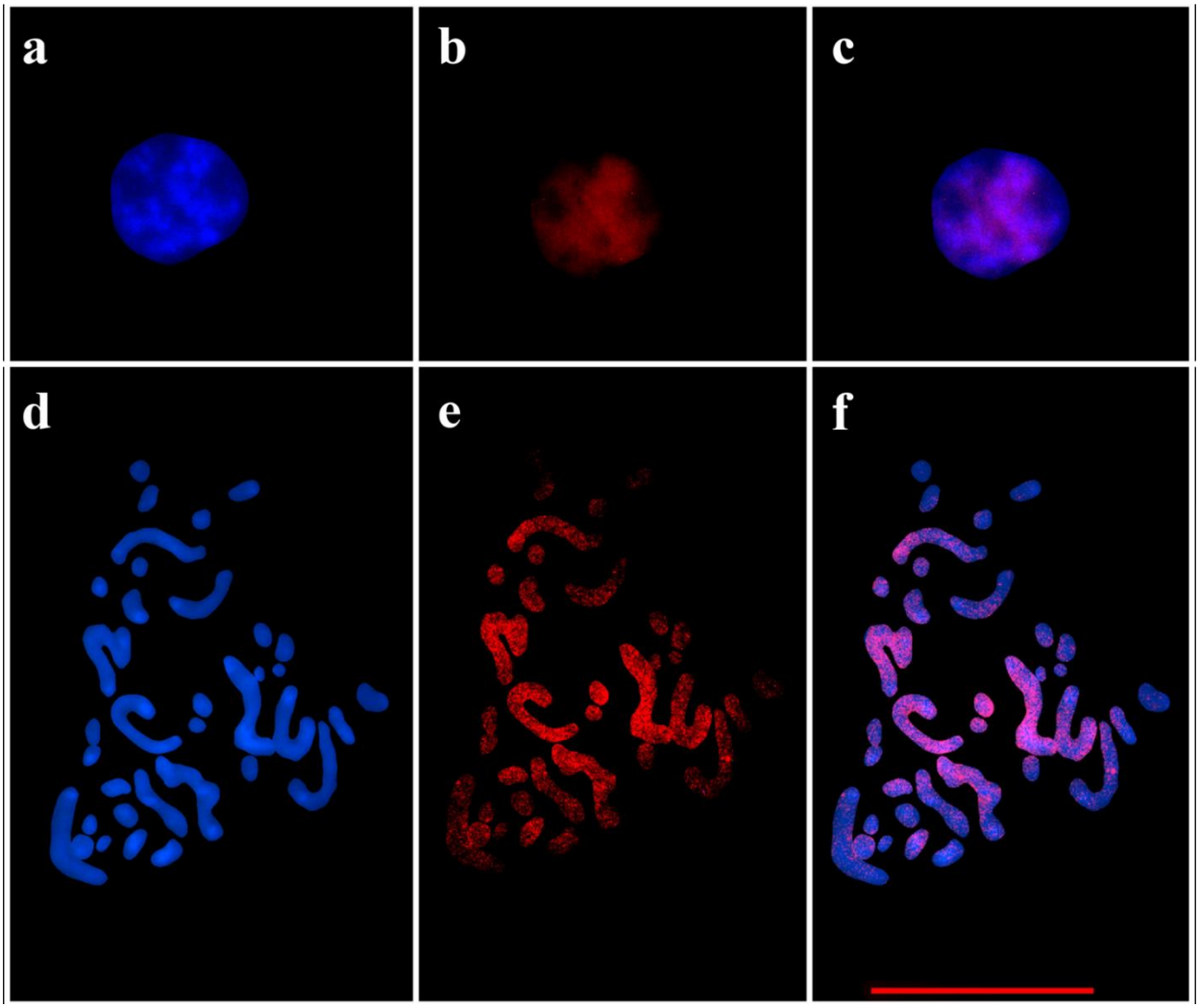


Figura 1. Hibridación genómica *in situ* de *Aloe vera* en *Agave* híbrido H11648. Paneles (a-c) hibridación genómica en células en interfase de *Agave* híbrido H11648 teñidas con DAPI (a), genoma de *Aloe vera* marcado con Cy3-rhodamina (b) e imágenes acopladas (c). Los paneles (d-f) muestran la hibridación genómica *in situ* de *Aloe vera* en cromosomas en metafase de *Agave* híbrido H11648: DAPI(d), genoma de *Aloe*-Cy3 (e), imágenes acopladas (f). La barra de escala representa 10 mm.
Figure 1. *In situ* genomic hybridization of *Aloe vera* on *Agave* hybrid H11648. Panels (a-c) genomic hybridization in interphase cells of *Agave* hybrid H11648 stained with DAPI (a), *Aloe vera* genome labeled with Cy3-rhodamine (b), and flattened images (c). Panels (d-f) show *in situ* genomic hybridization of *Aloe vera* on metaphase chromosomes of *Agave* hybrid H11648: DAPI (d), Aloe-Cy3 genome (e), flattened images (f). Scale bar represents 10 mm.

Para determinar la representatividad del genoma de otra especie con cariotipo bimodal en el genoma de agaves, se realizó la hibridación genómica *in situ* de *Aloe* tanto en núcleos en interfase (Figura 1 panel a-c), como en cromosomas en metafase (Figura 1 panel d-f) de *Agave* híbrido H11648. A partir de la localización genómica de *Aloe* se observó una hibridación (señales en color rojo) de éste en todas las regiones del genoma de *Agave* híbrido, observando una cobertura casi completa, aunque con ligeras diferencias en intensidad para algunas pequeñas regiones del genoma de *Agave* descondensado, en interfase (Figura 1c). Por su parte en cromosomas en metafase se aprecian sitios de hibridación (señales en rojo) a lo largo de los cromosomas tanto en el componente de cromosomas pequeños, como en el componente de cromosomas grandes, pero con hibridación en todos los cromosomas (Figura 1f) aunque con cobertura diferencial.

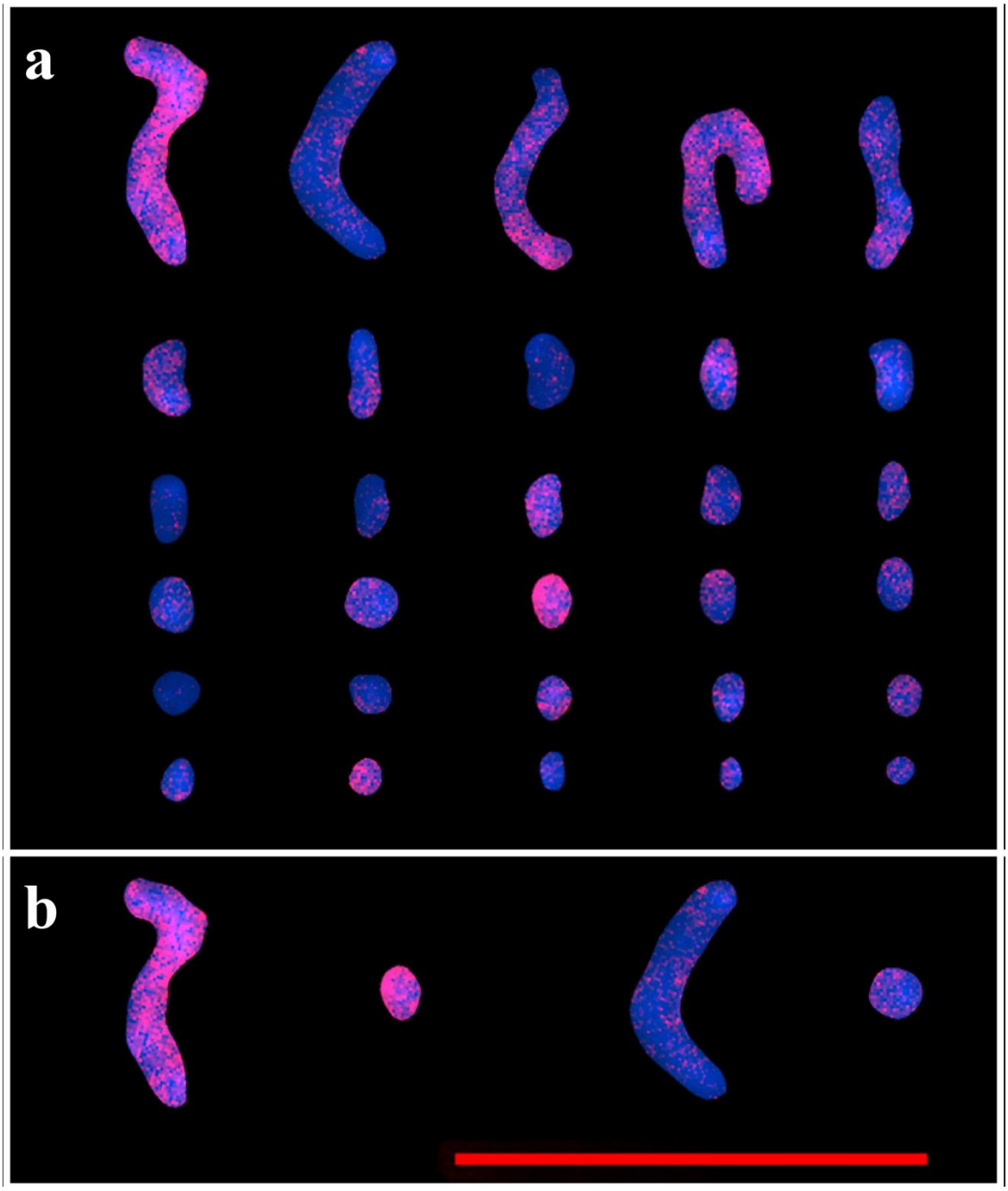


Figura 2. Perfil de hibridación genómica *in situ* del genoma de *Aloe vera* en el componente bimodal de *Agave* híbrido H11648. a) cromosomas en metafase de *Agave* teñidos con DAPI (azul) con hibridación genómica de *Aloe vera* marcado con Cy3 (Rosado). b) Comparativo de cobertura en cromosomas contrastantes seleccionados con relación al perfil de hibridación del genoma de *Aloe vera.* La barra de escala representa 10 mm.
Figure 2. *In situ* genomic hybridization profile of the *Aloe vera* genome in the bimodal component of hybrid *Agave* H11648. a) DAPI-stained *Agave* metaphase chromosomes (blue) with Cy3-labeled *Aloe vera* genomic hybridization (pink). b) Comparison of coverage on selected contrasting chromosomes with respect to the hybridization profile of the *Aloe vera* genome. The scale bar represents 10 mm.

Núm. 60: 367-379 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

El perfil específico de hibridación se presenta en una muestra de los cromosomas, seleccionando 5 grandes y 25 pequeños (Figura 2a), se observó perfiles de hibridación en los 30 cromosomas. En los cromosomas grandes se observó cobertura casi completa a lo largo de cada cromosoma, aunque con menor incidencia en las regiones teloméricas, en 3 de los 5 cromosomas y parcial en los dos restantes, mientras que en de los 25 cromosomas pequeños se observó una cobertura casi completa en 12 de ellos y parcial en los 13 cromosomas restantes.

La comparación de cobertura del genoma de *Aloe vera* en cromosomas de *Agave* híbrido H11648, de manera contrastante se presenta en la figura 2b, en la cual se comparan dos cromosomas grandes y dos pequeños con perfiles de hibridación diferencial, mientras que en uno grande y uno pequeño la cobertura es cercana al 90% del cromosoma total, el otro es cercano al 10%. El patrón de hibridación se aprecia distribuido a lo largo de los cromosomas, sin un perfil de hibridación específico aparente.

La presencia de hibridación en cromosomas en metafase o núcleos en interfase, evidencia de manera global la conservación de regiones comunes a ambos genomas, ello a pesar de la diferencia evolutiva de varios millones de años.

En otras especies, empleando GISH se ha podido identificar la parte del componente genómico de especies parentales donde claramente uno de los parentales hibrida en una parte de los cromosomas en metafase (Lee *et al.*, 2016). El perfil de hibridación observado en el presente trabajo, sugiere una gran conservación de los genomas evaluados y aporta evidencia que descarta, al menos parcialmente, la hipótesis de la hibridación de genomas como origen del cariotipo bimodal en agaves.

DISCUSIÓN

Mientras que las diferencias en el tamaño del genoma pueden surgir de duplicaciones o deleción de ADN redundante o de la duplicación del genoma completo, hay casos de una forma especial de asimetría caracterizada por la presencia de dos conjuntos distintos de cromosomas de tamaño contrastante en un complemento cromosómico, es decir, un "cariotipo bimodal". Tales cariotipos bimodales pueden originarse ya sea por fusión que resulta en la formación de un gran conjunto de cromosomas a partir de diversos cromosomas pequeños o regiones de cromosomas específicos o por fisión que resulta del fraccionamiento de un cromosoma en nuevos cromosomas más pequeños o acumulación diferencial de cromosomas, secuencias repetitivas o por combinaciones alopoliploides de especies con diferentes tamaños cromosómicos (Baez *et al.*, 2019). Los cariotipos bimodales son comunes en familias de monocotiledóneas como Asphodelaceae (*Aloe*, *Haworthia* y *Gasteria*) y Agavaceae (*Agave*, *Yucca* y *Camassia*) (Weiss-Schneeweiss and Schneeweiss 2013).

Los resultados obtenidos en este trabajo con relación a la representatividad del genoma de *Aloe* en el genoma de *Agave*, tanto en cromosomas grandes como pequeños sugiere, de manera preliminar que el cariotipo bimodal no se obtuvo por la integración de dos genomas, tal como se ha reportado para los cariotipos bimodales de especies de espárragos, donde se plantea la hipótesis de un reordenamiento cromosómico que involucra eventos de fusión-fisión (Schubert and Lysak 2011).

El orden Asparagales, que incluye 14 familias tiene una edad estimada del grupo corona de aproximadamente 125.3 millones de años (Tank *et al.*, 2015) y una gran diversidad en tamaños de genoma en valor C que varían entre 0,3 y 82,2 pg (Leitch and Leitch 2013). El género *Aloe L.* pertenece a la familia Asphodelaceae que contiene alrededor de 940 especies y una edad aproximada de 45 a 63 millones de años y presenta una gran diversidad en tamaño y morfología de planta, aunque en su mayoría son diploides se (2n=2x=14). Sus especies muestran en general estabilidad en el cariotipo bimodal con una estructura básica haploide de un cromosoma grande, submetacéntrico tres cromosomas grandes acrocéntricos y tres cromosomas pequeños acrocéntricos (Brandham and Doherty 1998). El contenido de ADN reportado en valor C es cercano a los 20 pg por genoma haploide (Steele *et al.*, 2012), pero existen reportes de asimetría cariotípica en algunas especies del género (Gunjan and Roy, 2010). En el estudio reportado por

Núm. 60: 367-379 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Jahan y colaboradores en (2014), se establece que los cromosomas de *Aloe vera* mostraron una longitud promedio de una población analizada en Pakistán que varió de 2.36 hasta 7.95 µm.

Por su parte, el género *Agave*, de acuerdo a lo reportado por (Good-Avila *et al.*, 2006) , es un género joven dentro de Asparagales con una edad estimada entre 7.8 y 10.1 millones de años con una constancia en su tamaño de genoma en valor C cercano a 4.2 pg de ADN por genoma haploide, que incrementa de manera casi proporcional con el nivel de ploidía (Gomez-Rodriguez *et al.*, 2013; Robert *et al.*, 2008) y todas sus especies presentan el cariotipo bimodal típico con número básico de 30 cromosomas, de los cuales 5 cromosomas son grandes y 25 cromosomas son pequeños (Castorena-Sánchez *et al.*, 1991; Robert *et al.*, 2008). Este género presenta una serie de ploidía desde diploide hasta octoploide manteniendo siempre la proporción del número básico y del cariotipo bimodal.

El perfil de hibridación presentado aquí muestra que el genoma de *Aloe*, una especie ancestral, está presente en los cromosomas de *Agave* tanto en el componente de cromosomas grandes como en los pequeños, observando algunos con hibridación casi completa de los cromosomas, a pesar de la distancia evolutiva de ambas familias. Este hecho es relevante y sugiere un mecanismo de conservación de una gran cantidad de información genética a lo largo de la evolución de ambas especies, lo cual contrasta con las diferencias observadas entre las especies de *Agave* y de *Aloe* al evaluar mediante hibridación fluorescente *in situ* la distribución de la región 5S y 45S en 13 especies de *Aloe*, se evidenció una conservación en localización intersticial en cromosomas grandes de la región 5S, en comparación con diferencias en el número, localización y tamaño de loci encontrado entre las especies analizadas en la región 45S (Adams *et al.*, 2000), posiblemente originados durante la especiación de *Aloe*. En contraste, a lo observado en *Agave* muestra que cada genoma haploide presenta un sitio 18S en cromosoma grande y un sitio 5S en cromosoma pequeño y su número aumenta de manera proporcional con el nivel de ploidía, en todas las especies de *Agave* analizadas (Robert *et al.*, 2008; Gomez-Rodriguez *et al.*, 2013).

Los géneros de *Agave* y *Aloe* están evolutivamente alejados con una divergencia superior a 27 millones de años (Bogler and Simpson 1996; Steele *et al.*, 2012), por lo cual es de suma importancia lo observado en el presente trabajo, toda vez que el perfil de hibridación del genoma de *Aloe* en el de *Agave* híbrido muestra presencia de sitios distribuidos a lo largo del genoma de *Agave*, sugiriendo conservación de regiones genómicas conservadas presentes en especies ancestrales anteriores a la divergencia evolutiva de éstas.

La divergencia estimada en géneros relacionadas a los agaves como *Yucca* se estimó en 20 millones de años, mientras que con *Camassia* o *Hesperaloe* se estimó en 25 millones de años y con *Hosta* en aproximadamente 27 millones de años (McKain *et al.*, 2016) y todas ellas presentan un cariotipo bimodal. Basado en análisis de filogenia, se ha reportado que *Aloe vera* compartió el ancestro reciente más común con las especies de Poales y Zingiberales, también dentro del orden Asparagales; siendo más cercano a los otros géneros suculentos como Haworthia, Gasteria y Astroloba (Chase *et al.*, 2016; Qian and Jin 2016) que con los agaves.

Lee *et al.* (2016) demostraron mediante GISH en un híbrido de *Aloe* con cariotipo bimodal, que la especie *A. arborescens* es el donador del genoma materno y el complemento proviene de *A. vera,* lo cual se observó mediante el patrón de hibridación genómica en solamente algunos de los cromosomas del cariotipo. En contraste con este reporte, nuestros resultados mostraron presencia del componente genómico de *Aloe vera* en todos los cromosomas de *Agave* híbrido a lo largo del cariotipo bimodal.

Se ha reportado en angiospermas, que la hibridación ancestral es una fuerza evolutiva importante que desempeña un papel destacado en los mecanismos de especiación (Stull *et al.*, 2023). Por su parte la diversidad cromosómica puede surgir de alteraciones a través de translocaciones intragenómicas, inversiones pericéntricas y fusión/fisión, que pueden afectar o no el tamaño del genoma (Vimala *et al.*, 2021). La diferencia en el tamaño del genoma haploide entre *Agave* (4.2 pg) y *Aloe* (19 pg) es de casi 4 veces, posiblemente derivado de la contribución de las regiones repetidas como satélites y retroelementos que provocan el incremento del genoma.

El mayor impacto en la variación del tamaño del genoma en las plantas, así como en todos los eucariotas, parece haber sido la amplificación/eliminación de secuencias repetitivas, especialmente elementos móviles (Wang *et al.*, 2021a). El número de secuencias repetitivas difiere significativamente entre las especies, y el contenido promedio de secuencias repetitivas en las plantas oscila entre el 14% y el 90%. La mayoría (más del 75%) de este contenido repetitivo

se identificó como elementos móviles (Elliott and Gregory, 2015; Vondrak *et al.*, 2020). Se ha reportado que las regiones repetidas en especies como *Allium* (Pearce *et al.*, 1996) y *Agave* (Ramos *et al.*, 2023), *Zea* (Sharma and Presting, 2008), entre otros, puede rondar del 60 al 90% del genoma total. Como complemento a este trabajo sería importante el aislamiento de familias de retroelementos presentes en especies ancestrales para determinar su contribución al tamaño del genoma de los agaves.

GISH ha sido ampliamente utilizado para determinar el componente ancestral/parentales de híbridos o especies alopoliploides (Markova and Vyskot, 2009), como *Arabidopsis* (Ali *et al,.* 2004), *Brassica* (Hasterok *et al.,* 2005), *Trifolium* (Ullah *et al.,* 2022), *Coffea* (Herrera *et al.,* 2012), *Gossypium* (Wu *et al.,* 2013), *Nicotiana* (Shibata *et al.,* 2013), *Tragopogon* (Chester *et al.,* 2015), y *Triticum* (Wang *et al.,* 2021b), entre otros. La diferenciación exitosa de los subgenomas en los cromosomas y los núcleos de interfase de los poliploides a través de GISH depende en gran medida de la presencia de secuencias repetitivas específicas del genoma (Kato *et al.,* 2005).

CONCLUSIONES

La presencia y cobertura de hibridación del ADN de una especie ancestral como *Aloe vera* en cromosomas en metafase o núcleos en interfase de agave, evidencia de manera global la conservación de regiones comunes a ambos genomas, descartando la teoría de la hibridación genómica como origen del cariotipo bimodal. Lo anterior es relevante ya que el género *Agave* L. es un género joven dentro de asparagales con una edad estimada entre 7.8 y 10.1 millones que incluye más de 290 especies (Good-Avila *et al.*, 2006), todas ellas con cariotipo bimodal conservado de 30 cromosomas en genoma haploide que consiste en 5 cromosomas grandes y 25 cromosomas pequeños. Por su parte *Aloe* L. pertenece a la familia asphodelaceae que contiene alrededor de 940 especies y una edad aproximada de 45 a 63 millones de años y hasta el momento se desconoce el origen del cariotipo bimodal en los agaves. La información generada en esta investigación de manera directa sugiere que el cariotipo bimodal en agaves puede ser originado por fusiones y fisiones más que por aloplopliploidía de especies ancestrales. Hasta nuestro conocimiento, este es el primer reporte empleando GISH para estudiar el origen del cariotipo bimodal en agaves.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONAHCYT por la beca postdoctoral de MJGC CVU 591024 y por el proyecto CF-2023-1-1877; agradecen además al IQ Felipe Barredo Pool por el apoyo técnico brindado en microscopia de epifuorescencia.

LITERATURA CITADA

Adams, S.P., I.J Leitch, M.D. Bennet, M.W. Chase, A.R. Leitch. (2000). Ribosomal DNA evolution and phylogeny in *Aloe* (Asphodelaceae). Am J Bot 87 (11):1578-1583. https://doi.org/10.2307/2656733

Ali, H.B.M., M.A. Lysak, I. Schubert. (2004). Genomic *in situ* hybridization in plants with small genomes is feasible and elucidates the chromosomal parentage in interspecific Arabidopsis hybrids. Genome 47 (5):954-960. https://doi.org/10.1139/g04-041

Baez, M., M. Vaio, S. Dreissig, V. Schubert, A. Houben, A. Pedrosa-Harand. (2019). Together But Different: The Subgenomes of the Bimodal Eleutherine Karyotypes Are Differentially Organized. Front Plant Sci 10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01170

Bogler, D.J., B.B. Simpson. (1996). Phylogeny of Agavaceae based on ITS rDNA sequence variation. Am J Bot 83 (9):1225-1235. https://doi.org/10.2307/2446206

Brandham, P.E., M.J. Doherty. (1998). Genome size variation in the Aloaceae, an angiosperm family displaying karyotypic orthoselection. Ann Bot-London 82:67-73. https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0742

Carter, S. (1994). Flora of Tropical East Africa - Aloaceae (1994). Royal Botanic Gardens K. Taylor & Francis.

Castorena-Sánchez, I., R.M. Escobedo, A. Quiroz. (1991). New cytotaxonomical determinants recognized in six taxa of *Agave* in the sections Rigidae and Sisalanae. Canadian Journal of Botany 69 (6):1257-1264. https://doi.org/10.1139/b91-163

Chase, M.W, M. Christenhusz, M. Fay, J. Byng, W.S. Judd, D. Soltis, D. Mabberley, A. Sennikov, P.S. Soltis, PF. Stevens. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. Botanical journal of the Linnean Society 181 (1):1-20. https://doi.org/10.1111/boj.12385

Chester, M., R.K. Riley, P.S. Soltis, D.E. Soltis. (2015) Patterns of chromosomal variation in natural populations of the neoallotetraploid Tragopogon mirus (Asteraceae). Heredity 114 (3):309-317. https://doi.org/10.1038/hdy.2014.101

Eguiarte, L.E., M.R. Duvall, G.H. Learn Jr., and M.T. Clegg. (1994) The systematic status of the Agavaceae and Nolinaceae and related Asparagales in the Monocotyledons: An analysis based on the rbcL gene sequence. Botanical Sciences (54): 35-56. https://doi.org/10.17129/botsci.1427

Elliott, T.A., T.R. Gregory. (2015) What's in a genome? The C-value enigma and the evolution of eukaryotic genome content. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 370 (1678):20140331. https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0331

Gomez-Rodriguez, V.M., B. Rodriguez-Garay, G. Palomino, J. Martinez, R. Barba-Gonzalez. (2013). Physical mapping of 5S and 18S ribosomal DNA in three species of *Agave* (Asparagales, Asparagaceae). Comp Cytogenet 7 (3):191-203. doi:10.3897/CompCytogen.v7i3.5337

Good-Avila, S.V., V. Souza, B.S. Gaut, L.E. Eguiarte. (2006). Timing and rate of speciation in *Agave* (Agavaceae). Proceedings of the National Academy of Sciences 103 (24):9124-9129. https://doi.org/10.1073/pnas.0603312103

Gunjan, K., B.K. Roy. (2010). Karyotype studies in dominant species of Aloe from eastern India. Caryologia 63 (1):41-49. https://doi.org/10.1080/00087114.2010.10589707

Halpin, K.M., M. Fishbein. (2013). A Chloroplast Phylogeny of Agavaceae subfamily Chlorogaloideae: Implications for the Tempo of Evolution on Serpentine Soils. Syst Bot 38 (4):996-1011. https://doi.org/10.1600/036364413x674850

Hasterok, R., T. Ksiazczyk, E. Wolny, J. Maluszynska. (2005). FISH and GISH analysis of genomes. Acta Biol Cracov Bot 47 (1):185-192

Herrera, J.C., J.V. Romero, G.C. Camayo, C.M. Caetano, H.A. Cortina. (2012). Evidence of Intergenomic Relationships in Triploid Hybrids of Coffee (*Coffea* sp.) as Revealed by Meiotic Behavior and Genomic *in situ* Hybridization. Trop Plant Biol 5 (3):207-217. https://doi.org/10.1007/s12042-012-9105-x

Humphreys, M.W., H.M. Thomas, W.G. Morgan, M.R. Meredith, J.A. Harper, H. Thomas, Z. Zwierzykowski, M. Ghesquiere. (1995). Discriminating the Ancestral Progenitors of Hexaploid Festuca-Arundinacea Using Genomic in-Situ Hybridization. Heredity 75:171-174. https://doi.org/10.1038/hdy.1995.120

Jahan, B., A.A. Vahidy, R. Saeed, A.A. Mirbahar. (2014). Karyological Studies in Ten Different Populations of Desert Lily Aloe Vera from Pakistan. Pak J Bot 46 (5):1731-1734

Kato, A., J.M. Vega, F. Han, J.C. Lamb, J.A. Birchler. (2005). Advances in plant chromosome identification and cytogenetic techniques. Curr Opin Plant Biol 8 (2):148-154. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2005.01.014

Lee, Y.S., H.M. Park, N.H. Kim, N.E. Waminal, Y.J. Kim, K.B. Lim, J.H. Baek, H.H Kim, T.J. Yang. (2016). Phylogenetic relationship of 40 species of genus Aloe L. and the origin of an allodiploid species revealed by nucleotide sequence variation in chloroplast intergenic space and cytogenetic *in situ* hybridization. Genet Resour Crop Ev 63 (2):235-242. https://doi.org/10.1007/s10722-015-0243-5

Leitch, I.J., A.R.Leitch. (2013). Genome Size Diversity and Evolution in Land Plants. In: Greilhuber J, Dolezel J, Wendel JF (eds) Plant Genome Diversity Volume 2: Physical

Structure, Behaviour and Evolution of Plant Genomes. Springer Vienna, Vienna, pp 307-322. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1160-4_19

Magallón, S., A. Castillo. (2009). Angiosperm diversification through time. Am J Bot 96 (1):349-365. https://doi.org/10.3732/ajb.0800060

Markova, M., B. Vyskot. (2009). New Horizons of Genomic *in situ* Hybridization. Cytogenet Genome Res 126 (4):368-375. https://doi.org/10.1159/000275796

McKain, M.R., J.R. McNeal, P.R. Kellar, L.E. Eguiarte, J.C. Pires, J. Leebens-Mack. (2016). Timing of rapid diversification and convergent origins of active pollination within Agavoideae (Asparagaceae). Am J Bot 103 (10):1717-1729. https://.doi.org/10.3732/ajb.1600198

McKain, M.R., N. Wickett, Y. Zhang, S. Ayyampalayam, W.R. McCombie, M.W. Chase, J.C. Pires, C.W. dePamphilis, J. Leebens-Mack. (2012). Phylogenomic Analysis of Transcriptome Data Elucidates Co-Occurrence of a Paleopolyploid Event and the Origin of Bimodal Karyotypes in Agavoideae (Asparagaceae). Am J Bot 99 (2):397-406. https://doi.org/10.3732/ajb.1100537

Pearce, S.R., U. Pich, G. Harrison, A.J. Flavell, J.S. Heslop-Harrison, I. Schubert, A. Kumar. (1996). The Ty1-copia group retrotransposons of *Allium* cepa are distributed throughout the chromosomes but are enriched in the terminal heterochromatin. Chromosome Res 4 (5):357-364. https://.doi.org/10.1007/bf02257271

Qian, H., Y. Jin. (2016). An updated megaphylogeny of plants, a tool for generating plant phylogenies and an analysis of phylogenetic community structure. J Plant Ecol 9 (2):233-239. https://doi.org/10.1093/jpe/rtv047

Ramos, L.C., M. Baez, J. Fuchs, A. Houben, R. Carvalho, A. Pedrosa-Harand. (2023). Differential Repeat Accumulation in the Bimodal Karyotype of *Agave* L. Genes 14 (2). https://doi.org/10.3390/genes14020491

Rey, M.D., G. Moore, A.C. Martín. (2018). Identification and comparison of individual chromosomes of three accessions of *Hordeum chilense*, *Hordeum vulgare*, and *Triticum aestivum* by FISH. Genome 61 (6):387-396. https://doi.org/10.1139/gen-2018-0016

Robert, M.L., K.Y. Lim, L. Hanson, F. Sanchez-Teyer, M.D. Bennett, A.R. Leitch, I.J. Leitch. (2008). Wild and agronomically important *Agave* species (Asparagaceae) show proportional increases in chromosome number, genome size, and genetic markers with increasing ploidy. Botanical Journal of the Linnean Society 158 (2):215-222. https://.doi.org/10.1111/j.1095-8339.2008.00831.x

Schubert, I., M.A. Lysak. (2011). Interpretation of karyotype evolution should consider chromosome structural constraints. Trends Genet 27 (6):207-216. https://doi.org/10.1016/j.tig.2011.03.004

Sharma, A., G.G. Presting. (2008). Centromeric retrotransposon lineages predate the maize/rice divergence and differ in abundance and activity. Mol Genet Genomics 279 (2):133-147. https://doi.org/10.1007/s00438-007-0302-5

Shibata, F., K. Nagaki, E. Yokota, M. Murata. (2013). Tobacco karyotyping by accurate centromere identification and novel repetitive DNA localization. Chromosome Res 21 (4): 375-381. https://.doi.org/10.1007/s10577-013-9363-y

Steele, P.R., K.L. Hertweck, D. Mayfield, M.R. McKain, J. Leebens-Mack, J.C. Pires. (2012). Quality and quantity of data recovered from massively parallel sequencing: Examples in Asparagales and Poaceae. Am J Bot 99 (2): 330-348. https://doi.org/10.3732/ajb.1100491

Stull, G.W., K.K. Pham, P.S. Soltis, D.E. Soltis. (2023). Deep reticulation: the long legacy of hybridization in vascular plant evolution. The Plant Journal 114 (4): 743-766. https://doi.org/10.1111/tpj.16142

Tank, D.C., J.M. Eastman, M.W. Pennell, P.S. Soltis, D.E. Soltis, C.E. Hinchliff, J.W. Brown, E.B. Sessa, I.J. Harmon. (2015). Nested radiations and the pulse of angiosperm diversification: increased diversification rates often follow whole genome duplications. New Phytol 207 (2):454-467. https://doi.org/10.1111/nph.13491

Ullah, I., H.A. Ansari, I.M. Verry, S.W. Hussain, N.W. Ellison, M.T. McManus, W.M. Williams. (2022). Introgression of *Trifolium ambiguum* Into Allotetraploid White Clover

Recibido:
10/septiembre/2024

Aceptado:
4/junio/2025

(*Trifolium repens*) Using the Ancestral Parent *Trifolium occidentale* as a Bridging Species. Front Plant Sci 13. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858714

Vimala, Y., S. Lavania, UC. Lavania. (2021). Chromosome change and karyotype differentiation-implications in speciation and plant systematics. Nucleus Calcutta 64 (1):33-54. https://.doi.org/10.1007/s13237-020-00343-y

Vondrak, T., L.A. Robledillo, P. Novak, A. Koblizkova, P. Neumann, J. Macas. (2020). Characterization of repeat arrays in ultra-long nanopore reads reveals frequent origin of satellite DNA from retrotransposon-derived tandem repeats. Plant J 101 (2):484-500. https://doi.org/10.1111/tpj.14546

Wang, Q., Y. Wang, J.H. Wang, Z. Gong, G.Z. Han. (2021a). Plants acquired a major retrotransposon horizontally from fungi during the conquest of land. New Phytol. https://doi.org/10.1111/nph.17568

Wang, Y.J., S.W. Wang, X.J. Jia, Z.R. Tian, Y.F. Wang, C.Y. Wang, H. Zhang, X.L. Liu, J.X. Zhao, P.C. Deng, W.Q. Ji. (2021b) Chromosome karyotype and stability of new synthetic hexaploid wheat. Mol Breeding 41 (10). https://doi.org/10.1007/s11032-021-01253-w

Weiss-Schneeweiss, H, G.M Schneeweiss. (2013). Karyotype Diversity and Evolutionary Trends in Angiosperms. In: Greilhuber J, Dolezel J, Wendel JF (eds) Plant Genome Diversity Volume 2: Physical Structure, Behaviour and Evolution of Plant Genomes. Springer Vienna, Vienna, pp 209-230. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1160-4_13

Wu, Y.X., J.H. Chen, Q.L. He, S.J. Zhu. (2013). Parental origin and genomic evolution of tetraploid species by molecular marker and GISH analyses. Caryologia 66 (4):368-374. https://doi.org/10.1080/00087114.2013.857830

Yu-xiang, W., C. Jin-hong, H. Qiu-ling, Z. Shui-jin. (2013). Parental origin and genomic evolution of tetraploid *Gossypium* species by molecular marker and GISH analyses. Caryologia 66 (4):368-374. https://doi.org/10.1080/00087114.2013.857830

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

PRÁCTICAS DE MANEJO PARA LA PRODUCCIÓN DE (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) EN PRODUCTORES DEL MUNICIPIO DE PUNGARABATO, GUERRERO, MÉXICO

MANAGEMENT PRACTICES FOR THE PRODUCTION OF (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) IN PRODUCERS OF THE MUNICIPALITY OF PUNGARABATO, GUERRERO, MEXICO

Rodríguez Mejía, S., J. Olivares, S. Rojas Hernández, T. Romero Rosales, M.Á. Damian Valdéz, V. Jiménez Lobato, L. Sarabia Salgado

PRÁCTICAS DE MANEJO PARA LA PRODUCCIÓN DE (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) EN PRODUCTORES DEL MUNICIPIO DE PUNGARABATO, GUERRERO, MÉXICO. MANAGEMENT PRACTICES FOR THE PRODUCTION OF (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) IN PRODUCERS OF THE MUNICIPALITY OF PUNGARABATO, GUERRERO, MEXICO.

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 381-394 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.23

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Núm. 60: 381-394 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Prácticas de manejo para la producción de (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) en productores del Municipio de Pungarabato, Guerrero, México

Management practices for the production of (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) in producers of the Municipality of Pungarabato, Guerrero, Mexico

Santos Rodríguez Mejía https://orcid.org/0009-0003-2385-3292
Jaime Olivares Pérez / olivaares@hotmail.com, jaimeolivares@uagro.mx
https://orcid.org/0000-0002-7455-2890
Saúl Rojas Hernández https://orcid.org/0000-0001-5152-2149
Teolincacihualt Romero Rosales https://orcid.org/0000-0002-9158-8481
Miguel Ángel Damián Valdez https://orcid.org/0000-0002-5098-7283
Universidad Autónoma de Guerrero, Maestría en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local. Unidad Tuxpan: Km 2.5 Carr. Iguala-Tuxpan, Iguala, Gro. C.P. 40101.

Vania Jiménez Lobato https://orcid.org/0000-0003-2050-9026
IxMx- Maestría en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local – Universidad Autónoma de Guerrero, Guerrero, México

Lucero Sarabia Salgado https://orcid.org/0000-0003-0815-3389
Universidad Autónoma de Guerrero-Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, km 3.5 carretera Altamirano-Iguala CP. 40660, Guerrero, México

Rodríguez Mejía, S., J. Olivares, S. Rojas Hernández, T. Romero Rosales, M.Á. Damian Valdéz, V. Jiménez Lobato, L. Sarabia Salgado

PRÁCTICAS DE MANEJO PARA LA PRODUCCIÓN DE (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) EN PRODUCTORES DEL MUNICIPIO DE PUNGARABATO, GUERRERO, MÉXICO

MANAGEMENT PRACTICES FOR THE PRODUCTION OF (*Vigna unguiculata* [L.] Walp) IN PRODUCERS OF THE MUNICIPALITY OF PUNGARABATO, GUERRERO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 381-394. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.23

ABSTRACT The jewish bean or judillo (*Vigna unguiculata* [L.] Walp), is a staple food for families in the rural environment of the Guerrero tropics. The study was developed to determine the prevalence of *V. unguiculata* [L] Walp cultivation among farmers. The cultivation practices were described and related to productive aspects of the plant. The four varieties of jewish bean identified were pole brown, white, shrub brown and black. The prevalence of jewish bean cultivation was 56.36% and the most frequent variety was the shrub brown bean compared to the other varieties ($p<0.0004$). The activity was carried out by men and women of different ages (senile, adults or young), but mostly without school education and with a maximum primary level. Six management practices (seeds per point, planting density, distance between plants, furrows distance, cleaning frequency and amount of fertilizer) developed by producers were identified as being fundamental for seed production. It is concluded that the jewish bean is an important food in rural families in Pungarabato municipality of Tierra Caliente region of Guerrero and the management practices developed by the producers were related to the production of the crops regardless of the variety of *V. unguiculata* [L.] Walp.
Key words: food security, traditional crops, management practices, poverty, marginalization.

RESUMEN: El frijol judío o judillo *(Vigna unguiculata [L] Walp*), es un alimento básico para las familias en el medio rural del trópico de Guerrero. El estudio fue desarrollado para conocer la prevalencia del cultivo de *V. unguiculata* [L] Walp entre los agricultores, se describieron las prácticas de cultivo y fueron relacionadas con aspectos productivos de la planta. Las cuatro variedades de frijol judío identificadas fueron el bayo trepador, blanco, bayo arbustivo y negro. La prevalencia de cultivo de frijol judío fue del 56.36% y la variedad más frecuente fue el bayo de arbusto comparado a las otras variedades ($p<0.0004$). La actividad la desarrollaron hombres y mujeres de diferentes

Núm. 60: 381-394 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

edades (senil, adultos o jóvenes), pero en su mayoría sin instrucción escolar y máximo nivel primario. Fueron identificadas seis prácticas de manejo (semillas por punto, densidad de siembra, distancia entre plantas, distancia entre surcos, frecuencia de limpieza y cantidad de fertilizante) desarrolladas por los productores que fueron fundamentales para la producción de semilla. Se concluye que el frijol judío es un alimento importante en las familias rurales de Pungarabato municipio de la región Tierra Caliente de Guerrero y las prácticas de manejo que desarrollaron los productores estuvieron relacionadas con la producción de los cultivos independientemente de la variedad de *V. unguiculata* [L.] Walp.
Palabras clave: seguridad alimentaria, cultivos tradicionales, prácticas de manejo, pobreza, marginación.

INTRODUCTION

Today, one of humanity's greatest challenges is to achieve sustainable food security for a growing population while mitigating biodiversity loss in a context of climate change (Godfray, 2014; Mehrabi *et al.,* 2018; Myers *et al.,* 2017). Climate change is expected to reduce yields of key crops such as wheat (6.0%), rice (3.2%), corn (7.4%) and soybeans (3.1%) by the end of the century (Zhao *et al.,* 2017). In contrast, food production must increase by more than 62% to food 10 billion people by 2050 (Godfray *et al.,* 2010; Tilman *et al*., 2011; Van - Dijk *et al.,* 2021). The solution includes strategies such as reducing inequalities, healthy diets with reduced food waste and sustainable production of primary crops (Ruben *et al.,* 2021; Willett *et al.,* 2019; Geyik *et al.,* 2022). The Fabaceae represents a food important in humans and animal, rich in minerals such as N, P, K, Ca, and Mg, and also constitutes a source of Fe and Zn (Valdés – Márquez *et al*., 2023). The bean grain has a high nutritional value and is rich in proteins and essential amino acids, with important contributions to the human diet (De Conceico – Dos Santos *et al*., 2022). The jewish beans grows well in harsh environments where other legumes do not grow, withstands high temperatures, tolerates drought and produces in soils with nutrient deficiencies (Carvalho *et al*., 2016). It establishes symbiosis with rhizobia and mycorrhizal fungi, which reduces the use of fertilizer and favors the physical, chemical and biological properties of the soil (Carvalho *et al*., 2016; Fageria *et al*., 2005). According to Carneiro – Da Silva *et al*., (2019) These attributes allow these species to be recognized as an important crop in the structure of sustainable agroecosystems. The jewish bean (*V. unguiculata* [L] Walp) has a promising future because it has a high resistance to adverse climate changes (Kotir, 2011; Chandra *et al*., 2023). In Mexico, naturally adapted varieties are produced on a small scale and for family consumption (Morales – Morales *et al*., 2019). They occupy approximately 240 ha and the states that most produced are Yucatán, Tabasco, Campeche and Quintana Roo with average productions of 527 kg/ha^{-1} (SIAP, 2022; 2023). Good agricultural practices, such as crop rotation, improve the nutrients availability in the soil, its structure and biological activity, and reduce the incidence of pests and diseases Díaz - Solís and Morejón – Rivera, (2018). Integrated crop management, which includes sustainable practices and the rational use of inputs, is crucial to maintaining productivity and minimizing contamination with the use of chemicals (Alvarado *et al.,* 2024). Production is associated with planting density, cultivation area, distance between plants, cleaning, amount of fertilizer and the method of planting (Reyes – González *et al.,* 2021). The objective of the study was to determine the prevalence of the cultivation of jewish bean (*V. unguivulata* [L] Walp), the varieties cultivated and the relationship of management practices with the productive yield of the crops.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted in the Guerrero tropics (18° 20’ 30” NL and 100° 39’ 18” WL), at 250 masl. The predominant climate was warm subhumid (Aw0). The minimum and maximum annual temperature ranged from 28 °C to 46 °C, with annual precipitation of 750 mm (Reynolds *et al*.,

1995). Pungarabato is a municipality with 38,000 inhabitants, where 52.7% of its population lived in moderate to extreme poverty. Vulnerability was especially evident in the social and economic areas, particularly in terms of access to healthcare and food, affecting the life quality of the population (CONEVAL, 2020). The sample (n) was obtained with the formula:

$$n = \frac{Z^2 p.q}{E^2}$$

Were:

Z= minimum confidence level used (95%) to generalize the results to the entire population
p y q= represents the maximum variation of the study (50%) probability of finding or not finding the culture
E= indicates the maximum tolerable error (10%) in the study

These parameters that were introduced into the statistical program winepi-episcope 2.0 modified by (Thrusfield *et al*. 2001). The program yielded a sample of 97 farmers, however, to increase certainty, 110 producers interviewed during a field visit were considered as the final sample. The selection of the farmers interviewed was random, men and women with agricultural activity in general, which allowed to know the frequency of the crop in the study area (farmers who cultivated the bean and those who did not). From the sample visited, only those who at the time of the study had jewish bean cultivation (*Vigna unguiculata* [L] Walp) were selected (n = 62, which represented 68.2% of the total sample) to whom questions were asked in a survey format. The survey collected information on the farmers' age, educational level, and years cultivating the jewish bean. The age and educational level of producers can be a reflection of formality, their organizational capacity and accessibility to the transfer of knowledge and technologies, the heritage and interest of the new generations to continue with the cultivation. The years of cultivation help to know the experience of the producer and the changes that he has observed in the plant over time. Aspects of crop management were also included, such as cultivation area, planting density, frequency and amount of fertilization, frequency of cleaning, sowing method among others. The area planted was a reflection of the production scale and the crop impact on the product supply (total production). The cleaning frequency reflects the competitiveness of the crop with other weeds and the need to improve practices to costs reduce or environmental damage due to agrochemicals use. The number seeds per point and the furrows distance are variables related to the sowing density and crop yield. The sowing type, associated or monoculture, allowed us to determine the crop's capacity to established in a more sustainable agricultural system. The type and amount of fertilizer used was an indication of the additional needs of the crop as a nitrogen-fixing Fabaceae specie. The which ways the product was used and marketed allowed for an economic balance established and its value as a family's food in rural areas.

Statistical analysis

The relationship of management variables (plant and furrows distance, sowing density, cleaning frequency, seed per point, amount of fertilizer) with crop seed production were analyzed by association measures (correlation and regression) (SAS, 2021). The nonparametric descriptive chi-square statistic was used to analyze crop frequency by *Vignas* variety (in a 2*4 contingency table and 3 degrees of freedom), type of fertilizer used and sowing method (monoculture or associated cultivation) in a 2*2 contingency table and one degrees of freedom. In all analyses, the determination of the associated effects was at an alpha of 0.05.

Núm. 60: 381-394 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

RESULTS

Population that develops the crop

The farmers who plant the jew bean (*Vigna unguiculata* [L] Walp) 50% were over 50 years old, 39% were adults between 30-50 years old and only 11% were young people under 30 years old. Among those who grow beans, 82% were men and 17% women. The analysis of the schooling of this population stratum showed that 41% have no education at all, 32% have primary education, 4% secondary education, 8% with higher education, and 11% have university studies. The experience years in farming indicated that 62.9% of farmers were less than 30 years old, 19.4% were between 30 and 50 years old, and only 17.7% had more than 50 years of experience.

Frequency and varieties of cultivated *Vignas*

The frequency of cultivation of *Vignas* was 56% and the cultivated varieties identified were, in order of importance ($p<0.0004$), brown seed of *Vigna*, white seed, brown seed of shrub and black seed (Figure 1). These varieties have persisted for more than 50 years, identified daily by their phenotypic characteristics of color and growth habit (Figure 2 A, B, C and D).

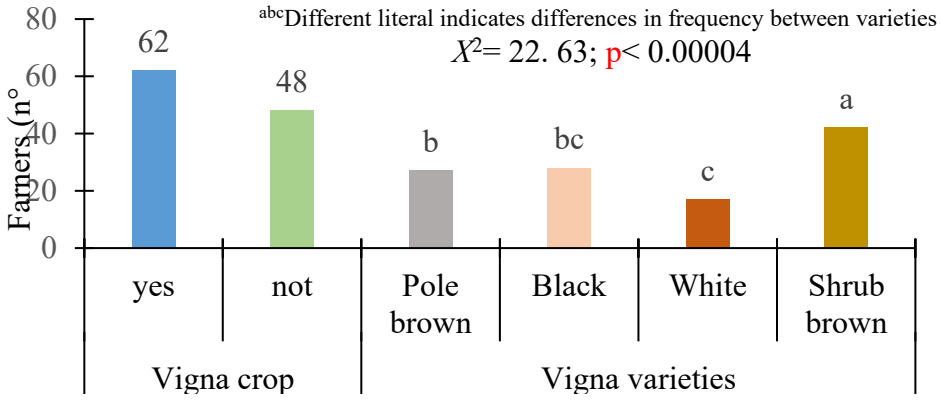


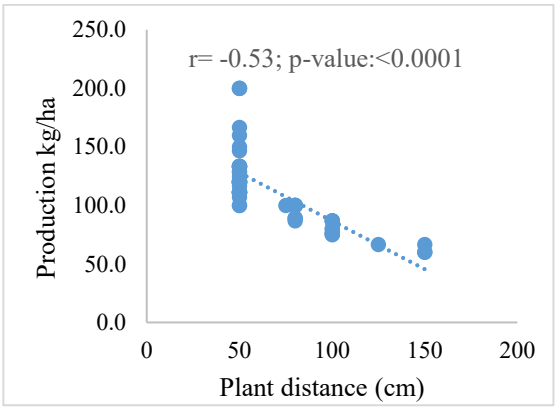
Figure 1. Frequency of Jew bean cultivation (*Vigna unguiculata* [L] Walp), in farmers of the Pungarabato Municipality.
Figura 1. Frecuencia de cultivo de frijol (*Vigna unguiculata* [L] Walp), en agricultores del Municipio de Pungarabato.

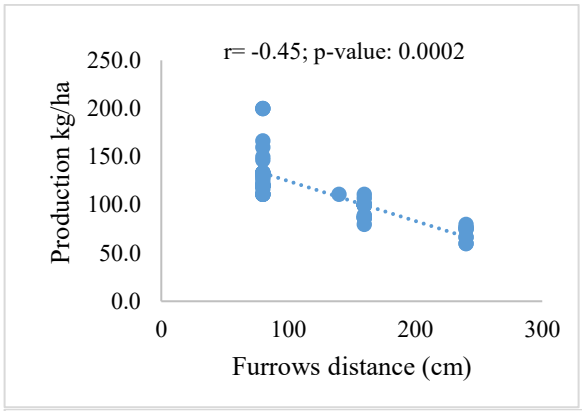
Vignas are beans belonging to the Fabaceae, the varieties identified in the study were four, catalogued by the phenotypic differences observed, for example the pole growth habit was characteristic of three varieties A, B and D in Figure 2 and only C showed shrub growth. The violet color of the flower was characteristic of varieties A, C and D in Figure 2 and only variety B showed white flowers in their entirety. In the seed more differences were observed, varieties A and C showed brown color, however, the tone was stronger in variety C, in variety B the seed was white and in variety D it was black (Figure 2). In the shape of the leaf, varieties B, C and D showed triangular leaves and of the three, C had a light green color and varieties B and D had a strong green color, only variety A showed a circular-rhombic leaf of a strong green color (Figure 2).

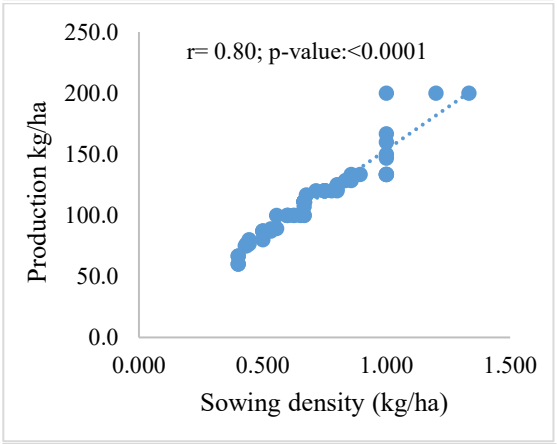
Figure 2. Varieties of *Vigna unguiculata* [L] Walp identified daily by farmers.
Figura 2. Variedades de *Vigna unguiculata* [L] Walp identificadas diariamente por los agricultores.

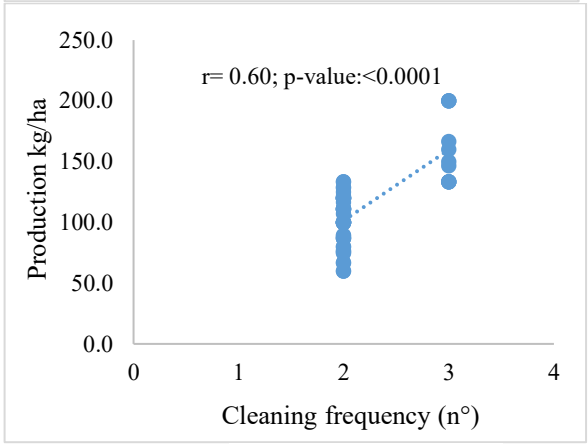
Management practices developed by producers

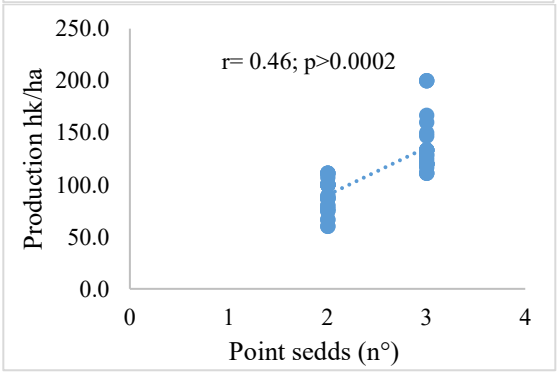
The relationship between the distance between plants and furrows, sowing density, seeds per point and cleaning frequency as independent variables with the seed production of the crop as dependent variable is presented in Figure 3. The variables that had a significant positive correlation from medium to high were seeds per point ($r=0.46$; $p=0.0002$), cleaning frequency ($r=0.60$; $p<0.0001$) and sowing density ($r=0.80$; $p<0.0001$). The variables that had a significant negative correlation were the distance between furrows ($r=-0.45$; $p=0.0002$) and the distance between plants ($r= -0.53$; $p<0.0001$). The multiple linear regression analysis (R^2) indicated that the variations in the seed production of the *Vignas* were attributed by 74% ($R^2=0.74$; $p<0.0001$) to the management practices provided to the crop at the time of sowing (Plant distance (cm), furrow's distance (cm), sowing density (kg/ha) and point seeds (n°)) and the cleaning frequency (n°) during the productive cycle and based on the results the prediction equation observed in Figure 3 was standardized. This indicated that producers who planted a greater quantity of seed per ha, more seeds per point, less distance between plants and furrows and more cleaning practices in their crops, harvested a greater quantity of seed at the end of the productive cycle of the plant. The sowing method mixed (n=23; 37%) and monoculture (n=39; 63%) was not related to changes in crop production.











R^2=0.74; p<0.0001

Equation prediction:

Production (kg/ha)
= −100.8
+ 0.12(plant distance in cm)
+ 0.53(furrows distance in cm)
+ 474(sowin density in □□/ℎ□)
− 70.13(cleaning frequency in n°)
− 16.0(point seed in n°)

Figure 3. Correlation and multiple regression between seed production as a dependent variable with plant distance sowing method cleaning frequency and point seeds with bean production as independent variables.
Figura 3. Correlación y regresión múltiple entre producción de semillas como variable dependiente con distancia entre plantas, método de siembra, frecuencia de limpieza y semillas puntuales con producción de frijol como variables independientes.

In Figure 4, a moderate to high positive correlation was observed and was significant (r=0.69; p<0.0001) which showed that with increased fertilization, seed production increased in the *V. unguiculata* crop. The regression analysis showed a medium relationship (R^2=0.536; p<0.0001) which indicated that the changes in seed production of the plant were explained in 48.4% by the addition of fertilizer, which yielded a prediction equation (Figure 4A) for seed production (y) at the expense of fertilization as an independent variable (x). The type of fertilizer used was

nitrogen: diammonium phosphate (18% N - 46% P) and urea (46% N) and was not related to the crop production level (p>0.05) (Figure 4B).

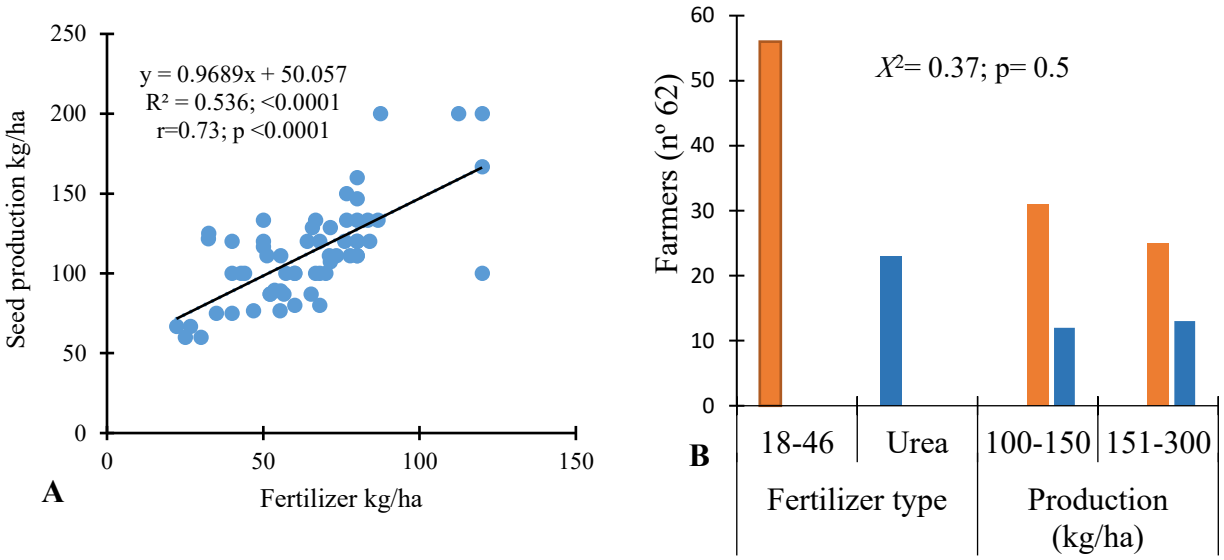


Figure 4. Fertilization practice type and quantity and its relationship with bean production.
Figura 4. Tipo y cantidad de práctica de fertilización y su relación con la producción de frijol.

Use and profitability of the crop

Figure 5 contains the expenses attributed to the cultivation of *Vigna*s as well as the total income and net profit. It was observed that the expenses per hectare ranged between $2,593.55 pesos Mx, and the total income was 7,517.27 pesos Mx, of which $2,477.27 pesos Mx were for the sale of the seed and $5,040 pesos Mx for the sale of ejote (ripe fruit characterized by having the complete formation of the seed and humidity around 60%). The net profit of the cultivation of jew oscillated between $4,923.72 pesos Mx per productive cycle ha^{-1}. It is important to mention that the estimates of utilities included 47 and 35% of the use for self-consumption in the form of seeds ($1,164.2 Mexican pesos) and green beans ($1,764 Mexican pesos) respectively, which represented an economic saving for families.

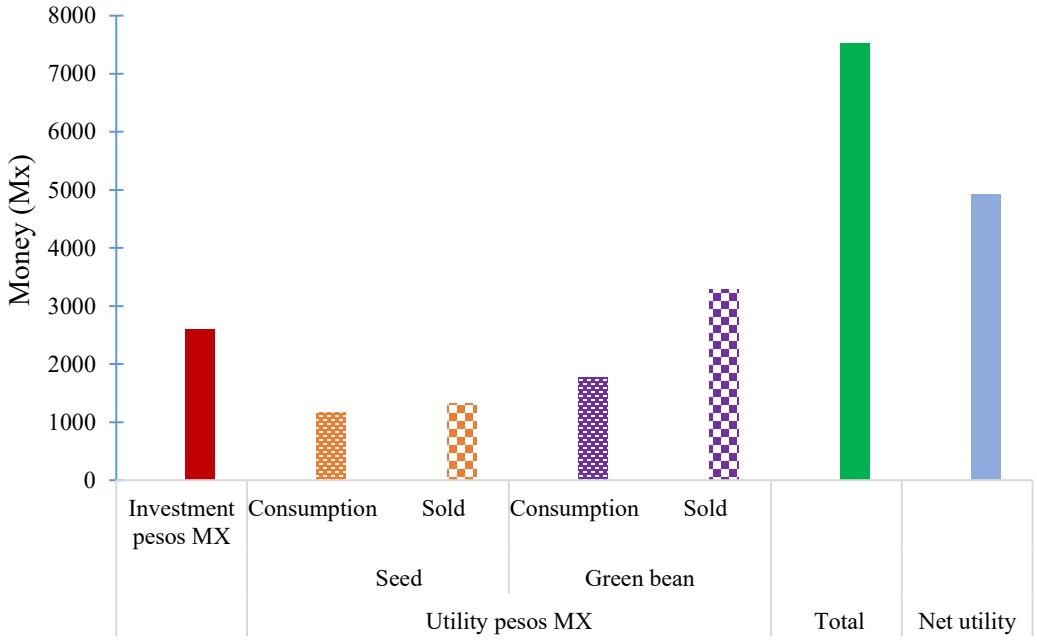


Figure 5. Relationship between expenses and income that farmers obtain from bean cultivation (Mx pesos/ha).
Figura 5. Relación entre gastos e ingresos que obtienen los agricultores del cultivo de frijol (pesos mexicanos/ha).

DISCUSSION

Population that develops the crop

The participation of older women and men was a reflection of the importance of the activity of growing *Vignas* in the family economy, especially since it is one of the most economically vulnerable strata of the population in the region due to unemployment and marginalization. Furthermore, the analysis of the academic preparation of this population places them at a disadvantage when competing for employment and, alternatively, this may justify the fact that this agricultural sector remains in the activity for between 5 and 50 years, in order to ensure food for their family and diversify income from the trade of the product. Another interesting fact is that the strongest stratum that cultivates *Vigna*s is the adult to elderly population, and this Morales-Morales *et al*., (2019) related that the crops developed mostly by the senile adult population implement management practices based on empiricism, which has implied a dynamic selection process, in which farmers conserve the plants that best adapt to their local conditions. It was also observed that the activity is inherited by the participation of a small stratum of young adults, which has allowed local varieties to be preserved through generations.

Frequency and varieties of *Vignas* cultivated

The high prevalence of bean cultivation among farmers in the area reinforces that this bean is an important food for the fed security of families in rural areas. Brush and Perales, (2007) reported that local crops allow the population to have a constant source of food. Furthermore, *V. unguiculata* is a specie native to Africa, however, farmers mentioned that the *Vignas* varieties they cultivated were conserved over the years adapted ones and well adapted to tropical climate conditions, Choudhary *et al*., (2017) mentioned that local varieties acquired greater resistance to specific pests and diseases and adapted better to climate change. The pole brown jew was

established as the most important variety of *Vigna*, because comparatively it was the most abundant crop (Figure 1) and the farmers expressed that they like this variety very much because of the ease of establishing it in monoculture or associated according to the need, but it also facilitates the cleaning of weeds and greater density of plants with greater coverage that favors the self-control of weeds in the lower stratum of the crop, by reducing the penetration of solar rays into the soil, advantages that they also described Yzarra-Aguilar *et al*., (2023) On the contrary, the farmers said that the varieties of the white, black and brown bean, are *Vignas* that grow like a pole and need a tutor to climb and spread, which is why they were preferably grown in association with corn plants. Among the drawbacks, the producers mentioned the difficulty of cleaning them. However, these varieties are still grown because they diversified the flavors in the dish, and the size of the seed translates into good results in terms of yield. Furthermore, the presence of nodules can favor nitrogen fixation in the soil and Yzarra-Aguilar *et al*., (2023) reported that associated crops prevented water and wind erosion of the soil, and specifically legumes play symbiotic roles by fixing atmospheric nitrogen (N) to the soil in a biological way due to the presence of nodules in the root system (Figure 6). (Sahoo *et al*., 2023) they reported that a cropping system involving corn and Catilla beans (*Vigna unguiculata* [L] Walp) decreased water erosion by reducing water runoff attributed to greater vegetation cover at ground level.

Figure 6. Nodules developed by *Vigna unguiculata* [L] Walp plants.
Figura 6. Nódulos desarrollados por plantas de *Vigna unguiculata* [L] Walp

Management practices developed by producers

The influence and trends of management practices presented in Figure 3 on the production, were related to the final density of the plant. Ciampitti and Vyn, (2011) stated that population density, distance between rows and plants were important factors in the agronomic management that determines the biomass production and grain yield of crops, similar to what was obtained in this study. Production systems for green beans (*V. unguiculata*) range from traditional practices to modern agricultural techniques. Doebley *et al*., (2006) reported that traditional practices are usually low-input but highly dependent on climatic conditions while modern practices use advanced technologies to maximize efficiency and minimize environmental impact. However, the productive aspect was not the only important factor among farmers, because they expressed that the associated cultivation provides other benefits to the soil such as reducing erosion and improving soil fertility attributed to the presence of the legume. Yzarra-Aguilar *et al*., (2023) they reported that associated crops of grasses and legumes are valuable to farmers due to the ability of grasses to reduce soil erosion and the increase in soil fertility attributed to legumes, in addition

to weed control and more stable nutrition. Jing-Xiu *et al*. (2021) they reported that legumes can fix nitrogen to the soil between 30 to 60 kg ha^{-1} per year, which can represent up to 40% in an associated cropping system. Sahoo *et al*. (2023) associated crops of corn with lower legumes, corn acts as a barrier against the winds, providing protection to lower legume crops by establishing a symbiotic relationship between crops. The correlation of fertilization with the seed production of the crop described in this study was similar to that observed by Sakpal *et al*. (2022) who reported a positive effect of fertilization on the growth and production of *V. unguiculata* L. Poudel *et al*. (2023) increased seed production with phosphorus fertilization in a *V. unguiculata* crop. This indicates the need to regulate soil mineral deficiencies so that crops can express greater productive potential.

Uses and profitability of cultivation

In the section on uses, it was observed that producers diversify the crop use, that is, they consume and sell it as green beans, as seeds, but also the leaves and straw remain as a remainder for animal feed. In terms of crop profitability, the results highlight the importance of *Vignas* in the family economy and in food security, especially in rural areas where low incomes and scarcity of employment predominate, for example, in Figure 5 it can be seen that 47% of what is produced is used for self-consumption in the form of seeds and 35% in the form of green beans. In the same figure it is perceived that the sustainability of the crop is attributed to the use for self-consumption which results in family savings by avoiding the purchase of food sustenance, in addition to the sale of green beans and seeds to have cash. (Olivares-Pérez *et al*., 2018; Olivares-Pérez *et al*., 2016; Olivares-Pérez *et al*., 2011) they also reported that diversification in the use of natural resources in production systems can increase economic benefits for family sustenance or satisfactions that reduce investment costs in the operation of the systems.

CONCLUSIONS

The cultivated varieties of the jew bean (*V. unguiculata* [L] Walp) were the brown pole bean, white bean, brown bush bean, and black bean. The most abundant variety was the shrub *Vigna* with brown seeds. The *Vignas* have been grown associated or monocultures and are sustainable, because it is an activity with more than fifty years of inheritance and develops men and women with family labor using adapted local varieties. Management practices that had a positive relationship with seed production were planting density, seeds per point at planting moment, cleaning frequency of weed and the amount of fertilizer added to the crop and the management practices that had a negative relationship with seed production were only the distance between plants and furrows. The *Vignas* in the region are marketed in the form of seeds and green beans, they are also a source of food for families and an option of the economic income.

LITERATURE CITED

Alvarado, G. J., Cobos, M. F., Gómez, V. J., & Medina, L. R. (2024). Manejo integrado de cultivos y desarrollo sostenible. *Magazine de Las Ciencias: Revista de Investigación e Innovación*, *9*(1), 22–35. https://doi.org/10.33262/rmc.v9i1.3049

Brush, S. B., & Perales, H. R. (2007). A maize landscape: Ethnicity and agro-biodiversity in Chiapas Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(3), 211-221. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.12.018

Carneiro - Da Silva, A., Da Costa - Santos, D., Lopes - Teixeira J. D., Bento - Da Silva, P., Cavalcante - Dos Santos, R., & Siviero, A. (2019). Chapter: A Strategic Legume Species for Food Security and Health. Book: legume seed Nutraceutical Research. *IntechOpen*, 2-22p. https://doi.org/10.5772/intechopen.79006

Carvalho, M., Castro, I., Matos, M., Lino-Neto, T., Silva, V., Rosa, E., & Carnide, V. (2016). Caracterização agro-morfológica de acessos de feijão-frade (*Vigna unguiculata*): bases

para o melhoramento. *Revista de Ciências Agrárias*, 39(4), 506–517. http://dx.doi.org/10.19084/RCA16091

Chandra, A., McNamara, K. E., Clissold, R., Tabe, T., & Westoby, R. (2023). Climate-Induced Non-Economic Loss and Damage: Understanding Policy Responses, Challenges, and Future Directions in Pacific Small Island Developing States. *Climate*, 11(3), 74, https://doi.org/10.3390/cli11030074

Choudhary, M., Singh, V., Muthusamy, V., & Wani, S. H. (2017). Harnessing Crop Wild Relatives for Crop Improvement. *LS: International Journal of Life Sciences*, 6 (2), 73-85. http://dx.doi.org/10.5958/2319-1198.2017.00009.4

Ciampitti, I. A., & Vyn, T. J. (2011). A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Research*, 121(1), 2–18. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.10.009

CONEVAL. (2020). Consejo nacional de evaluación de la política de desarrollo social. Indicadores de pobreza y carencias sociales: Municipio de Pungarabato. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/pungarabato?redirect=true#calidad-vida. Fecha de consulta: 12 de marzo del 2025.

De Conceico - Dos Santos, L.F., Ruiz - Sánchez, E., & Jimenez – Osorio, J. J. (2022). *caracterizacion de frijol caupi*. *321*(Caracterización agro-morfológica de 20 cultivares de frijol caupí (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) en Yucatán, México*). Acta Universitaria*, 32, e3216, http://doi.org/10.15174/au.2022.3216

Díaz–Solís, S., & Morejón–Rivera, R. (2018). Impacto de buenas prácticas agrícolas en el desarrollo de una finca en Los Palacios. *Avances*, *20*(4), 401–408. /https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=637869147004

Doebley, J. F., Gaut, B. S., & Smith, B. D. (2006). The Molecular Genetics of Crop Domestication. *Cell*, 127(7), 1309-1321. https://doi.org/10.1016/j.cell.2006.12.006

Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Bailey, B. A. (2005). Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(19–20), 2733–2757. https://doi.org/10.1080/00103620500303939

eyik, Ö., Hadjikakou, M., & Bryan, B. A. (2022). Climate-friendly and nutritionsensitive interventions can close the global dietary nutrient gap while reducing GHG emissions. *The Nature Food,* 4, 61–73. https://doi.org/10.1038/s43016-022-00648-y

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., et al. (2010). Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 327, 812–818. https://doi.org/10.1126/science.1185383

Godfray, H. C. J. (2014). El desafío de alimentar de manera equitativa y sostenible a 9.000-10.000 millones de personas. *The Journal of Agricultural Science*, 152 (S1), 2-8. https://doi.org/10.1017/S0021859613000774

Jing-Xiu, X., Ying-An, Z., Wen-Lian, B., Zhen-Yang, L., Li, T., & Yi, Z. (2021). Yield performance and optimal nitrogen and phosphorus application rates in wheat and faba bean intercropping. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(11), 3012–3025. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63489-X

Kotir, J. H. (2011). Climate change and variability in Sub-Saharan Africa: A review of current and future trends and impacts on agriculture and food security. *In Environment, Development and Sustainability*, 13(3), 587–605. https://doi.org/10.1007/s10668-010-9278-0

Mehrabi, Z., Ellis, E. C., & Ramankutty, N. (2018). The challenge of feeding the world while conserving half the planet. *Nature Sustainability*, 1, 409–412. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0119-8

Morales - Morales, A. E., Andueza - Noh, R. H., Marquez - Quiroz, C., Benavides - Mendoza, A., Tun - Suarez, J. M., Gonzalez - Moreno, A., & Alvarado - López, C. J. (2019). Caracterización morfológica de semillas de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) de la Península de Yucatán. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 6(18), 463–475. https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2171

Myers, S. S., Smith, M. R., Guth, S., Golden, C. D., Vaitla, B., Mueller, N. D., Dangour, Alan D. & Huybers P. (2017). Climate change and global food systems: potential impacts on

food security and undernutrition. *Annual Review and Public Health*, 38, 259–277. https://doi.org/10.1146/annurevpublhealth-031816-044356

Olivares - Pérez, J., Rojas - Hernández, S., Quiroz - Cardozo, F., Camacho - Díaz, L. M., Cipriano - Salazar, M., Damián - Valdez, M. A., Ávila - Morales, B., & Villa - Mancera, A. (2018). Diagnóstico de los usos, la distribución y características dasométricas del árbol cirián (*Crescentia alata* kunth) en el municipio de Pungarabato, Guerrero, México. *Polibotánica*, 45, 191-204, https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.14

Olivares-Pérez, J., Avilés-Nova, F., Albarrán-Portillo, B., Rojas-Hernández, S., & Castelán-Ortega, O. A. (2011). Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 739-748. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200032&lng=es&tlng=es

Olivares-Pérez, J., Rojas-Hernández, S., Avilés Nova, F., Camacho-Díaz, L. M., Cipriano-Salazar, M., Jiménez-Guillén, R., & Quiroz-Cardozo, F. (2016). Non-leguminous trees in silvopastoral systems. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8), 123-202. https://doi.org/10.19136/era.a3n8.880

Poudel, A., Adhikari, B. B., & Shrestha, J. (2023). Growth and yield of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under different levels of phosphorous and seed inoculation with rhizobium. *Agronomy Journal of Nepal*, 7(1): 9-15. DOI: https://doi.org/10.3126/ajn.v7i1.62056

Reyes - González, F., Galvis - Spinola, A., Almaraz - Suárez, J. J., Hernández - Mendoza, T. M., Reyes - González, F., Galvis - Spinola, A., Almaraz - Suárez, J. J., & Hernández - Mendoza, T. M. (2021). Modelo estadístico para la predicción del rendimiento de grano en maíz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(3), 447–459. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i3.2482

Reynolds, J. W., Fragoso, C., & Guerra, C. (1995). New earthworm records from Belize C.A. (Oligochaeta: Acanthodrilidae, Eudrilidae, Glossoscolecidae, Megascolecidae, Ocnerodrilidae and Octochaetidae). *Megadrilogica,* 6(7), 63-72. https://www.researchgate.net/publication/237075852_REYNOLDS_JW_FRAGOSO_C_and_C_GUERRA_1995_New_earthworm_records_from_Belize_CA_Oligochaeta_Acanthodrilidae_Eudrilidae_Glossoscolecidae_Megascolecidae_Ocnerodrilidae_and_Octochaetidae_Megadrilogica_6763-

Ruben, R., Cavatassi, R., Lipper, L., Smaling, E., & Winters, P. (2021). Towards food systems transformation—five paradigm shifts for healthy, inclusive and sustainable food systems. *Food Security*, 13, 1423–1430. https://doi.org/10.1007/s12571-021-01221-4

Sahoo, U., Maitra, S., Dey, S., Vishnupriya, K. K., Sairam, M., & Sagar, L. (2023). Unveiling the potential of maize-legume intercropping system for agricultural sustainability: A review. *Farming & Management*, 8(1), 1-13. http://dx.doi.org/10.31830/2456-8724.2023.FM-124

Sakpal, V. M., Jagtap, D. N., Upadhyay, L., Pinjari, S. S., More, S. S., Jadhav, M. S. & Bodake, P. S. (2022). Effect of foliar application of different organic sources and levels of fertilizer on growth attributes, yield attributes, yield, quality and economics of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Agricultural Science Digest*, 42(4): 414-419. https://doi.org/10.18805/ag.D-5286

SAS. (2021). Statistical Analysis Software SAS/STAT®, Release 3.1.0. SAS Institute Inc.: Cary, NC, USA. Available online: SAS OnDemand for Academics. Accessed on march 01 2025.

SIAP. (2022). Datos abiertos | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gob.mx. https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/datos-abiertos-35224. Accessed on February 05 2025.

SIAP. (2023). Datos abiertos | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gob.mx. https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/datos-abiertos-35224. Accessed on February 05 2025

Recibido:
3/agosto/2024

Aceptado:
2/junio/2025

Thrusfield, M., Ortega, C., de Blas, I., Noordhuizen, J. P., & Frankena, K. (2001). WIN EPISCOPE 2.0: improved epidemiological software for veterinary medicine. *Veterinary Record*, 148(18), 567–572. https://doi.org/10.1136/vr.148.18.567

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 20260–20264. https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108

Valdés - Márquez, H., Pérez–Martín, G., & La Hoz–Hernández, L. J. (2023). Efecto de extractos vegetales sobre el cultivo de la habichuela. *Avances*, 25(3), 4010-423. http://avances.pinar.cu/index.php/publicaciones/

Van - Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L., & Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food,* 2, 494–501. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De-Vries, W., Sibanda, L. M., Afshin, S., Chaudhary, A., Herrero, M., Agustina, R., Branca, F., Lartey, A., Fan, S., Crona, B., Fox, E., Bignet, V., Troell, M., Lindahl, T., Singh, S., Cornell, S. E., Reddy, S. K., Narain, S., Nishtar, S., & Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–lancet commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet,* 393, 447–492. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4

Yzarra-Aguilar, A., Hinojosa-Yzarra, L. A., Quispe-Villanueva, M. M., Muñoz-Avila, V., & Cruz-Quispe, B. (2023). Importancia de la asociación de leguminosas con cereales: caso de soya y maíz Importance of the association of legumes with cereals: case of soybean and maize. *Scientific Research Journal,* 3(6), 42–57. https://doi.org/10.53942/srjcidi.v3i6.208

Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, M., Yao, Y., Bassu, S., Ciais, P., Durand, J. L., Elliott, J., Ewert, F., Janssens, I. A., Li, T., Lin, E., Liu, Q., Martre, P., Müller, C., Peng, S., Peñuelas, J., Ruane, A. C., Wallach, D., Wang, T., Wu, D., Liu, Z., Zhu, Y., Zhu, Z., & Asseng, S. (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, 9326–9331. https://doi.org/10.1073/pnas.1701762114

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

MANEJO DEL RAMÓN (*Brosimum alicastrum* Sw.) EN HUERTOS FAMILIARES DE TZUCACAB, YUCATÁN, MÉXICO

RAMÓN (*Brosimum alicastrum* Sw.) MANAGEMENT IN HOMEGARDENS OF TZUCACAB, YUCATÁN, MÉXICO

Mex Mex, R.E., J.J. Jiménez Osornio, P.I. Montañez-Escalante, H. Estrada Medina, G.C. Reyes Solis

MANEJO DEL RAMÓN (*Brosimum alicastrum* Sw.) EN HUERTOS FAMILIARES DE TZUCACAB, YUCATÁN, MÉXICO
RAMÓN (*Brosimum alicastrum* Sw.) MANAGEMENT IN HOMEGARDENS OF TZUCACAB, YUCATÁN, MÉXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. **60**: 395-410 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.24

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 395-410 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Manejo del ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.) en huertos familiares de Tzucacab, Yucatán, México

Ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.) management in homegardens of Tzucacab, Yucatán, México

Rosalba Esther Mex Mex https://orcid.org/0000-0003-1210-9575
Juan José Jiménez-Osornio / josornio@correo.uady.mx
https://orcid.org/0000-0001-8240-3230
Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales
Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias
Universidad Autónoma de Yucatán. Carretera Xmatkuil km 15.5

Patricia Irene Montañez-Escalante https://orcid.org/0000-0002-7038-6231
Héctor Estrada-Medina https://orcid.org/0000-0002-1081-5655
Departamento de Manejo y Conservación de Recursos Naturales Tropicales
Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Autónoma de Yucatán
Carretera Xmatkuil km 15.5

Guadalupe del Carmen Reyes-Solís https://orcid.org/0000-0002-2362-8541
Laboratorio de Microbiología, Centro de Investigaciones Regionales Dr. Hideyo Noguchi,
Universidad Autónoma De Yucatán
Av. Itzaes, No. 490 x calle 59. Col. Centro, C.P.97000

RESUMEN: Los huertos familiares son sistemas agroforestales donde se encuentran especies arbóreas, arbustivas y herbáceas multipropósito en íntima relación con animales domésticos. Una de las especies arbóreas con diferentes usos potenciales es *Brosimum alicastrum* Sw. (ramón). El objetivo del presente trabajo fue caracterizar el uso y manejo del ramón en huertos de Tzucacab, Yucatán. Se realizaron 86 entrevistas semiestructuradas, al azar en huertos familiares con ramón, en tres comisarías de este municipio: Catmis (31), Nohbec (34) y Pisteakal (21). Las entrevistas incluyeron preguntas sobre el manejo y conocimiento tradicional del ramón y se realizó observación participante en todos los huertos. Los entrevistados mencionaron que los usos tradicionales son el medicinal, ornamental, forrajero, alimentario y como sombra. El 90% mencionó que utilizan las hojas para la alimentación de animales, algunos usan las semillas para la venta y la resina como medicina. Señalan que esta especie "sale sola" y algunos la siembran. Se registró una abundancia promedio de cinco ramones en Catmis, once en Nohbec y nueve en Pisteakal. Se obtuvo una correlación significativa y moderada entre el tamaño del huerto y el número de ramones (Catmis [r_s=0.5076, $p<0.05$], Nohbec [r_s=0.6296, $p<0.05$] y Pisteakal [r_s=0.5406, $p<0.05$]). Dos prácticas de manejo se realizan: el riego en los primeros años de vida y las podas, actividad que se realiza de manera anual y con una poda del follaje mayor al 90%. Representa una fuente de ingresos para el 55% de los entrevistados en el período de enero-abril. El ingreso por la venta del follaje depende del tamaño del árbol con valores entre 2.5 y 32.5 USD, mientras que el kilogramo de semillas en Catmis y Nohbec se compra a 3.2 USD, y por plántula entre 0.1 a 0.3 USD en Nohbec y Pisteakal. Se concluye que el ramón es una especie con gran potencial y prometedor valor económico, alimentario y ecológico.
Palabras clave: Conocimiento tradicional, especie multipropósito, forraje, podas, prácticas de manejo.

Mex Mex, R.E., J.J. Jiménez-Osornio, P.I. Montañez-Escalante, H. Estrada Medina, G.C. Reyes Solis

MANEJO DEL RAMÓN *Brosimum alicastrum* Sw. EN HUERTOS FAMILIARES DE TZUCACAB, YUCATÁN, MÉXICO

RAMÓN (*Brosimum alicastrum* Sw.) MANAGEMENT IN HOMEGARDENS OF TZUCACAB, YUCATÁN, MÉXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 395-410. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.24

Núm. 60: 395-410 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

ABSTRACT: Homegardens are agroforestry systems where multipropose tree, shrub and herbaceous species are found in close relationships with domestic animals. One of the tree species with different potential uses is *Brosimum alicastrum* Sw. (ramon). The objective of this study was to characterize the use and management of *B. alicastrum* in homegardens in Tzucacab, Yucatán. Eighty-six semi-structured interviews were conducted randomly in homegardens which had *B. alicastrum* in three places of this municipality: Catmis (31), Nohbec (34), and Pisteakal (21). The interviews included questions about knowledge and traditional management of the tree species. Participant observation was conducted in each homegarden. Interviewees reported traditional uses of ramon as medicinal, ornamental, forage, food and shade. Ninety percent reported using leaves for animal feed, some sell the seeds, and the resin is used as medicine. They note that this species "grows on its own," and some plant it. An average abundance of five “ramones” was recorded in Catmis, eleven in Nohbec and nine in Pisteakal. A significant and moderate correlation was found between the size of the homegardens and the number of ramon trees (Catmis [r_s=0.5076, $p<0.05$], Nohbec [r_s=0.6296, $p<0.05$] and Pisteakal [r_s=0.5406, $p<0.05$]). Two management practices are carried out, irrigation in the first years of life, and pruning, an activity performed annually, with more than 90% of the foliage removed. It represents a source of income for 55% of those interviewed in the period January-April. Income depends on tree size, with forage values ranging from 2.5 to 32.5 USD, seeds in Catmis and Nohbec are sold at 3.2 USD per kilogram, and 0.1 to 0.3 USD per seedling in Nohbec and Pisteakal. It is concluded that ramon is a species with great potential and promising economic, nutritional, and ecological value.
Key words: Forage, multipurpose species, pruning, management practices, traditional knowledge.

INTRODUCCIÓN

La permanencia de los mayas en Yucatán hace más de 5000 años se debió al desarrollo de una estrategia de manejo múltiple de la biodiversidad que les permitió aprovechar los recursos naturales a pesar de las condiciones geofísicas y climáticas poco favorables del sureste mexicano (Castañeda-Navarrete *et al.*, 2018).

Los agroecosistemas desarrollados por los mayas como las milpas, huertos familiares y selvas manejadas pueden clasificarse como sistemas agroforestales, donde se encuentran especies arbóreas, arbustivas y herbáceas de uso múltiple en íntima relación con los animales domésticos (Montañez-Escalante *et al.*, 2012). En la actualidad, son considerados reservorios para la conservación *in situ* del germoplasma nativo y de la identidad cultural, social, biológica y agronómica (Chablé-Pascual, 2013).

Los huertos familiares mayas en Yucatán se localizan alrededor de las casas, en ellos se cultiva, tolera y maneja una gran cantidad de especies de plantas domesticadas y silvestres (Montañez-Escalante *et al.*, 2012). Estos agroecosistemas presentan una alta variabilidad en cuanto a composición, complejidad, estructura y tamaño, y se modifican de acuerdo con los intereses de los propietarios, ya que su función principal es satisfacer las necesidades alimenticias de la familia (Cabrera-Pacheco, 2014; Fortuny-Fernández *et al.*, 2024; Jiménez-Osornio *et al.*, 1999).

Los huertos familiares poseen árboles que proveen diferentes productos tales como alimento, forraje, sombra, leña y materiales de construcción (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017). Algunos de ellos son de uso múltiple como el ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.) que es utilizado como: forraje, sombra, leña, frutal, alimento y medicinal. El ramón es una de las especies más frecuentes y dominantes que se pueden encontrar en los huertos familiares de Yucatán, por ello es considerada una especie pilar y estructural (Jiménez-Osornio *et al.*, 1999, 2003). Su nombre científico proviene del griego *brosimos* que significa comestible, y se ha postulado que después del maíz, fue importante como alimento de subsistencia para los mayas del periodo clásico (años del 250 al 900 d.C.) (Puleston, 1968). A la llegada de los españoles, el uso cambió por ser un excelente forraje disponible en la época de estiaje. Es un árbol multiusos del que pueden

Núm. 60: 395-410 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

aprovecharse todas sus estructuras, desde las hojas, frutos, semillas, tallo hasta el látex (Herrera Chan *et al.*, 2024). Sin embargo, al ser una especie cuyas hojas se utilizan como forraje por su calidad nutricia y disponibilidad en la época de secas, actualmente se utiliza principalmente en la producción animal (Sarmiento-Franco *et al.*, 2022).

A pesar del potencial del ramón como cultivo adaptado a ambientes marginales y como alimento humano con alto valor nutricional, en la actualidad es escasa la literatura publicada sobre el manejo que recibe y las formas de aprovechamiento campesino que practican las familias en los huertos familiares de Yucatán. El objetivo del presente trabajo fue caracterizar las prácticas de manejo y uso para *B. alicastrum* en huertos familiares del municipio de Tzucacab, Yucatán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en las comisarías de Catmis, Nohbec y Pisteakal, pertenecientes al municipio de Tzucacab (Figura 1), ubicado en la zona sur de Yucatán, a 135 km de la ciudad de Mérida. Limita al norte con el municipio de Tixmehuac y Chacsinkín, al sur con el estado de Quintana Roo, al este con Peto y al oeste con Tekax (SEFOE, 2013). Su altitud sobre el nivel del mar varía de 10 a 150 m con una superficie de 77000 ha, posee un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 26 ^{0}C, precipitación media anual de 1,125.3 mm (con mayor precipitación de junio a septiembre) y una vegetación de tipo selva mediana subperennifolia y subcaducifolia (Zamora-Crescencio *et al.*, 2008). La población económicamente activa básicamente se dedica a actividades primarias como la agricultura y ganadería (INEGI, 2020).

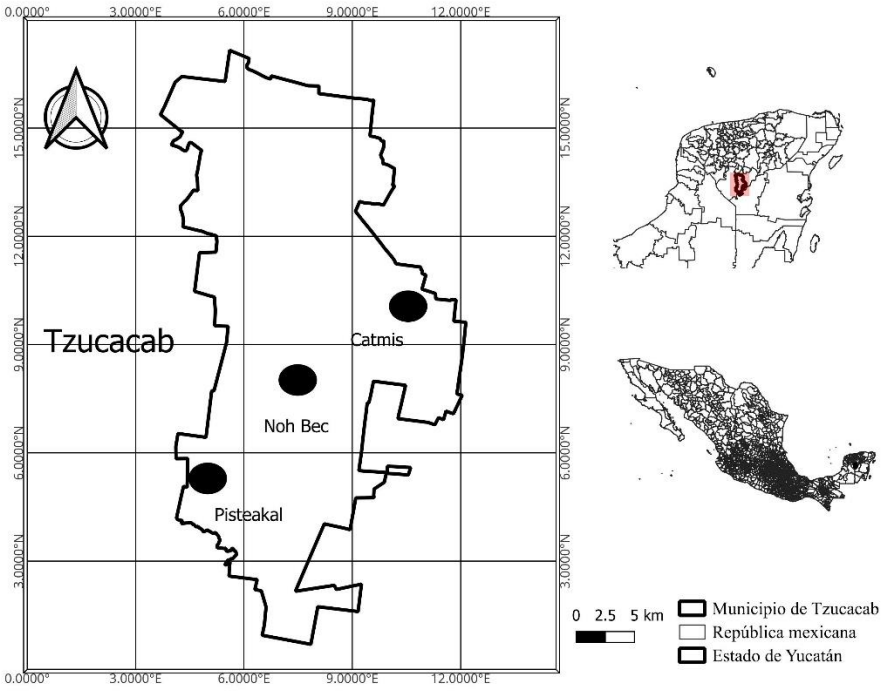


Figura 1. Ubicación de las tres comisarias estudiadas del municipio de Tzucacab, Yucatán.
Figure 1. Location of the three study sites from Tzucacab municipality.

MÉTODOS

Durante los meses noviembre 2015 a mayo 2016 se aplicaron aleatoriamente 86 entrevistas semiestructuradas en hogares que tenían la especie en sus huertos, a jefas, jefes de familia o a la persona responsable, previa firma de consentimiento informado. El cálculo del tamaño de muestra se realizó de acuerdo con el número total de hogares por comunidad proporcionado por los centros de salud y mediante la aplicación de la fórmula para poblaciones finitas (Aguilar-Barojas, 2005) (Ecuación 1). Se aplicaron 21 entrevistas en Pisteakal, 34 en Nohbec y 31 en Catmis. La unidad de muestreo fueron los huertos familiares o casa habitación. El instrumento utilizado para las entrevistas incluyó 45 preguntas divididas en tres secciones: 1) Aspectos generales y socioeconómicos de los entrevistados, 2) Características del huerto y actividades que se realizan, y 3) Uso (partes útiles de la planta, formas de uso y preparación, transmisión de conocimiento) y manejo del ramón (origen y prácticas que realizan). Así también, se utilizó el método de observación participante y recorridos al visitar los 86 huertos de las personas entrevistadas, cuyas preguntas acerca del número de ramones y distribución se colocaron en una cuarta sección del instrumento (Anexo 1). Los datos obtenidos se procesaron en una hoja de cálculo de Excel®, y el análisis se realizó mediante promedios, frecuencias y porcentajes.

$$n = \frac{N * Z_a^2 * p * q}{d^2 * (N-1) + Z_a^2 * p * q}$$

Ecuación 1: Estimación del tamaño de muestra para estudios finitos
N es el total de casas/huertos familiares (población).
Z^2_a es 1.96 al cuadrado (95% de confianza).
p es la proporción esperada (0.05).
q es 1-p (0.95).
d^2 es la precisión (5%).

Para conocer si existe relación entre el tamaño del huerto y el número de árboles presentes en los huertos por comunidades, se calculó el coeficiente de asociación de Spearman (datos no paramétricos) (Mendivelso, 2022) en el programa R studio® (RStudio Team, 2020); donde la correlación es débil si es menor a 0.20, baja entre 0.20 y 0.40, moderada entre 0.40 y 0.60, fuerte entre 0.60 y 0.80 y muy fuerte con valores mayores a 0.80.

RESULTADOS

Generalidades de los huertos familiares

En las casas entrevistadas existen familias nucleares y extensas compuestas por los padres, madres, hijos (as) y en algunos casos abuelos (as). Las edades de los entrevistados estuvieron comprendidas entre 15 y 89 años (Tabla 1). Todos los entrevistados fueron de origen maya. El tamaño promedio de los huertos fue de 1402 m^2 en Catmis, 1761 m^2 en Nohbec y 1440 m^2 para Pisteakal.

Tabla 1. Características generales de los entrevistados por comunidad.
Table 1. General characteristics of the interviewees by community.

Comunidad	Edades	Sexo*	Tamaño de los huertos m²**
Catmis (n=31)	15-20=0 21-39=9 >40=22 Promedio=46 [46±5.15]	Hombre (H)=13 Mujer (M)=18 [21-39=2 H, 7 M >40=11 H, 11M]	Min=400 Max=3200 Promedio=1402 [1402±354.46]
Nohbec (n=34)	15-20=2 21-39=14 >40=18 Promedio=43 [43±5.76]	Hombre (H)=7 Mujer (M)=27 [15-20=2 M 21-39=1 H, 13 M >40=5 H, 13M]	Min=520 Max=3800 Promedio=1761 [1761±385.76]
Pisteakal (n=21)	15-20=1 21-39=8 >40=12 Promedio=41 [41±6.44]	Hombre (H)=15 Mujer (M)=6 [15-20=1 H 21-39=6H, 2 M >40=8H, 4M]	Min=500 Max=3000 Promedio=1440 [1440±352.88]

*H=Hombre (men), M=M=mujer (women); **Min= mínimo (mínimum), Max=máximo (maximus).

En cuanto a las ocupaciones, en Catmis se encontraron 55% amas de casa, 39% realizan actividades agropecuarias y el 6% fueron comerciantes. Para Nohbec 65% fueron amas de casa, 18% realizan actividades agropecuarias, 9% comerciantes, 3% actividades turísticas, 2% actividades de bordado y costura y 3% estudiantes de preparatoria. En Pisteakal fueron 62% amas de casa, 24% realizan actividades agropecuarias, 9% comerciantes y 5% estudiantes de preparatoria. En cuanto a las actividades que se realizan en los huertos, las mencionadas fueron: el chapeo, el deshierbe, el riego, la poda, la siembra de plantas, la fertilización y aplicación de herbicidas, así como la quema de hojas y residuos en general. Estas actividades las realizan todos los que viven en el hogar de manera habitual, pero en Nohbec las realizan con mayor frecuencia los padres y en Pisteakal las madres (Figura 2).

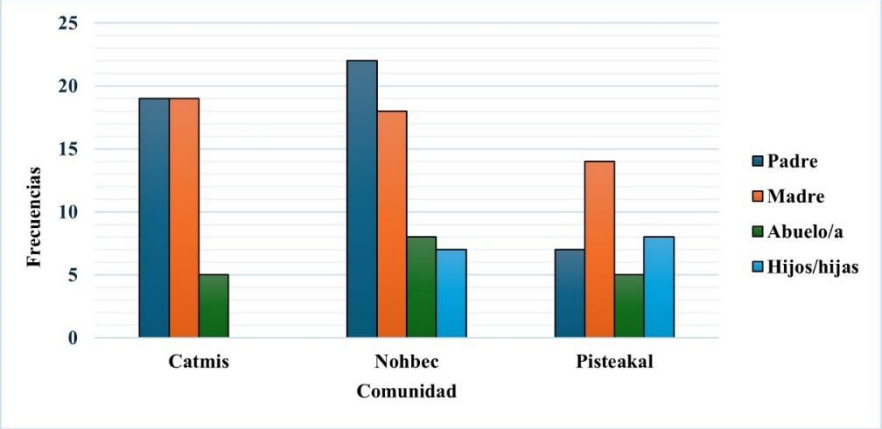


Figura 2. Encargados de las actividades en los huertos según los entrevistados de Catmis (n=31), Nohbec (n=34) y Pisteakal (n=21).
Figure 2. Managers of homegarden activities according to the interviewees from Catmis (n=31), Nohbec (n=34) and Pisteakal (n=21).

Las personas entrevistadas mencionaron que en sus huertos familiares poseen: árboles frutales y maderables, plantas ornamentales, aromáticas, hortalizas, y animales de traspatio. La presencia de animales se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Presencia de animales en huertos por comunidad en Tzucacab, Yucatán.
Table 2. Animal presence in homegardens in Tzucacab communities, Yucatán.

	Animales en los huertos				
Comunidad	Aves	Cerdos	Caballos	Borregos	Bovinos
Catmis (n=31)	30	9	2	2	1
Nohbec (n=34)	28	9	2	5	3
Pisteakal (n=21)	18	12	1	1	0

Uso de *Brosimum alicastrum* Sw.

El nombre maya de *B. alicastrum* es *o´ox* y en español ramón, todos los entrevistados indicaron que forma parte de la vegetación natural propia de la región referida como "monte". La importancia del ramón es económica y cultural, muy pocos indicaron que es alimentaria y ecológica (Figura 3).

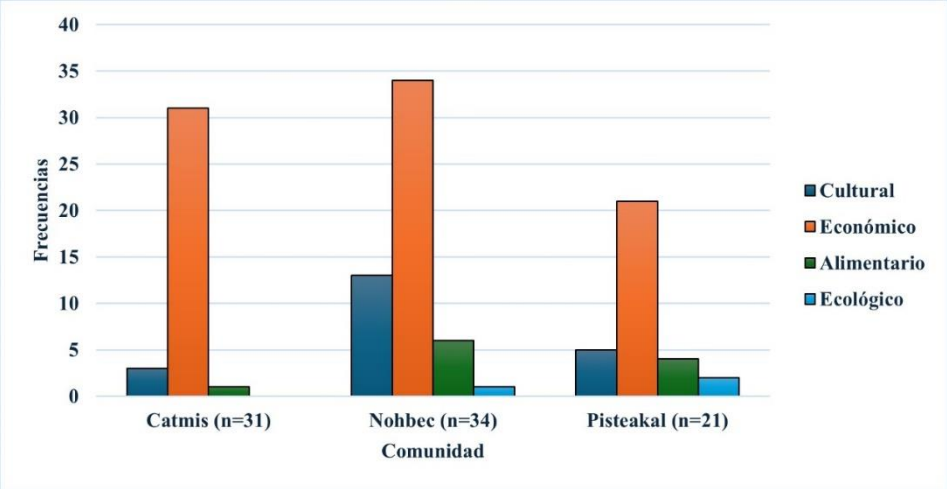


Figura 3. Importancia del ramón de acuerdo con los entrevistados Catmis, Nohbec y Pisteakal.
Figure 3. "Ramon" importance according to the interviewees Catmis, Nohbec and Pisteakal.

Los usos tradicionales del ramón que se mencionaron fueron: forraje, medicinal, ornamental, alimento, leña y como abono. Sólo en la comunidad de Nohbec se mencionaron todos los usos (Figura 4a). Sin embargo, su uso actual es principalmente forrajero, sombra y alimento (Figura 4b).

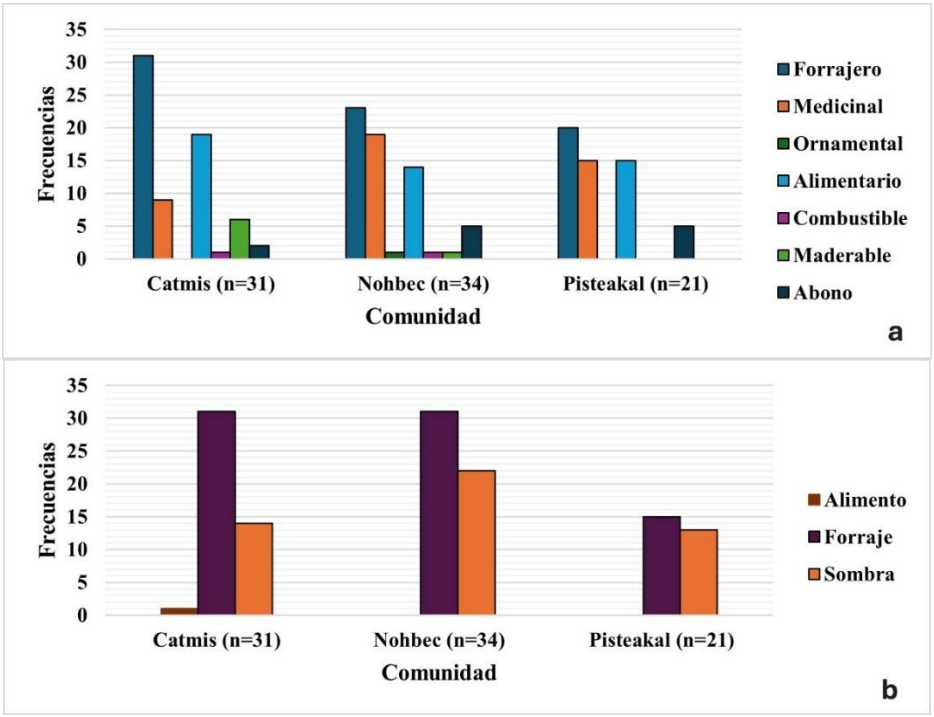


Figura 4a. Usos tradicionales de acuerdo con los entrevistados. **Figura 4b.** Usos actuales en las diferentes comunidades.
Figure 4a. Traditional uses according to the interviewees. **Figure 4b.** Current uses in different communities.

En cuanto a las partes utilizadas del ramón, todos mencionaron las hojas como forraje, unos cuantos, a los frutos, las semillas, resina y corteza explicando para qué y cómo lo utilizan (Tabla 3). Asimismo, mencionan que los árboles se consideran importantes de manera cultural por su relación con los mayas, y ecológica porque el gobierno las usa para reforestar.

Tabla 3. Usos de estructuras del ramón según entrevistados en comunidades de Tzucacab, Yucatán.
Table 3. "Ramon" uses structures according to the interviewees in Tzucacab communities, Yucatán.

Parte utilizada	Catmis (n=31)	Nohbec (n=34)	Pisteakal (n=21)
Corteza	Abono	Se prepara con agua para el asma	No conocen sus usos
Hojas	Alimentación animal	Alimentación animal	Alimentación animal
Fruto	Alimento humano	Alimento humano	Alimento humano
Resina	Medicinal (se prepara como infusión de agua y sal para el asma, "asesido" y tos, a veces se combina con miel; para dolor de muelas)	Medicinal (se prepara como infusión de agua caliente para el asma, "asesido" y tos). Alimento humano (como atole para fortalecer)	No conoce sus usos
Semilla	Alimento humano (se sancocha, tuesta y muele para hacer tortillas y café)	Alimento humano (se tuesta y muele para hacer tortillas y café; para hacer masa y para estimular la producción de leche materna	Alimento humano (se tuesta y muele para hacer tortillas

Manejo de *Brosimum alicastrum* Sw.

El número de individuos de *B. alicastrum* Sw. por huerto mencionados y observados se menciona en la Tabla 4**.** De acuerdo con los entrevistados, en algunos huertos de gran tamaño (>2000), mencionaron tener más 100 individuos (considerando plántulas, juveniles y adultos), mientras que al realizar las observaciones no se consideraron plántulas e individuos menores a 1 m de altura. De acuerdo con el análisis del coeficiente de correlación de Spearman (r_s), se encontró una relación lineal positiva estadísticamente significativa, moderada y directamente proporcional, entre el tamaño del huerto y el número de ramones presentes en Catmis (r_s=0.5076, $p<0.05$), Nohbec (r_s=0.6296, $p<0.05$) y Pisteakal (r_s=0.5406, $p<0.05$).

Tabla 4. Individuos de ramón mencionados y observados por huerto en comunidades de Tzucacab, Yucatán.
Table 4. Mentioned and observed "ramon" individuals per homegarden in Tzucacab communities, Yucatán.

Comunidad	Individuos mencionados	Individuos observados (>1 m de altura)
Catmis (n=31)	Min= 1 Max=20 Promedio=5	Min=5 Max=14 Promedio=5
Nohbec (n=34)	Min=1 Max=300 Promedio=20	Min=1 Max=50 Promedio=11
Pisteakal (n=21)	Min=1 Max=200 Promedio=17	Min=1 Max=45 Promedio=9

Las edades de los individuos fueron estimadas por los entrevistados, en Nohbec se encontró mayor número individuos entre 1 a 5 años y mayores a 15 años. En Catmis se mencionaron en mayor cantidad individuos mayores a 15 años (Figura 5).

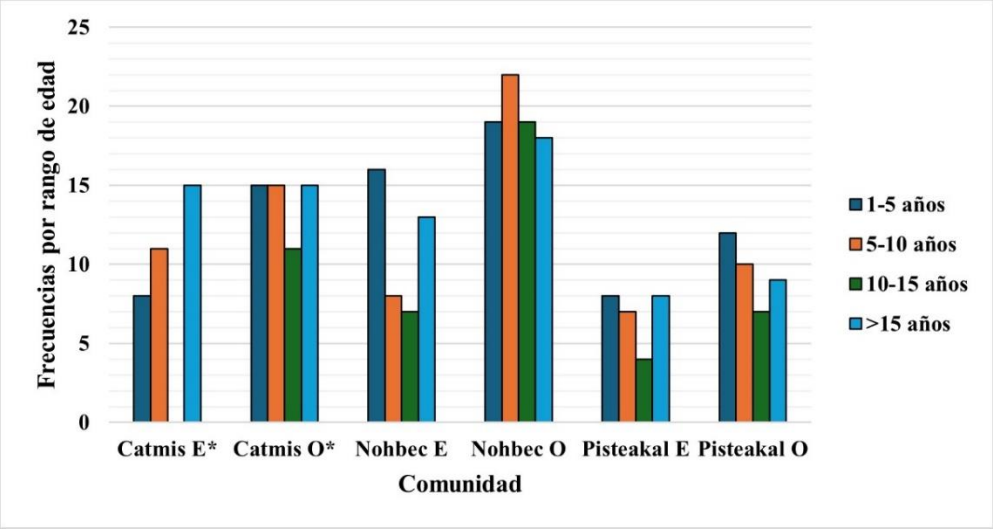


Figura 5. Presencia de *Brosimum alicastrum* Sw. por rango de edades aproximadas en huertos según los entrevistados y observación en comunidades de Tzucacab, Yucatán. (E*= Entrevistados, O*=Observados).
Figure 5. *Brosimum alicastrum* Sw. presence by approximate age range in homegardens according to interviewees and observations in Tzucacab communities, Yucatán (E*= interviewees, O*= Observed).

En las tres comunidades estudiadas, la mayor parte de los individuos son tolerados y en menor número fueron sembrados, sólo en Nohbec no hubo árboles cuando se establecieron los huertos familiares (Figura 6).

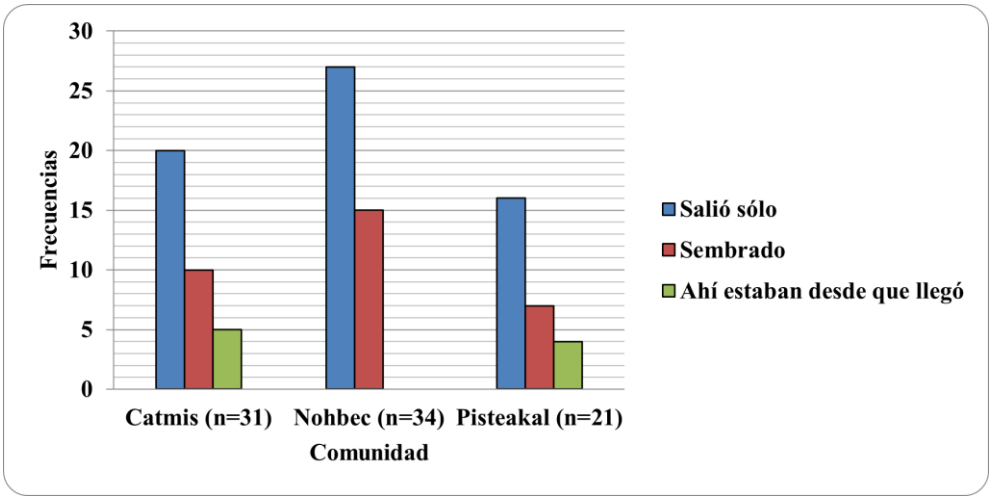


Figura 6. Origen de los árboles de *Brosimum alicastrum* Sw. de acuerdo con los entrevistados en comunidades de Tzucacab, Yucatán.

Figure 6. *Brosimum alicastrum* Sw. tree origin according to interviewees in Tzucacab communities, Yucatán.

En cuanto a las prácticas de manejo son dos las mencionadas para su mantenimiento: riego y podas. Los entrevistados(as) mencionaron que las podas se realizan a partir de que los individuos alcanzan una altura de 2 m, en el periodo de sequía (entre enero y abril), y el 90% las realizan de manera anual en la época de estiaje y sólo un 10% semestral. Las podas son intensivas, entre el 80 y 100% del follaje (Figura 7a), y éstas las realizan con machetes, los miembros del hogar y compradores en las tres localidades de Tzucacab (Figura 7b). El 45% de los entrevistados afirmó utilizarlo para autoconsumo y el 55% como una fuente de ingresos extra y lo vende a ganaderos de la misma comunidad o comunidades cercanas. El ingreso que se obtiene depende del tamaño del árbol, pero principalmente por la cantidad del follaje que se pueda obtener (Figura 7c), se mencionaron valores entre 2.5 y 32.5 USD cuando se vende por árbol en las tres localidades, es decir, por todo el follaje y ramas; 3.2 USD por kilogramo de semillas en Catmis y Nohbec, y de 0.1 a 0.3 USD por plántula en Nohbec y Pisteakal.

Figura 7. a) Individuo de ramón podado, b) Comprador podando árbol con machete, c) Follaje cortado en localidades en Tzucacab, Yucatán.
Figure 7. a) Pruned "ramon" tree, b) buyer pruning tree using bowie knife, c) foliage cut off in Tzucacab communities, Yucatán.

De manera general en Tzucacab, el 54% de los entrevistados mencionó no saber el período de floración del ramón, mientras que un 29% indicó que la época se da en mayo-junio, 11% entre julio, 5% en agosto y 1% dijo que no florece. Para la fructificación, el 39% mencionó que no sabe, el 35% que es en el periodo de agosto a octubre y el 26% entre julio y septiembre.
Las personas indicaron que la distribución del ramón en sus solares es conglomerada (56%) porque hay gran cantidad de individuos juveniles debajo de los árboles adultos, aleatoria (43%), en diferentes puntos del huerto, desde la entrada, el huerto y como cerco vivo, y uniforme (1%).

DISCUSIÓN

Generalidades de los huertos familiares

Las actividades que se desempeñan en los huertos de Catmis y Nohbec las realizan tanto hombres como mujeres, mientras que en Pisteakal la mayoría son mujeres. Las labores del huerto se han vinculado fuertemente a roles femeninos, sin embargo, en este estudio encontramos que éstas se comparten lo que coincide con el trabajo realizado por Velasco Morón (2023). En cuanto a las ocupaciones, se resalta que los hombres se dedican a la agricultura y ganadería, puesto que Tzucacab destaca por su relevancia ganadera en la zona sur (INEGI, 2020).
En el presente estudio se encontraron huertos que varían desde los 400 hasta 3600 m^2 con una media aproximada de 1400 m^2, rango que se encuentran reportado en diferentes huertos de Yucatán y compilado en el estudio de Castañeda-Navarrete *et al.* (2018). Asimismo, la variación en la estructura y la diversidad de elementos productivos como la diversidad florística y la variedad de animales está relacionada con las características de la vegetación y lugar de establecimiento (Fortuny-Fernández *et al.*, 2024; Tegoma-Coloreano *et al.*, 2023).
Las actividades más importantes y que se realizan a lo largo del año, son el chapeo, práctica realizada para eliminar arvenses y plantas que no son de interés; el riego, fundamental para

mantener el huerto y las plantas sobre todo hortalizas y el ramón requiere de riegos de apoyo en la época de secas durante los primeros cinco años (Quejereta, *et al.*, 2007); en los huertos se utiliza tanto el riego como el agua de lavado de ropa para regar las plantas. Adicionalmente las podas al ramón se realizan por motivos económicos (para venta de forraje) y de mantenimiento (para que las plantas crezcan vigorosas y su energía se concentre en el tronco, así como para evitar daños a la vivienda o cables eléctricos) (Guerrero-Salazar y Vera-Márquez, 2014; Pérez-Hernández *et al.*, 2023). Se ha demostrado que el árbol es posible empezar a podarlo a partir del segundo año y que no hay impacto en la altura ni en las características dasométricas de los individuos (Tadeo-Noble *et al.*, 2025). En los árboles adultos la poda puede ser total y los productores la hacen anualmente para obtener forraje con ramas poco lignificadas.

Uso de *Brosimum alicastrum* Sw.

Los entrevistados indicaron que el ramón forma parte de la vegetación propia de la región. En contraste, estudios en huertos familiares de Yucatán como el de Guerrero-Salazar y Vera-Márquez (2014) reportan que la gente desconoce si pueden encontrar al ramón en la vegetación (monte). Sin embargo, se conoce que crece ampliamente de manera silvestre en selvas perennifolias y subcaducifolias (Santillán-Fernández *et al.*, 2023), y en huertos se observa de manera abundante debido a que es una especie tolerada y manejada desde la época prehispánica (Rivas Novelo *et al.*, 2019), y que también ha sido cultivada. Ferrer *et al.* (2021) muestran que *B. alicastrum* está en proceso de domesticación y el flujo genético entre las poblaciones silvestres y las que se encuentran en los huertos familiares es importante.

La abundancia del ramón se ve influenciada por el origen de los individuos, como mencionaron los entrevistados hubo individuos que "salieron solos", unos debajo de los árboles parentales, otros que ya se encontraban en el huerto desde que llegaron y otras mediante la dispersión de animales como "dzots" (murciélagos), así como individuos que ellos sembraron. Algunos autores mencionan que hay plantas que pueden crecer sin intervención humana dentro del huerto y posteriormente se fomenta su desarrollo con las prácticas de manejo como el riego y la poda (Rivas Novelo *et al.*, 2019). También mencionan que la dispersión está dada por murciélagos que traen semillas de los árboles del mismo huerto, de huertos vecinos, de poblaciones ruderales o silvestres (Pérez-Hernández *et al.*, 2023). El tipo de distribución de los individuos, conglomerado (56%) y aleatorio (43%), en los huertos familiares es el resultado del manejo que le dan, el cual depende del tamaño del huerto. A pesar de que el tamaño del huerto familiar se ha reducido, *B. alicastrum* sigue siendo un componente frecuente en los huertos familiares de Tzucacab y su distribución generalmente es en los límites, funcionando como cerco vivo y barrera rompe vientos (Berg, 1972; Santillán-Fernández *et al.*, 2023).

En cuanto al uso, existen varios estudios que resaltan el uso forrajero del ramón como el más común dentro de las comunidades rurales, usado para la alimentación de ganado: bovino, ovino, caprino y porcino (Herrera Chan *et al.*, 2024; Sarmiento-Franco *et al.*, 2022). Guerrero-Salazar y Vera-Márquez (2014) reportan que el 89% de las personas obtienen algún servicio ambiental del ramón, en algunos casos con el uso del árbol en su totalidad, mientras que Santillán-Fernández *et al.* (2023) mencionan que algunas personas le atribuyen a esta especie usos ecológicos como cerca viva, barrera rompe vientos, como sombra y refugio, pero también para la restauración y conservación del suelo (Allen *et al.*, 2024).

Los resultados del presente estudio en Tzucacab indican que ha habido pérdida de los saberes mayas respecto a la especie, ya que en la antigüedad los mayas, empleaban las semillas y frutos, como parte de su dieta. Las podas anuales de los individuos en los huertos no permiten la producción de frutos y la recolección en la vegetación silvestre no es común, por lo que su uso ha disminuido considerablemente (Sarmiento-Franco *et al.*, 2022). Esta pérdida de saberes se da por factores de tipo político, social y cultural donde interviene el desinterés en los jóvenes por aprender los conocimientos tradicionales, la pérdida de identidad cultural y la globalización, pero también factores económicos ligados a la cultura occidental donde únicamente los saberes que puedan ser incorporados a sistemas de producción económica son los que permanecen, y factores

climáticos derivados del deterioro ambiental y pérdida de ecosistemas (Castillo-López y Torres-Carral, 2022).

El ramón se puede utilizar para generar harinas y alimentos, así como la resina para contrarrestar infecciones respiratorias, asma y estimular la producción de leche en mujeres, bondades que no se están aprovechando (Ascencio-Álvarez *et al.*, 2015; Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017). El potencial nutritivo de la semilla del ramón para la alimentación humana ha sido estudiado y se puede considerar en el diseño de sistemas agroforestales que ayuden a la seguridad y soberanía alimentaria (Moo-Huchin *et al.*, 2021; Martínez-Ruiz *et al.*, 2019; Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017).

En cuanto a las edades de los árboles de ramón calculadas con base a las estimaciones de las personas, el mayor porcentaje de árboles se encuentra entre los rangos de 5-10 y mayores de 15 años, rangos similares a los reportados por Guerrero-Salazar y Vera-Márquez (2014) en huertos de la región centro de Yucatán. Es probable que muchas de las plántulas no llegan a estadíos juveniles y adultos al tener altas tasas de mortalidad por factores como herbivoría y/o porque durante las actividades de limpieza del huerto son eliminados, por lo que se sobresalen individuos mayores a 2 m de altura que no requieren cuidados y ya están en edad de producción (Flórez *et al.*, 2019). Por otro lado, aunque el tamaño del huerto con el número real de ramones tuvo relación significativa, esta fue moderada para las tres comunidades (valores menores a 0.65), si bien en algunos huertos se encontraron muchas plántulas, estas no fueron contabilizadas, además que la variación en cuanto a estructura y abundancia de especies en los huertos está más relacionada con el tipo de vegetación de la región, el lugar que ocupan en el huerto y el uso y conocimiento tradicional ligado a estas (Tegoma-Coloreano *et al.*, 2023).

Manejo de *Brosimum alicastrum* Sw.

En cuanto al manejo campesino del ramón, se efectúan dos prácticas para su mantenimiento: el riego y las podas. El riego es fundamental para su supervivencia y crecimiento ya que demanda amplia disponibilidad de agua, al menos en los cinco primeros años de vida antes de que la raíz penetre en el suelo y pueda encontrar suficiente espacio para establecerse y desarrollarse (Montañez-Escalante *et al.*, 2012; Querejeta *et al.*, 2007; Santillán-Fernández *et al.*, 2023). Mientras que las podas son prácticas que no se realizan de forma periódica sino cuando la situación lo amerite, para su venta, como forraje y por mantenimiento del mismo árbol y alrededores. Guerrero-Salazar y Vera-Márquez (2014) mencionan que la gente poda sus árboles frecuentemente eliminando el 100% de sus hojas, y que es recomendable hacerlo con intervalos entre 12 y 16 meses para no perjudicar su valor nutritivo, mientras Tadeo-Noble *et al.* (2025) menciona que en árboles de ramón no se sugiere podar individuos menores a cinco meses, ya que no responden de manera adecuada para modificar la arquitectura de la especie, contrario al ser podados individuos adultos, los cuales son capaces de generar un aumento de biomasa aérea.

Los entrevistados indicaron que podan los árboles para obtener una fuente de ingresos a través de la venta de las hojas como forraje. Algunos estudios mencionan que esto reduce a una importancia económica, visión modernizadora y no ancestral del ramón (Orantes-García *et al.*, 2012; Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017), mientras otros estudios realizados en comunidades de Yucatán como Hocabá y Halachó, indican importancia económica y uso alimentario (Domínguez-Lagunes, 2012; Guerrero-Salazar y Vera-Márquez, 2014). Con respecto a los precios del forraje, son similares a lo reportado por Hernández-Santos *et al.* (2015), quien señala que las ganancias generadas en huertos están entre $300 y $500 pesos mexicanos por árbol, mientras que Guerrero-Salazar y Vera-Márquez (2014) reportan entre $50 y $300 por árbol cada 6 meses.

En el caso de la floración y fructificación del ramón, se observa una pérdida de conocimiento de estos procesos debido a factores como las podas y la falta de interés en conocer la biología de la especie (Guerrero-Salazar y Vera-Márquez, 2014).

CONCLUSIONES

El conocimiento sobre el uso y manejo del ramón se concentra al uso forrajero, en menor medida como sombra y en algunos casos como alimento humano. Esto se relaciona con su importancia económica, ya que la venta de sus hojas como forraje genera ganancias anuales, por lo cual es una especie fomentada y cultivada de manera frecuente en los huertos de Pisteakal, Nohbec y Catmis. Su manejo se limita principalmente al riego y la poda, que les trae beneficios económicos, al vender su follaje, en la temporada de estiaje. Aún existe mucho desconocimiento de la especie, lo cual ayudaría a fomentar prácticas de manejo que equilibren la producción de forraje con la conservación de la salud del árbol y la biodiversidad de los huertos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los habitantes del municipio de Tzucacab, a la Universidad Autónoma de Yucatán, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) en el Proyecto CONACyT CB 2014 “Efecto de la domesticación en la diversidad biológica e interacción planta-suelo de árboles nativos de la Península de Yucatán [Clave: 236428], al proyecto CF-2023-G-227 por el financiamiento de este estudio y a los árbitros por su aporte en la revisión.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Barojas, S. (2005). Fórmulas para el tamaño de muestra en investigaciones de salud. *Salud en Tabasco*, *11*(1), 333–338. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206

Allen, B., Helen, A., Violi, M., Allen, F., & Gómez-Pompa, A. (2024). Restoration of Tropical Seasonal Forest in Quintana Roo. In *The lowland maya area* (1st ed., pp. 587–598). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003578604-39

Ascencio-Álvarez, A., Martín R, Huchin-Poot E, Andrade S, Larqué A, Tucuch J, Valdez J, & Gámez A. (2015). Gall (*Trioza rusellae* Tuthill) insect identification in *Brosimum alicastrum* Swartz leaves in Yucatán, Mexico. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.08.032

Berg, C. (1972). Olmedieae, Brosimeae (Moraceae). In *Flora Neotropica* (pp. 1–228).

Cabrera-Pacheco, A. (2014). Estrategias de sustentabilidad en el solar maya yucateco en Mérida, México. *Geographos*, *5*, 1–32. https://doi.org/10.14198/GEOGRA2014.5.56

Castañeda-Navarrete, J., Lope-Alzina, D., & Ordóñez-Díaz, M. (2018). Los huertos familiares en la península de Yucatán. In M. de J. Ordóñez Díaz (Ed.), *Atlas biocultural de huertos familiares en México: Chiapas, Hidalgo, Oaxaca, Veracruz y península de Yucatán* (1st ed., pp. 1–429). https://doi.org/10.22201/crim.9786073007405e.2018

Castillo López, S., & Carral, T. G. (2022). Milpa y saberes mayas en San Sebastián Yaxché, Peto, Yucatán. *Estudios de Cultura Maya*, *59*(1), 171–189. https://doi.org/10.19130/IIFL.ECM.59.22X876

Chablé-Pascual, R. (2013). *Los huertos familiares como proveedores de servicios ambientales en la región de Chontalpa, Tabasco, México*. http://hdl.handle.net/10521/2214

Domínguez-Lagunes, M. (2012). *Conocimiento local y crecimiento inicial del ojite (Brosimum alicastrum* Swartz*) bajo distintas condiciones de manejo en la zona de lomeríos del municipio Paso de Ovejas*. http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/1875

Ferrer, M. M., Tapia-Gómez, C. A., Estrada-Medina, H., Ruenes-Morales, M. del R., Montañez-Escalante, P. I., & Jiménez-Osornio, J. J. (2021). Growing Out of the Tropical Forests: Gene Flow of Native Mesoamerican Trees Among Forest and Mayan Homegardens.

Frontiers in Ecology and Evolution, *9*, 628765. https://doi.org/10.3389/FEVO.2021.628765/BIBTEX

Flórez-P., M., Raz, L., Flórez-P., M., & Raz, L. (2019). Estructura poblacional y patrón espacial de Brosimum alicastrum en el bosque seco de la región Caribe de Colombia. *Caldasia*, *41*(1), 152–164. https://doi.org/10.15446/CALDASIA.V41N1.71307

Fortuny-Fernández, N. M., García-Callejas, D., Damon, A., Martínez-Zurimendi, P., Labrín-Sotomayor, N. Y., & Peña-Ramírez, Y. J. (2024). Factors driving tree community structure in traditional homegardens in the Mayan Forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, *99*, 128466. https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2024.128466

Guerrero-Salazar, B., & Vera-Márquez, F. (2014). *Manejo de Brosimum alicastrum Sw. En los solares de las localidades Hocabá y Halachó, Yucatán*. Universidad Nacional Autónoma de México.110pp. https://repositorio.unam.mx/contenidos/161131

Hernandez-Santos, V., Munguía-Gil, A., & Monforte-Méndez, G. (2015). *Caracterización de la producción con árboles de ramón (Brosimum alicastrum* Sw*) y sus derivados para el desarrollo sustentable de la región sur del Estado de Yucatán*. 1–24.

Herrera Chan, J., Chan Keb, C., Ascencio Naal, E., Aké Canché, B., Agraz-Hernández, C., Pérez Balán, R., Gutiérrez Alcántara, E., & López Gutiérrez, T. (2024). Conocimiento y uso medicinal del Árbol de Ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.) En la comunidad de Becal, Calkiní, Campeche, México. *South Florida Journal of Development*, *5*(2), 732–741. https://doi.org/10.46932/sfjdv5n2-025

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020). *Censo de Población y Vivienda (2020). Principales resultados del Censo de Población y Vivienda 2020: Yucatán*. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825198046

Jiménez-Osornio, J., Ruenes-Morales, M., & Aké-Gómez, A. (2003). Mayan homegardens: sites for *in situ* conservation of agricultural diversity. In P. J. Pucallpa, J. S. D., L. Chavez, & T. Hodgkin (Eds.), *En: Seed systems and crop genetics diversity on farm proceedings of a workshop* (pp. 9–16). https://www.semanticscholar.org/paper/Mayan-home-gardens%3A-sites-for-in-situ-conservation-Jim%C3%A9nez-Osornio-Morales/843d13b0ad1a37e93dba05ccf00c49931e35214d

Jiménez-Osornio, Ruenes-Morales, & Montañez-Escalante. (1999). Agrodiversidad de los solares de la península de Yucatán. *Red de Gestión de Recursos Naturales*, *14*, 30–40. https://www.researchgate.net/publication/304109499_Agrodiversidad_de_los_solares_de_la_Peninsula_de_Yucatan#fullTextFileContent

Martínez-Ruiz, N., Javier Torres, L., Del Hierro Ochoa, J., & Larqué Saavedra, A. (2019). Bebida adicionada con *Brosimum alicastrum* Sw.: Una alternativa para requerimientos dietarios especiales. *RESPYN Revista Salud Pública y Nutrición*, *18*(3), 1–10. https://doi.org/10.29105/respyn18.3-1

Mendivelso, F. (2022). Prueba no paramétrica de correlación de Spearman. *Revista Médica Sanitas*, *24*. https://doi.org/https://doi.org/10.26852/01234250.578

Montañez Escalante, P., M. R. Ruenes Morales, J. J. Jiménez Osornio, P. Chimal Chan, L. López Burgos. 2012. Los huertos familiares o solares en Yucatán. En: Mariaca M.R. (Editor) El Huerto Familiar en el Sureste de México. Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco, ECOSUR, México. Pp. 131-148.

Moo-Huchin, V. M., Góngora-Chi, G. J., Sauri-Duch, E., Canto-Pinto, J. C., Betancur-Ancona, D., & Ramón-Canul, L. G. (2021). Tortilla de maíz adicionado con harina de *Brosimum alicastrum*: propiedades fisicoquímicas y actividad antioxidante. *CIENCIA Ergo-Sum*, *28*(3). https://doi.org/10.30878/CES.V28N3A1

Orantes-García, C., A., C.-R., & M., V.-M. (2012). *Aprovechamiento del árbol nativo Brosimum alicastrum Swartz (Moraceae) en la Selva Zoque Chiapas, México* (Vol. 6). https://www.researchgate.net/publication/259623509_Aprovechamiento_del_arbol_nativo_Brosimum_alicastrum_Swartz_Moraceae_en_la_Selva_Zoque_Chiapas_Mexico

Recibido:
23/octubre/2024

Aceptado:
9/junio/2025

Pérez-Hernández, R. G., Reyes-García, C., Grijalva-Arango, R., Chávez-Pesqueira, M., Espadas-Manrique, C., Hernández-Guzmán, M., Pérez-Hernández, R. G., Reyes-García, C., Grijalva-Arango, R., Chávez-Pesqueira, M., Espadas-Manrique, C., & Hernández-Guzmán, M. (2023). Usos tradicionales y prácticas de manejo de *Piper auritum* en comunidades maya rurales de Yucatán. *Botanical Sciences*, *101*(4), 1049–1069. https://doi.org/10.17129/BOTSCI.3305

Puleston, D. (1968). *Brosimum alicastrum as Subsistence Alternative for the Classic Maya of the Central Southern Lowlands", tesis de maestría*.

Querejeta, J. I., Estrada-Medina, H., Allen, M. F., & Jiménez-Osornio, J. J. (2007). Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate. *Oecologia*, *152*(1), 26–36. https://doi.org/10.1007/S00442-006-0629-3

Ramírez-Sánchez, S. Ibáñez-Vázquez, D. Gutiérrez-Peña, M. Ortega-Fuentes, M.S. García-Ponce, L.L. Larqué-Saavedra, A. (2017). El ramón (*Brosimum alicastrum*) Swartz) una alternativa para la seguridad alimentaria en México. *AGRO Productividad*.

Rivas Novelo, A., Jiménez Osornio, J., & Amo Rodríguez, S. (2019). Conservación de especies frutales en los huertos familiares mayas de la Península de Yucatán. In del Amo Rodríguez y M.C. Vergara Tenorio (Ed.), *La Restauración, Ecológica Productiva: El camino para recuperar el patrimonio biocultural de los pueblos mesoamericanos.* (1st ed., pp. 59–69).

RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development for R. RStudio*.

Santillán-Fernández, A., Castañeda-Alonso, S. S., Carrillo-Ávila, E., Tadeo-Noble, A. E., Bautista-Ortega, J., Vera López, J. E., Alatorre-Cobos, F., Santillán-Fernández, A., Castañeda-Alonso, S. S., Carrillo-Ávila, E., Tadeo-Noble, A. E., Bautista-Ortega, J., Vera López, J. E., & Alatorre-Cobos, F. (2023). Morfometría y viabilidad de semillas de *Brosimum alicastrum* Sw. en Campeche. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *14*(77), 31–55. https://doi.org/10.29298/RMCF.V14I77.1345

Sarmiento-Franco, L., Montfort-Grajales, S., & Sandoval-Castro, C. (2022). La semilla del árbol Ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz): alternativa alimentaria energética para animales de producción y seres humanos. *Bioagrociencias*, *15*(1). https://doi.org/10.56369/BAC.4214

SEFOE. (2013). *Municipios*. http://www.sefoe.yucatan.gob.mx/esp/estado/municipios_31098.php

Tadeo-Noble, A., Santillán-Fernández, A., Bautista-Ortega, J., & Paredes Ríos, S. (2025). Impacto de la poda temprana en el crecimiento y forma de *Brosimum alicastrum* Sw. *Polibotánica*, 59: 149–158. https://doi.org/10.18387/polibotanica.59.9

Tegoma-Coloreano, A., Blancas, J., García-Flores, A., & Beltrán-Rodriguez, L. (2023). Vista de Riqueza, estructura y diversidad florística en huertos familiares del sureste del estado de Morelos: una aproximación biocultural. *Polibotánica*, 55: 41–65. https://doi.org/10.18387/polibotanica.55.4

Toledo, V., Barrera-Bassols, N., García-Frapolli, E., & Alarcón-Chaires, P. (2008). Uso múltiple y biodiversidad entre los mayas yucatecos (México. *Interciencia*, *33*(5), 345–352. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33933505

Velasco Morón, A. (2023). *El papel de las mujeres en la propiedad ejidal y los huertos familiares en la costa de Yucatán desde una perspectiva de género*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.

Zamora-Crescencio, P., García-Gil, G., & Flores-Guido, J. (2008). Estructura y composición florística de la selva mediana subcaducifolia en el sur del estado de Yucatán, México. *Polibotánica*, 26: 39–66. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682008000200002&lng=es&tlng=es.

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

RESCATE Y CONSERVACIÓN DEL CONOCIMIENTO TRADICIONAL SOBRE PLANTAS MEDICINALES EN LA SIERRA DE TAXCO, GUERRERO, MÉXICO: EL CASO DEL TORONJIL (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)

RESCUE AND CONSERVATION OF TRADITIONAL KNOWLEDGE ON MEDICINAL PLANTS IN THE SIERRA DE TAXCO, GUERRERO, MEXICO: THE CASE OF TORONJIL (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)

Morales Barrera, J., B. Cruz-Lagunas, M.A. Gruintal-Santos, M. Vázquez-Villamar, T. Romero-Rosales, S. Rojas-Hernández, T.J. Adame Zambrano

RESCATE Y CONSERVACIÓN DEL CONOCIMIENTO TRADICIONAL SOBRE PLANTAS MEDICINALES EN LA SIERRA DE TAXCO, GUERRERO, MÉXICO: EL CASO DEL TORONJIL (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)
RESCUE AND CONSERVATION OF TRADITIONAL KNOWLEDGE ON MEDICINAL PLANTS IN THE SIERRA DE TAXCO, GUERRERO, MEXICO: THE CASE OF TORONJIL (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 411-439 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.25

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Rescate y conservación del conocimiento tradicional sobre plantas medicinales en la Sierra de Taxco, Guerrero, México: El caso del toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)

Rescue and conservation of traditional knowledge on medicinal plants in the Sierra de Taxco, Guerrero, Mexico: The case of toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)

Judith Morales-Barrera https://orcid.org/0009-0003-5929-5202
Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Maestría en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local. Unidad Tuxpan, Carretera Iguala-Tuxpan, km 2.5. CP40101, Iguala de la Independencia, Guerrero, México

Blas Cruz-Lagunas https://orcid.org/0000-0003-4146-7566
Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Periférico Poniente s/n Frente a la Colonia Villa de Guadalupe. CP 40010, Iguala de la Independencia, Guerrero, México

Miguel Angel Gruintal-Santos https://orcid.org/0000-0002-7654-1239
Mirna Vázquez-Villamar https://orcid.org/0000-0002-5322-3537
Teolincacihuatl Romero-Rosales https://orcid.org/0000-0002-9158-8481
Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Maestría en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local Unidad Tuxpan, Carretera Iguala-Tuxpan, km 2.5. CP40101 Iguala de la Independencia, Guerrero, México

Saúl Rojas-Hernández https://orcid.org/0000-0001-5152-2149
Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia No. 1. Carretera Altamirano-Iguala, km 3.5. C.P. 40662 Ciudad Altamirano, Guerrero, México

Tania de Jesús Adame-Zambrano / 17021@uagro.mx
https://orcid.org/0000-0002-5588-1680
[2]*Universidad Autónoma de Guerrero. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Periférico Poniente s/n Frente a la Colonia Villa de Guadalupe CP 40010, Iguala de la Independencia, Guerrero, México*

RESUMEN: El presente estudio tuvo como objetivo investigar y documentar el conocimiento tradicional sobre el uso de las plantas medicinales, con énfasis en los usos y propiedades del toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*) en tres localidades de la Sierra del municipio de Taxco de Alarcón, Guerrero, México, contribuyendo con el rescate y la conservación de los saberes ancestrales. Para la obtención de información se aplicaron cuestionarios semiestructurados a personas mayores de 18 años y se aplicó la prueba χ^2 (chi cuadrado) para analizar las relaciones entre las variables. En los resultados se identificaron 52 especies de plantas medicinales agrupadas en 26 familias botánicas. La familia que más sobresale es Lamiaceae con (12 especies), seguida de Asteraceae (7 especies). Las enfermedades tratadas con plantas medicinales de acuerdo con el Índice de Consenso de Informantes fueron enfermedades del sistema gastrointestinal, con 250 reportes de uso, 33 especies y el *FCI* fue de 0.87, siendo el más alto. En segundo lugar, para los problemas respiratorios y osteomusculares con 112 reportes de uso, 21 especies y un *FCI* de 0.82. Las plantas utilizadas provienen sobre todo del medio silvestre (56%) y en menor medida (44%) son cultivadas. Respecto al *Agastache mexicana* subsp. *mexicana*, las tres localidades conocen, usan y lo tienen en

Morales Barrera, J., B. Cruz-Lagunas, M.A. Gruintal-Santos, M. Vázquez-Villamar, T. Romero-Rosales, S. Rojas-Hernández, T.J. Adame Zambrano

RESCATE Y CONSERVACIÓN DEL CONOCIMIENTO TRADICIONAL SOBRE PLANTAS MEDICINALES EN LA SIERRA DE TAXCO, GUERRERO, MÉXICO: EL CASO DEL TORONJIL (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)

RESCUE AND CONSERVATION OF TRADITIONAL KNOWLEDGE ON MEDICINAL PLANTS IN THE SIERRA DE TAXCO, GUERRERO, MEXICO: THE CASE OF TORONJIL (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 411-439. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.25

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

casa. Sus principales usos son para contrarrestar: dolor de estómago y cólicos, problemas respiratorios, nervios y finalmente problemas de filiación cultural conocido como susto. La forma de consumo de las plantas medicinales es mediante decocción utilizando mayormente las hojas. Además, el 90% de los entrevistados mostró interés en preservar las plantas medicinales mediante su cultivo en huertos familiares, promoviendo un manejo sostenible para evitar la disminución de las especies. En las tres localidades de estudio, las plantas medicinales son muy importantes no solo porque ayudan a curar enfermedades, sino también porque forman parte de la cultura y tradiciones de estas comunidades.
Palabras clave: Plantas medicinales, Etnobotánica, Manejo Sostenible, Preservación.

ABSTRACT: The present study aimed to investigate and document traditional knowledge on the use of medicinal plants, with an emphasis on the uses and properties of lemon balm (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*) in three localities in the mountains of the municipality of Taxco de Alarcón, Guerrero, Mexico, contributing to the rescue and conservation of ancestral knowledge. To obtain information, semi-structured questionnaires were administered to people over 18 years of age, and the χ^2 (chi-square) test was applied to analyze the relationships between variables. The results identified 52 species of medicinal plants grouped into 26 botanical families. The most outstanding family is Lamiaceae with 12 species, followed by Asteraceae (7 species). The diseases treated with medicinal plants according to the Informant Consensus Index were diseases of the gastrointestinal system, with 250 reports of use, 33 species, and the FCI was 0.87, being the highest. Second, for respiratory and musculoskeletal problems, with 112 reports of use, 21 species, and an FCI of 0.82. The plants used come primarily from the wild (56%) and, to a lesser extent (44%), are cultivated. Regarding *Agastache mexicana* subsp. *mexicana*, all three localities know, use, and have it at home. Its main uses are to counteract stomach pain and colic, respiratory problems, nerves, and finally, a culturally related problem known as susto (susto). Medicinal plants are consumed through decoction, mostly using the leaves. Furthermore, 90% of those interviewed expressed interest in preserving medicinal plants by growing them in home gardens, promoting sustainable management to prevent species decline. In all three study localities, medicinal plants are very important not only because they help cure diseases but also because they are part of the culture and traditions of these communities.
Key words*:* Medicinal plants, Ethnobotany, Sustainable management, Preservation.

INTRODUCCIÓN

Las plantas medicinales han sido utilizadas por el ser humano para aliviar diferentes malestares o enfermedades. Este conocimiento sobre sus usos se ha trasmitido de generación en generación. En México se han registrado 4,500 plantas medicinales, por lo que el país se posiciona en segundo lugar a nivel mundial (Zhang *et al*., 2021), cuyo uso es mediante la medicina tradicional ancestral. Las plantas medicinales son usadas mediante decocciones o infusiones, seguidas de productos homeopáticos. En cuanto a las partes de la planta utilizadas se incluyen hojas, tallos, flores, frutos, semillas, corteza o toda la planta (Akram *et al*., 2020).

Rescatar y conservar el conocimiento tradicional sobre plantas medicinales es esencial para garantizar su continuidad, tanto para las generaciones presentes como futuras (Ojha *et al*., 2020). Este conocimiento no solo beneficia a las comunidades que lo resguardan, sino también a la sociedad en general, ya que puede derivar en el descubrimiento de nuevos compuestos bioactivos, fortalecer estrategias de salud intercultural y promover modelos de desarrollo local sustentable (Valarezo-García *et al*., 2016; Shukla, 2023). En la actualidad se reconoce con firmeza que el conocimiento sobre las plantas medicinales se está erosionando continuamente, además su disponibilidad se ha visto limitada (Ojha *et al*., 2020). Esto se atribuye a diferentes causas, entre ellas, los procesos de aculturación de los pueblos originarios, deterioro del entorno natural, el cambio climático, la recolección indiscriminada y la sobreexplotación (Chen *et al*., 2016; Phondani *et al*., 2016a; Ssenku *et al*., 2022).

Los principales objetivos de la etnobotánica es documentar el conocimiento sobre el uso de las plantas medicinales, la búsqueda de nuevos fármacos, así como compilar un inventario exhaustivo de plantas importantes en la medicina herbaria tradicional de diversas naciones (Banerjee, 2024). En este sentido la investigación etnobotánica puede coadyuvar en la recuperación del conocimiento y proteger de manera simultánea la biodiversidad (Jiménez-González *et al*., 2021).

En la investigación etnobotánica actual se utiliza una combinación de herramientas participativas y etnobotánicas para la recopilación de datos, incluyendo talleres, grupos focales y visitas de campo (Rodrigues *et al*., 2020). Diferentes autores han empleado un enfoque participativo para la investigación etnobotánica, destacando que la participación activa de los residentes locales es fundamental para el proceso de toma de decisiones, el desarrollo de soluciones innovadoras en proyectos de cogestión, así como para la producción, uso y manejo sostenible de los recursos vegetales (Ericson, 2006; Gilmore & Young, 2012; Rodrigues *et al*., 2020). El estudio realizado por Phondani *et al*. (2016b) analiza el desarrollo de un enfoque participativo mediante reuniones comunitarias y visitas de exposición para promover el cultivo de plantas medicinales y aromáticas (PAM) como herramienta para la conservación de la biodiversidad y la mejora de los medios de vida de las comunidades locales. Este tipo de enfoque involucra activamente a los habitantes en procesos de capacitación, toma de decisiones y manejo sustentable de los recursos vegetales, generando así un sentido de apropiación y corresponsabilidad.

El municipio de Taxco de Alarcón se ubica en la Región Norte de Guerrero, México; tiene una población total de 105, 586 habitantes; sus principales lenguas indígenas son: Náhuatl, Tlapaneco y Mixteco. En 2020, 26.8% de los habitantes se ubicaban en estado de pobreza extrema y 75% en pobreza moderada (CONEVAL, 2022). El municipio posee una flora variada, parte de la cual es utilizada por los habitantes para el tratamiento de sus enfermedades; no obstante, existen escasas investigaciones donde se documenten las especies medicinales presentes, así como los saberes tradicionales asociados a su uso. Esta falta de registro representa una oportunidad para el rescate y la conservación del conocimiento local sobre las plantas medicinales, por tal motivo se seleccionaron tres localidades en las que el conocimiento sobre las plantas medicinales ha sido poco estudiado: Cajones, Agua Escondida y San Juan Tenería. Estas localidades se encuentran alejadas de la cabecera municipal y el transporte es muy escaso, esto limita la comunicación con la ciudad y a su vez el acceso a los servicios básicos de salud. Así mismo, estos sitios de estudio son áreas potenciales para la producción de plantas medicinales, gracias a las condiciones ambientales que favorecen su desarrollo.

El toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*) perteneciente a la familia Lamiaceae, es una planta medicinal endémica de México y se encuentra distribuida geográficamente en los estados de Puebla, México, Hidalgo, Morelos, Guerrero, Jalisco y Michoacán (UNAM, 2009). El *Agastache mexicana* subsp. *mexicana* no es originaria de las localidades estudiadas, su presencia y uso actual se debe a la introducción por parte de los habitantes, quienes reconocen sus propiedades terapéuticas y la han integrado a su repertorio de plantas medicinales. Esta planta destaca por sus usos como relajante, digestivo, ansiolítico y antiespasmódico, lo que la convierte en un recurso valioso tanto para la medicina tradicional como para la investigación científica.

Aunque *Agastache mexicana* subsp. *mexicana* posee importantes propiedades medicinales, no se cultiva a gran escala, por lo que continúa siendo recolectada directamente de su hábitat silvestre. Esta actividad, junto con los incendios forestales y la deforestación han provocado en los últimos 10 años la disminución de la especie en comunidades del estado de Guerrero, lo que a futuro lo pone en riesgo de extinción (Hernández-Ramírez *et al*., 2022). A esta problemática se suma el bajo porcentaje de germinación de sus semillas, lo que dificulta aún más su reproducción en el medio natural (Carrillo-Galván *et al*., 2020). Por esta razón comprender cómo se valora y se utiliza el toronjil en nuevas localidades donde ha sido introducido puede ofrecer información útil para estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*. Asimismo, su aprovechamiento podría impulsarse mediante el establecimiento de cultivos locales, lo que contribuiría a generar ingresos económicos para pequeños productores. Por otra parte, su documentación etnobotánica es fundamental como parte del rescate y preservación del conocimiento tradicional asociado a su uso.

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Considerando la información previamente expuesta, esta investigación tuvo como objetivo profundizar en el conocimiento sobre las plantas medicinales empleadas como alternativa para el tratamiento de diversas enfermedades por los habitantes de tres localidades ubicadas en la Sierra del municipio de Taxco, Guerrero. Asimismo, se puso especial atención en los saberes ancestrales relacionados con el toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*), una planta medicinal de gran importancia por sus propiedades terapéuticas. A su vez, mediante talleres como herramienta participativa, se buscó capacitar a los habitantes sobre el cultivo de las plantas medicinales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

La investigación se desarrolló en dos etapas principales. En la primera, se aplicaron cuestionarios semiestructurados a personas adultas de tres comunidades de la sierra de Taxco, con el objetivo de recopilar información sobre los saberes tradicionales relacionados con las plantas medicinales. En la segunda etapa, se llevaron a cabo talleres participativos en cada localidad, enfocados en la reproducción y manejo agronómico de estas plantas, como parte del rescate y la conservación de estas plantas, promoviendo dar un manejo sostenible.

El estudio tuvo un enfoque cualitativo, ya que busco conocer, a partir de la opinión de las personas de la comunidad los saberes tradicionales sobre las plantas medicinales empleadas. El diseño fue transversal porque la información se recopilo en un solo periodo de tiempo, sin seguimiento longitudinal a los participantes. A su vez fue correlacional en el sentido cualitativo de identificar como se relacionan dos o más variables. La investigación se llevó a cabo en tres localidades pertenecientes a la Sierra del municipio de Taxco de Alarcón, Guerrero, México, las cuales fueron: Cajones, Agua Escondida y San Juan Tenería. La localidad de Cajones está ubicada a una altitud de 2,364 msnm, en las coordenadas 18°58’22.22” N y -99°64´30.56” O. Agua Escondida se encuentra a 2,420 msnm, en las coordenadas 18°58’30.56” N y -99°64´80.56” O. Por último, San Juan Tenería está localizada a 2,500 msnm, en las coordenadas 18°59’36.11” N y -99°69´22.22” O. Conforme a la clasificación de Köppen el clima de la región de estudio es considerado templado con lluvias en verano (Cwb). La temperatura media anual es de 18.4 °C. La precipitación promedio anual aproximada es de 1,252 mm (García, 2004). La principal actividad productiva y económica de los habitantes de las localidades seleccionadas es la agricultura; los cultivos predominantes son maíz, frijol y calabaza, destinados principalmente para el autoconsumo. La temporada de siembra corresponde al ciclo primavera-verano, ya que la mayoría de estos cultivos se benefician de las lluvias. Otra fuente de ingresos para las familias proviene de la elaboración de bordados artesanales, como blusas, servilletas y manteles, los cuales se comercializan en la ciudad de Taxco.

Obtención de datos a través de cuestionarios semiestructurados

Para obtener la información sobre el conocimiento de las plantas medicinales se aplicaron cuestionarios semiestructurados en formato impreso. Al momento de recopilar la información, el cuestionario se leía al entrevistado y sus respuestas eran registradas en el mismo documento, así mismo, se brindó el tiempo necesario para que los entrevistados aclararan dudas, profundizaran en ciertos temas y compartieran comentarios adicionales, para ello, se siguieron las recomendaciones propuestas por Martínez (1998). Para las encuestas, el criterio de inclusión fue: habitantes de las comunidades de estudio mayores de 18 años de edad; el criterio de exclusión fue: personas que no sean de la comunidad, y los criterios de eliminación fueron: cualquier habitante de la comunidad de estudio que no pueda emitir su opinión por alguna razón o que simplemente no deseó hacerlo. El tamaño de la población se generó a partir del Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2020) y el tamaño de la muestra se calculó mediante la ecuación de Thompson (1992), como lo sugiere (Aguilar-Barojas, 2005).

Ecuación de Thompson (1992).

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

$$n = \frac{N \cdot p(1-p)}{(N-1)\frac{d^2}{Z^2} + p(1-p)}$$

En donde:

- N = tamaño de la población;
- n = tamaño de la muestra;
- d = error muestral (también se puede encontrar como α o e);
- Z = nivel de confianza (se obtiene de tablas de α dado el valor de d);
- p = probabilidad a favor;
- 1-p=q = probabilidad en contra.

Al sustituir los valores en la ecuación se obtuvo el número de encuestas que se tendrían que aplicar por cada localidad (Tabla 1). Esto fue a partir de la población mayor de 18 años de acuerdo con datos del INEGI 2020. En la práctica no fue posible aplicar la totalidad de las encuestas previstas. De acuerdo con lo señalado por los propios habitantes algunas personas se encontraban fuera de la comunidad, principalmente en los estados del norte del país, como Sinaloa y Sonora, a donde emigran temporalmente en busca de mejores oportunidades laborales, en el caso de las personas más jóvenes salen de la comunidad para continuar con sus estudios y en otros casos se registraron fallecimientos, algunos de ellos relacionados por la pandemia COVID-19. Dadas las limitaciones mencionadas, en la Tabla 2 se muestra el total de las encuestas que pudieron ser aplicadas.

Tabla 1. Número de encuestas por cada localidad de estudio, obtenidas a través de la población mayor de 18 años.
Table 1. Number of surveys for each study location, obtained from the population over 18 years of age.

Localidad	Población mayor de 18 años INEGI 2020	Número de encuestas a aplicar
Cajones	72	61
Agua Escondida	80	66
San Juan Tenería	107	84

Tabla 2. Total de encuestas aplicadas por cada localidad de estudio.
Table 2. Total number of surveys applied for each study location.

Localidad	Total de encuestas aplicadas	Hombres	Mujeres
Cajones	42	16	26
Agua Escondida	49	22	27
San Juan Tenería	53	20	33

Recolección de información

Previo a la aplicación de las encuestas se recibió el apoyo de las autoridades locales en este caso los comisarios. Se establecieron pláticas para informar el objetivo de la investigación, con la

finalidad de que fuera aprobado y comunicaran a los habitantes sobre las diferentes actividades que se llevarían a cabo en la localidad, además de poder contar con el apoyo de las personas.
El contenido de la entrevista incluyó la edad de las personas, el género, el nivel educativo, las plantas medicinales que conocen y consumen, entre las cuales se destaca el toronjil (*A. mexicana* subsp. *mexicana*), las formas de preparación, las partes utilizadas de la planta, los padecimientos o síntomas que tratan, la frecuencia de consumo, el nombre local de las plantas medicinales empleadas, si el toronjil lo tienen en casa o lo extraen del campo, el valor económico que le dan al toronjil y el interés de la población en la preservación del mismo.

Recolección y conservación de material botánico
Con la autorización y la guía de los habitantes de las localidades de estudio se realizaron colectas botánicas. Esta recolección se hizo en tecorrales, bosques aledaños a la comunidad y en el huerto familiar. Las muestras botánicas fueron recolectadas con flor o fruto para lograr su identificación taxonómica y con la aplicación en el celular *Timestamp Camera Free* se tomó fotografía de la planta al momento de la recolección. Esta aplicación proporciona la altitud, latitud y longitud a la que se encuentra la especie colectada.
Durante la recolección y el secado de las plantas se utilizaron prensas de madera. Así mismo a cada muestra se le colocó su nombre local, número de colecta, sitio de colecta, entre otros datos. La conservación del material botánico se realizó mediante la técnica de herborización propuesta por Lot & Chiang (1986), la cual incluyó: prensado, secado, montaje y registro. Para la identificación de las especies vegetales, se emplearon claves taxonómicas, así como también se realizó la comparación con ejemplares del herbario UAGC del Instituto de Investigación Científica, Área de Ciencias Naturales de la Universidad Autónoma de Guerrero. Finalmente, el material botánico fue depositado en la colección del herbario de esta institución.

Curso-taller demostrativo para la reproducción de plantas medicinales
En cada localidad de estudio se llevó a cabo un curso-taller dirigido a los habitantes locales, enfocado en el manejo agronómico de las plantas medicinales para su establecimiento en huertos de traspatio. La actividad se desarrolló en la comisaría de cada localidad, con el apoyo del comisario y la participación activa de los habitantes.
El curso inició con una presentación teórica, utilizando diapositivas en PowerPoint, en la que se explicó detalladamente el manejo de las plantas. Posteriormente, se realizó una actividad práctica para reforzar los conocimientos adquiridos.

Análisis de datos
La información obtenida de las encuestas fue organizada en el programa de Excel®. Se utilizó el programa *WinEpi* para realizar el cálculo de la prueba de χ^2 (chi cuadrado) con la finalidad de evaluar la relación entre las diferentes variables estudiadas. Para todos los casos se utilizó una significancia (α) de 0.05, $p \leq 0.05$ (De Blas, 2006).

Además, se calculó el Factor de Consenso de los Informantes (*FCI*) para estimar el grado de homogeneidad en las respuestas de los participantes sobre el uso de las plantas medicinales en el tratamiento de distintas categorías de enfermedades. Esta medida permitió identificar aquellas categorías terapéuticas en las que hubo mayor acuerdo entre los informantes. El *FCI* se estimó mediante la fórmula propuesta por Heinrich *et al*. (1998):

$$FCI = \frac{Nur - Nt}{Nur - 1}$$

Donde *Nur* es el número total de informes de uso de plantas (citas), para una categoría de enfermedad, y *Nt* es el número total de especies de plantas utilizadas para esa categoría de dolencia.

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la mayoría de las personas que aportaron información sobre el uso de plantas medicinales son mujeres, especialmente en San Juan Tenería (62.26%), Cajones (61.90%) y Agua Escondida (55.10%). Con respecto a la edad, en las tres localidades de estudio los grupos más representados se encuentran entre los 41 y 70 años: Cajones, 51-60 años (30.95%) y 41-50 años (26.19%); Agua Escondida, 41-50 años (22.44%), 51-60 años (18.35%) y 61-70 años (18.36%); San Juan Tenería, 51-60 años (25.52%), 41-50 años (22.64%) y 61-70 años (20.75%). Finalmente, el nivel educativo predominante en las tres localidades es la primaria: Cajones (40.47%); Agua Escondida (38.77%) y San Juan Tenería (52.83%) (Tabla 3). Estos resultados refuerzan el papel central que desempeñan las mujeres en contextos rurales como cuidadoras tradicionales de la salud familiar. Esto las ha llevado a acumular y transmitir generación tras generación un vasto conocimiento sobre plantas medicinales, lo que las convierte en piezas clave para la conservación de estos saberes. Por otra parte, la mayor representación de personas entre 41 y 70 años resalta la importancia de este grupo etario como portador de conocimientos ancestrales y esto también indica la urgencia de documentar estos saberes antes de que se pierdan con el paso del tiempo.

Tabla 3. Datos sociodemográficos por comunidad de estudio.
Table 3. Sociodemographic data by study community.

Localidad	Variable demográfica	Categoría demográfica	Número de informantes	%
Cajones	Género	Hombre	16	38.09
		Mujer	26	61.90
	Edad	20-30	3	7.14
		31-40	6	14.28
		41-50	11	26.19
		51-60	13	30.95
		61-70	5	11.90
		71-80	3	7.14
		81-90	1	2.38
	Nivel educativo	Prescolar	4	9.52
		Primaria	17	40.47
		secundaria	8	19.04
		Bachillerato	3	7.14
		Licenciatura	2	4.76
		Posgrado	0	0
		Sin estudios	8	19.04
Agua Escondida	Género	Hombre	22	44.89
		Mujer	27	55.10
	Edad	20-30	2	4.08
		31-40	7	14.28
		41-50	11	22.44
		51-60	9	18.36
		61-70	9	18.36
		71-80	6	12.24
		81-90	5	10.20
	Nivel educativo	Prescolar	0	0
		Primaria	19	38.77
		secundaria	12	24.48
		Bachillerato	9	18.36
		Licenciatura	4	8.16
		Posgrado	1	2.04
		Sin estudios	4	8.16

San Juan Tenería	Género	Hombre	20	37.73
		Mujer	33	62.26
	Edad	20-30	6	11.32
		31-40	6	11.32
		41-50	12	22.64
		51-60	13	24.52
		61-70	11	20.75
		71-80	4	7.54
		81-90	1	1.88
	Nivel educativo	Prescolar	2	3.77
		Primaria	28	52.83
		secundaria	13	24.52
		Bachillerato	6	11.32
		Licenciatura	2	3.77
		Posgrado	0	0
		Sin estudios	2	3.77

En cuanto a las plantas medicinales, se encontraron 52 especies, las cuales están agrupadas en 26 familias botánicas, siendo la más destacada la familia Lamiaceae con (12 especies), seguida de Asteraceae (7 especies), Apiaceae con (4 especies), Myrtaceae (3 especies). Las familias Lauraceae, Rosaceae, Amaranthaceae y Scrophulariaceae (2 especies cada una). Finalmente, las familias restantes están representadas solo por una especie (Tabla 4). Estos resultados encontrados son similares a los que reporta Sotelo-Leyva *et al*. (2022), al indicar que en la localidad de Julián Blanco ubicada en la región Centro del estado de Guerrero, los habitantes utilizan plantas medicinales que principalmente corresponden a la familia de las Lamiaceae. De igual manera coincide con lo que reporta Fernández-Cusimamani *et al*. (2019) en Ecuador, al mencionar que la familia botánica de uso medicinal más importante es Lamiaceae. Lo antes expuesto puede deberse a que la familia Lamiaceae además de tener una distribución cosmopolita es la más utilizada por su facilidad de adquisición, pudiendo encontrarse especies como arvenses o como plantas cultivadas, aunque principalmente la familia se caracteriza por presentar aceites esenciales con potencial farmacológico (Angulo *et al*., 2012).

Tabla 4. Lista de plantas medicinales usadas por los pobladores de las tres localidades de estudio.
Table 4. List of medicinal plants used by the inhabitants of the three study locations.

Núm.	Nombre común	Nombre científico	Familia	Forma biológica y sitio de extracción	Localidad		
					C	AE	SJT
1	Albahaca	*Ocimum basilicum* L.	Lamiaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
2	Árnica	*Leonotis nepetifolio* (L.) R. Br.	Lamiaceae	Herbácea – Silvestre	*	*	*
3	Hierbabuena	*Mentha piperita* L.	Lamiaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
4	Manrrubio	*Marrubium vulgare* L.	Lamiaceae	Herbácea – Silvestre	*	*	*
5	Mejorana	*Origanum majorana* L.	Lamiaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
6	Menta	*Mentha piperita* L.	Lamiaceae	Herbácea - Cultivada	x	*	*
7	Mirto	*Salvia microphylla* Kunth	Lamiaceae	Arbusto - Silvestre	*	x	*
8	Nurite ó té de monte	*Clinopodium macrostemum* (Moc. & Sessé ex Benth.) Kuntze	Lamiaceae	Arbusto - Silvestre	*	*	*

Núm.	Nombre común	Nombre científico	Familia	Forma biológica y sitio de extracción	Localidad		
					C	AE	SJT
9	Romero	*Salvia Rosmarinus* Schleid.	Lamiaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
10	Tomillo	*Thymus vulgaris* L.	Lamiaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
11	Toronjil de monte	*Clinopodium mexicanum* (Benth.) Govaerts	Lamiaceae	Arbusto - Silvestre	*	*	*
12	Toronjil morado*	*Agastache mexicana* subsp. *mexicana* (Kunth) Lint & Epling	Lamiaceae	Arbusto - Cultivada	*	*	*
13	Ajenjo	*Artemisia absinthium* L.	Asteraceae	Herbácea - Silvestre	x	*	x
14	Anís	*Tagetes filifolia* Lag.	Asteraceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
15	Diente de león	*Taraxacum officinale* Weber ex F. H. Wigg.	Asteraceae	Herbácea - Silvestre	*	x	*
16	Estafiate	*Artemisia ludoviciana* Nutt.	Asteraceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
17	Jarilla	*Barkleyanthus salicifolius* H. Rob. & Brettell	Asteraceae	Arbusto - Silvestre	*	*	*
18	Manzanilla	*Chamaemelum nobile* (L.) All	Asteraceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
19	Santa María	*Tanacetum parthenium* (L.) Sch. Bip.	Asteraceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
20	Apio	*Apium graveolens* L.	Apiaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
21	Hierba de sapo	*Eryngium alternatum* J. M. Coult. & Rose	Apiaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
22	Hinojo	*Foeniculum vulgare* Mill.	Apiaceae	Herbácea - Cultivada	x	*	*
23	Planta de encaje	*Ammi visnaga* (L.)	Apiaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
24	Eucalipto	*Eucalyptus cinerea* F. Muell. ex Benth	Myrtaceae	Árbol - Silvestre	*	*	*
25	Eucalipto	*Eucalyptus globulos* Labill.	Myrtaceae	Árbol - Silvestre	*	x	*
26	Guayabo	*Psidium guajava* L.	Myrtaceae	Árbol - Silvestre	x	*	*
27	Canela	*Cinnamomum zeylanicum* Blume	Lauraceae	Árbol - Cultivada	*	*	*
28	Laurel	*Litsea glaucescens* Kunth	Lauraceae	Árbol - Silvestre	*	x	*
29	Capulín	*Prunus Serotina* Ehrh	Rosaceae	Árbol - Silvestre	*	*	*
30	Níspero	*Eriobotrya japónica* (Thunb.) Lindl	Rosaceae	Árbol – Cultivada	*	*	*
31	Epazote	*Teloxys ambrosioides* (L.) W. A. Weber	Amaranthaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
32	Epazote de zorrillo	*Dysphania graveolens* Mosyakin y Clemants	Amaranthaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
33	Gordolobo	*Verbascum thapsus* L.	Scrophulariaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	x
34	Lengua de vaca	*Buddleja sessiliflora* Kunth	Scrophulariaceae	Arbusto – Silvestre	x	*	*
35	Bugambilia	*Bougainvillea glabra* Choisy	Nyctaginaceae	Árbol – Cultivada	*	*	*

Núm.	Nombre común	Nombre científico	Familia	Forma biológica y sitio de extracción	Localidad		
					C	AE	SJT
36	Cola de caballo	*Equisetum hyemale* L.	Equisetaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
37	Cuachalalate	*Amphipterygium adstringens* (Schltdl.) Schiede ex Standl.	Anacardiaceae	Árbol – Silvestre	*	*	*
38	Hierba de pollo	*Commelina coelestis* Willd.	Commelinaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
39	Hierba santa	*Piper auritum* Kunth	Piperaceae	Arbusto - Cultivada	*	*	*
40	Jengibre	*Zingiber officinale* Roscoe	Zingiberaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
41	Lentejilla	*Lepidium virginicum* L.	Brassicaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
42	Madroño	*Arbutus xalapensis* Kunth	Ericaceae	Árbol – Silvestre	*	*	*
43	Malva	*Malva parviflora* L.	Malvaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*
44	Muicle	*Justicia spicigera* Schltdl.	Acanthaceae	Arbusto - Cultivada	*	*	*
45	Nopal	*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.	Cactaceae	Arbusto - Cultivada	*	*	*
46	Palo dulce	*Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg.	Fabaceae	Árbol – Silvestre	*	*	*
47	Ruda	*Ruta graveolens* L.	Rutaceae	Arbusto - Cultivada	*	x	*
48	Sábila	*Aloe vera* (L.) Burm.f.	Liliaceae	Arbusto - Cultivada	*	*	*
49	Saúco	*Sambucus nigra* L.	Viburnaceae	Arbusto – Silvestre	*	*	*
50	Té Limón	*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf	Poaceae	Herbácea - Cultivada	*	*	*
51	Tila	*Tilia americana* var. *mexicana* (Schltdl.) Hardin	Tiliaceae	Arbusto – Silvestre	x	*	x
52	Venenillo	*Asclepias curassavica* L.	Apocynaceae	Herbácea - Silvestre	*	*	*

Localidades: C: Cajones; AE.: Agua Escondida; SJT.: San Juan Tenería.
*: Presencia de la planta medicinal en la localidad.
x: Ausencia de la planta medicinal en la localidad

A continuación, se presentan los principales usos medicinales de las especies registradas, junto con las formas de preparación, los órganos vegetales empleados, el estado del material utilizado (fresco o seco), así como el número de citas asociadas a cada uso y el total de menciones por especie (Tabla 5). Posteriormente, en el (Tabla 6), se muestra el análisis del grado de consenso entre los informantes respecto al uso de las plantas medicinales para tratar distintas categorías de dolencias o enfermedades.

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Tabla 5. Principales usos medicinales, formas de preparación y órganos vegetales empleados en las tres localidades de estudio.
Table 5. Main medicinal uses, preparation methods and plant organs used in the three study locations.

Núm.	Nombre común y científico	Usos medicinales	Número de citas por uso	Suma total de menciones por especie	Formas de preparación	Órgano de la planta utilizado	Estado del material vegetal
1	Albahaca *Ocimum basilicum* L.	Dolores de cabeza	8	28	Decocción, infusión y planta fresca para limpias	Hojas, ramas, tallos y flores	Fresco
		Problemas digestivos	12				
		Tratar la ansiedad e insomnio	3				
		Limpiar los ojos	2				
		Buena suerte	3				
2	Árnica *Leonotis nepetifolio* (L.) R. Br.	Desinflamar y cicatrizar heridas y quemaduras	13	23	Decocción, ungüento y macerado	Hojas, flores y frutos	Fresco y seco
		Dolor de cuerpo	10				
3	Hierbabuena *Mentha piperita* L.	Dolor de estómago, cólicos y diarrea	5	9	Decocción e infusión	Hojas, tallos y ramas	Fresco
		Tratar la ansiedad y nervios	2				
		Mal de ojo	2				
4	Manrrubio *Marrubium vulgare* L.	Dolor de estómago y diarrea	3	7	Decocción y Ungüento	Hojas	Fresco
		Estimular el apetito	2				
		Heridas y quemaduras	2				
5	Mejorana *Origanum majorana* L.	Tratar flatulencias	2	7	Infusión, ungüento y macerado	Hojas, tallos y ramas	Fresco y seco
		Dolores musculares	5				
6	Menta *Mentha piperita* L.	Dolor de estómago, náuseas, flatulencias	6	16	Decocción e infusión	Hojas	Fresco y seco
		Dolores de cabeza y musculares	7				
		Tratar la ansiedad y estrés	2				
		Buena suerte	1				
7	Mirto *Salvia microphylla* Kunth	Tratar los nervios y ansiedad	2	13	Decocción, infusión y ungüento	Hojas, tallos y ramas	Fresco
		Dolor de estómago, diarrea y cólicos	8				
		Lavar y cicatrizar heridas	3				
8	Nurite ó té de monte *Clinopodium macrostemum* (Moc. & Sessé ex Benth.) Kuntze	Dolor de estómago y cólicos	16	29	Decocción, infusión y baño	Hojas, tallos, ramas y flores	Fresco y seco
		Controlar nervios	9				
		Susto o espanto	4				

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Núm.	Nombre común y científico	Usos medicinales	Número de citas por uso	Suma total de menciones por especie	Formas de preparación	Órgano de la planta utilizado	Estado del material vegetal
9	Romero *Salvia Rosmarinus* Schleid.	Mejorar la digestión	7	18	Decocción, infusión y ungüento	Hojas y tallo	Fresco
		Susto o espanto	2				
		Tratar la ansiedad y estrés	3				
		Dolores musculares	6				
10	Tomillo *Thymus vulgaris* L.	Problemas respiratorios	3	12	Decocción e infusión	Hojas y tallo	Fresco
		Problemas digestivos	7				
		Calma la piel irritada y reduce la inflamación	2				
11	Toronjil de monte *Clinopodium mexicanum* (Benth.) Govaerts	Dolor de estómago y cólicos	10	17	Decocción e infusión	Hojas, tallos y flores	Fresco y seco
		Tratar los nervios e insomnio	7				
12	Toronjil morado* *Agastache mexicana* subsp. *mexicana* (Kunth) Lint & Epling	Dolor de estómago y cólicos	27	58	Decocción, infusión, baño y ungüento	Hojas, tallos, ramas y flores	Fresco y seco
		Dolor de garganta y tos	10				
		Tratar los nervios y la ansiedad	14				
		Susto o espanto	7				
13	Ajenjo *Artemisia absinthium* L.	Indigestión y problemas estomacales	7	15	Decocción e infusión	Hojas, tallos y flores	Fresco y seco
		Tos y resfriados	5				
		Bilis	2				
		Mal de aire	1				
14	Anís *Tagetes filifolia* Lag.	Dolor de estómago	5	7	Decocción	Hojas y tallo	Fresco
		Problemas respiratorios	2				
15	Diente de león *Taraxacum officinale* Weber ex F. H. Wigg.	Dolor de estomago	3	3	Decocción	Hojas	Fresco
16	Estafiate *Artemisia ludoviciana* Nutt.	Falta de apetito	4	8	Decocción	Hojas y flores	Fresco
		Dolor de estómago, cólicos y diarrea	4				
17	Jarilla *Barkleyanthus salicifolius* H. Rob. & Brettell	Limpias y susto	3	8	Decocción y baño	Hojas y ramas	Fresco
		Nervios	2				
		Problemas en la piel y cicatrizar	3				
18	Manzanilla	Dolor de estómago, cólicos e indigestión	11	25	Decocción e infusión	Hojas, ramas, tallos y flores	Fresco y seco

Núm.	Nombre común y científico	Usos medicinales	Número de citas por uso	Suma total de menciones por especie	Formas de preparación	Órgano de la planta utilizado	Estado del material vegetal
	Chamaemelum nobile (L.) All	Diabetes	3				
		Limpiar los ojos y cuidados de la piel	7				
		Nervios	4				
19	Santa María *Tanacetum parthenium* (L.) Sch. Bip.	Problemas digestivos	5	13	Decocción e infusión	Flores	fresco
		Reducir la fiebre y dolores de cabeza	5				
		Tratar los nervios e insonmio	1				
		Limpias y buena suerte	2				
20	Apio *Apium graveolens* L.	Problemas digestivos	4	10	Licuado	Hojas y raíz	Fresco
		Diabetes	4				
		Psoriasis	2				
21	Hierba de sapo *Eryngium alternatum* J. M. Coult. & Rose	Problemas respiratorios	3	3	Decocción y ungüento	Tallos y hojas	Fresco
22	Hinojo *Foeniculum vulgare* Mill.	Diarrea, dolor de estómago y cólicos	6	10	Licuado y decocción	Semillas o frutos	Seco
		Diabetes	2				
		Tratar el insomnio	2				
23	Planta de encaje *Ammi visnaga* (L.)	Diabetes	1	8	Decocción e infusión	Hojas y flores	Fresco
		Problemas respiratorios	6				
		Insomnio	1				
24	Eucalipto *Eucalyptus cinerea* F. Muell. ex Benth	Tos, dolor de garganta y congestión nasal	5	10	Decocción y ungüento	Hojas y corteza	Fresco y seco
		Desinfectar heridas y quemadas	5				
25	Eucalipto *Eucalyptus globulos* Labill.	Diabetes	2	9	Decocción y ungüento	Hojas y corteza	Fresco y seco
		Tos y dolor de garganta	4				
		Mal de aire	3				
26	Guayabo *Psidium guajava* L.	Diabetes	4	14	Decocción	Hojas y corteza	Fresco y seco
		Problemas gastrointestinales	10				
27	Canela *Cinnamomum zeylanicum* Blume	Mejorar la digestión	7	21	Decocción	Corteza	Fresco y seco
		Prevenir resfriados	7				
		Insomnio	5				
		Diabetes	2				

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Núm.	Nombre común y científico	Usos medicinales	Número de citas por uso	Suma total de menciones por especie	Formas de preparación	Órgano de la planta utilizado	Estado del material vegetal
28	Laurel *Litsea glaucescens* Kunth	Controlar nervios	2	9	Decocción e infusión	Hojas y corteza	Fresco y seco
		Diabetes y riñones	3				
		Problemas digestivos	3				
		problemas en la piel	1				
29	Capulín *Prunus Serotina* Ehrh	Diarrea	4	8	Decocción e infusión	Hojas y frutos	Fresco
		Gastritis	2				
		Tos y fiebre	2				
30	Níspero *Eriobotrya japónica* (Thunb.) Lindl	Diabetes	8	11	Decocción	Hojas	Fresco
		Problemas de riñón	3				
31	Epazote *Teloxys ambrosioides* (L.) W. A. Weber	Dolor de estómago y diarrea	4	6	Decocción	Ramas y tallo	Fresco y seco
		Tratar los nervios y susto	2				
32	Epazote de zorrillo *Dysphania graveolens* Mosyakin y Clemants	Dolor de estómago y diarrea	6	8	Decocción	Ramas y tallo	Fresco y seco
		Tratar los nervios y susto	2				
33	Gordolobo *Verbascum thapsus* L.	Tos, dolor de garganta, fiebre y resfriados	4	12	Decocción	Hojas y flores	Fresco y seco
		Desinflama y reduce el dolor en la piel	4				
		Insomnio	4				
34	Lengua de vaca *Buddleja sessiliflora* Kunth	Controlar nervios	2	4	Decocción y baño	Hojas	Fresco
		Susto o espanto	2				
35	Bugambilia *Bougainvillea glabra* Choisy	Tos, dolor de garganta y fiebre	8	8	Decocción e infusión	Flores	Fresco
36	Cola de caballo *Equisetum hyemale* L.	Dolor de cuerpo	5	11	Decocción e infusión	Tallos	Fresco
		Problemas de riñón	2				
		Cicatrizar heridas y quemaduras	4				
37	Cuachalalate *Amphipterygium adstringens* (Schltdl.) Schiede ex Standl.	Disolver cálculos renales	6	16	Decocción	Corteza	Fresco y seco
		Lavar heridas	10				
38	Hierba de pollo *Commelina coelestis* Willd.	Dolor de estómago y diarrea	3	3	Decocción	Hojas, flores y tallo	Fresco

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Núm.	Nombre común y científico	Usos medicinales	Número de citas por uso	Suma total de menciones por especie	Formas de preparación	Órgano de la planta utilizado	Estado del material vegetal
39	Hierba santa *Piper auritum* Kunth	Cicatrizar heridas	3	10	Decocción	Hojas y tallo	Fresco
		Diarrea	7				
40	Jengibre *Zingiber officinale* Roscoe	Problemas respiratorios	5	6	Decocción y licuado	Raíz	Fresco
		Diabetes	1				
41	Lentejilla *Lepidium virginicum* L.	Dolor de estomago	5	8	Decocción e infusión	Hojas, ramas y tallo	Fresco y seco
		Disolver cálculos renales	2				
		Limpias	1				
42	Madroño *Arbutus xalapensis* Kunth	Riñones	3	9	Infusión y macerado	Hojas y frutos	Fresco
		Tratar la piel irritada	6				
43	Malva *Malva parviflora* L.	Desinflamar y cicatrizar	4	7	Decocción e infusión	Hojas, flores y tallo	Fresco
		Nervios	1				
		Buena suerte	2				
44	Muicle *Justicia spicigera* Schltdl.	Anemia	8	10	Decocción e infusión	Hojas, flores, ramas y tallo	Fresco
		Nervios	2				
45	Nopal *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.	Diabetes	3	9	Licuado	Hojas o pencas	Fresco
		Digestión	6				
46	Palo dulce *Eysenhardtia polystachya* (Ortega) Sarg.	Problemas de riñón	5	13	Decocción	Corteza	Fresco y seco
		Desinflamar golpes	8				
47	Ruda *Ruta graveolens* L.	Problemas en la piel	4	21	Decocción e infusión	Hojas, flores, ramas y tallo	Fresco y seco
		Vomito	12				
		Limpias	3				
		Ansiedad	2				
48	Sábila *Aloe vera* (L.) Burm.f.	Desinflamar y cicatrizar heridas	7	12	De manera directa, licuado y decocción	Pulpa de la hoja	Fresco
		Diabetes	4				
		Buena suerte	1				
49	Saúco *Sambucus nigra* L.	Tos, gripe y fiebre	2	3	Decocción e infusión	Flores y frutos	Fresco
		Mal de aire	1				
50	Té Limón *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf	Dolor de estomago	11	13	Decocción e infusión	Hojas y tallo	Fresco y seco
		Nervios	2				
51	Tila	Controlar nervios y ansiedad	9	25	Decocción e infusión	Hojas, flores y corteza	Fresco y seco
		Mal de aire	2				

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Núm.	Nombre común y científico	Usos medicinales	Número de citas por uso	Suma total de menciones por especie	Formas de preparación	Órgano de la planta utilizado	Estado del material vegetal
	Tilia americana var. *Mexicana* (Schltdl.) Hardin	Mejorar la digestión	14				
52	Venenillo *Asclepias curassavica* L.	Antinflamatorio y analgésico	2	6	De manera directa o en forma de ungüento	Hojas, flores, tallo y raíz	Fresco
		Granos en la piel y verrugas	4				

En la Tabla 6 se presentan las categorías de uso medicinal identificadas, el número de reportes de uso por parte de los informantes, el número de especies mencionadas en cada categoría, el Factor de Consenso del Informante (*FCI*) y el porcentaje que representa cada categoría sobre el total de reportes.

La categoría con mayor relevancia es el sistema gastrointestinal, con 250 reportes de uso y 33 especies mencionadas, representando el 39% del total de reportes. Además, esta categoría presenta un *FCI* de 0.87, lo que indica un alto nivel de acuerdo entre los informantes respecto a qué plantas se utilizan para tratar este tipo de dolencias. Continúa el sistema respiratorio y osteomuscular, con 112 reportes de uso, 21 especies mencionadas, lo que representa el 17% y el *IFC* es de 0.82. Enseguida se encuentran las relacionadas con la piel, con 96 reportes de uso, 23 especies mencionadas y el *FCI* es de 0.76. La categoría del sistema nervioso y sistema excretor y endocrino presentan un menor número de reportes (85 y 60 respectivamente) y valores de *FCI* de 0.71 y 0.69. Finalmente, la categoría de filiación cultural, que incluye usos simbólicos o espirituales (susto o espanto, mal de aire y buena suerte), muestra el menor número de reportes (46) y el valor más bajo de *FCI* (0.60). El número de enfermedades o afecciones tratadas con las plantas medicinales evidencian su importancia en la medicina tradicional. Al realizarse la prueba de comparación χ^2 se encontró una diferencia significativa entre las diferentes enfermedades o afecciones tratadas, lo cual coincide con el desglose porcentual reportado (χ^2 cal = 48.048; gl = 5, $p \leq 0.0001$). En los resultados se identificó que los problemas gastrointestinales se presentan con mayor frecuencia en las tres localidades, además de que comparten características similares, tales como: son comunidades rurales de escasos recursos económicos, carecen de servicios básicos como atención médica de calidad, sistemas de abastecimiento de agua potable y servicios sanitarios adecuados. En investigaciones realizadas por Ávila-Uribe *et al*. (2016) identificaron que los problemas gastrointestinales son los que más se presentan en dos poblados del municipio San Martín de las pirámides, Estado de México, señalando que el 30 % de las plantas medicinales utilizadas son para tratar este problema. Parry *et al*. (2019) señalan que la pobreza y el retraso en la inversión en saneamiento, vacunación y salud pública son algunas de las causas de esta desigualdad en la distribución y atención de estas enfermedades.

Tabla 6. Categorías de uso medicinal, número de especies asociadas y valor del consenso de los informantes (*FCI*).
Table 6. Medicinal use categories, number of associated species and informants' consensus value (*FCI*).

Núm.	Categoría de uso medicinal	Núm. de reportes de uso	Núm. de especies mencionadas	Factor de Consenso del informante (*FCI*)	% de reporte de uso
1	Sistema gastrointestinal (dolor de estómago, cólicos, vómito, diarrea y flatulencias)	250	33	0.87	39%
2	Sistema respiratorio y osteomuscular (tos, gripa, fiebre, resfriados, dolor de cabeza, garganta y dolores musculares)	112	21	0.82	17%
3	Enfermedades en la piel (desinflamar golpes, lavar y cicatrizar heridas, para las quemaduras, piel irritada y lavar los ojos)	96	23	0.76	15%
4	Enfermedades del sistema nervioso (Ansiedad, nerviosismo e insomnio)	85	25	0.71	13%
5	Sistema excretor y endocrino (riñones y diabetes)	60	19	0.69	9%
6	Filiación cultural (susto o espanto, mal de aire y buena suerte)	46	19	0.60	7%

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Respecto a la forma de preparación de las plantas medicinales (Figura 1), las personas mencionaron diferentes maneras, pero principalmente es mediante decocción con 63%. Este proceso consiste en hervir la parte de la planta que se vaya a utilizar entre 10 y 20 min. Para la preparación del remedio utilizan 1 L de agua por un puño de material vegetal. El consumo es dos veces durante el día por un periodo no mayor a 3 días. Otra forma de preparación es la infusión, con 18%, que consiste en calentar el agua hasta que hierva, luego verter el agua en una taza o recipiente y agregar la parte de la planta a utilizar; dejar reposar unos 8 o 12 min. En tercer lugar, se encuentran las utilizadas de manera directa, en forma de ungüento y macerado con 13% y por último las usadas en jugos o licuados con 6%. Mediante la prueba de comparación χ^2 se encontró que hay diferencia significativa en las formas de preparación por la localidad (χ^2 cal = 106.560; gl = 3, $p \leq 0.0001$). Estos resultados concuerdan con los de Magaña-Alejandro *et al*. (2010), donde reportan que la cocción o decocción es la forma más empleada para el consumo de las plantas medicinales, estudio realizado en comunidades Maya-Chontales del estado de Tabasco.

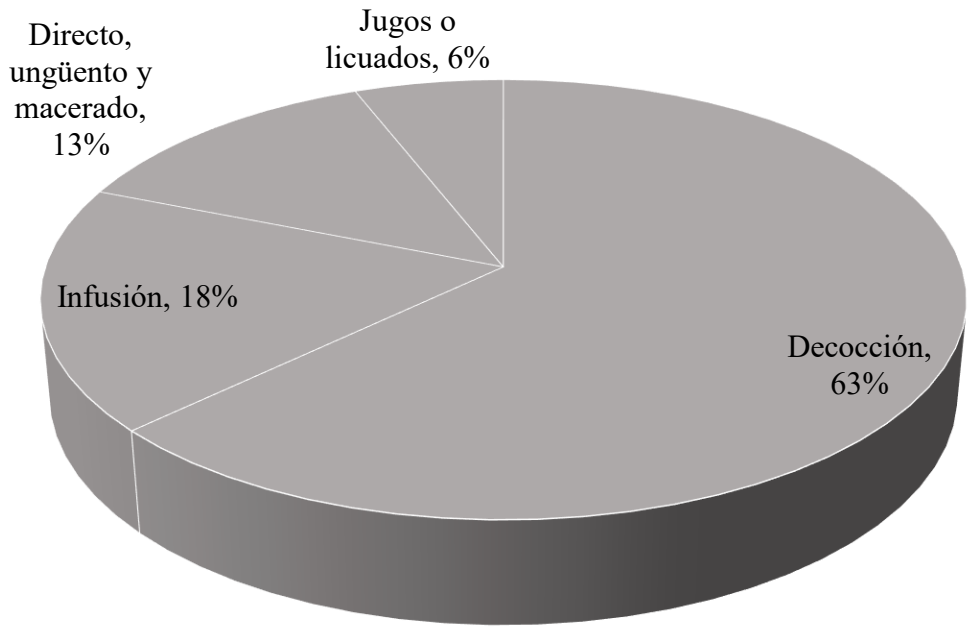


Figura 1. Formas de preparación de las plantas medicinales**.**
Figure 1. Preparation methods for medicinal plants.

En lo que corresponde a las estructuras vegetales utilizadas (Figura 2), se encontró que 47% de las personas entrevistadas utilizan las hojas, le siguen las ramas con 19%, 15% el tallo, 12% las flores, 3% los frutos, 3% la corteza y 1% la pulpa. Se encontró diferencia significativa en las partes utilizadas de la planta (χ^2 cal = 124.903; gl = 6, $p \leq 0.0001$). Los resultados que se obtuvieron son similares a los de Zambrano-Intriago *et al*. (2015) y Fernández-Cusimamani *et al*. (2019), al reportar que para el tratamiento de las enfermedades las hojas son las estructuras de la planta que más se emplean en los remedios herbales. Esto puede deberse a que la mayor parte de los metabolitos primarios y secundarios se producen en las hojas. Hay un alto contenido de compuestos y adicionalmente las hojas se pueden encontrar en mayor abundancia (Angulo *et al*., 2012).

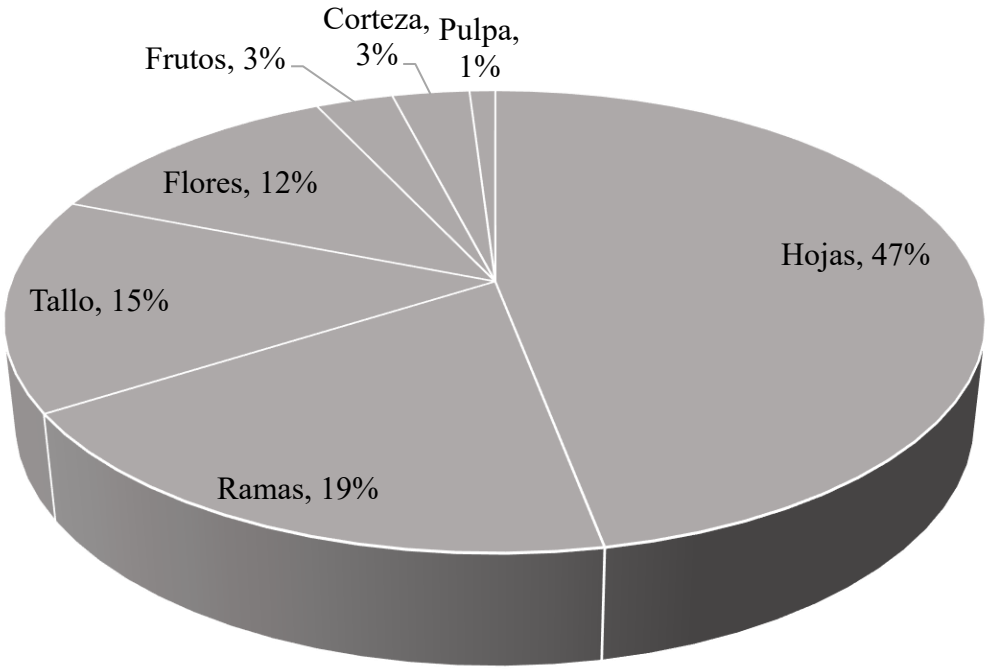


Figura 2. Estructuras vegetales utilizadas para la preparación de remedios medicinales.
Figure 2. Plant structures used for the preparation of medicinal remedies.

Se les preguntó a las personas sobre la frecuencia con la que consumen plantas medicinales, el 90% respondió que las utilizan cuando se presenta el malestar o la enfermedad, además mencionaron que si la enfermedad es muy grave o no la pueden controlar es cuando acuden al médico, de lo contrario prefieren hacer uso de las plantas medicinales por el acceso que tienen a ellas. Esto demuestra que existe un alto grado de dependencia. De acuerdo con los informantes locales, el conocimiento que tienen acerca de las plantas con propiedades curativas es empírico, por lo que es importante se continúen realizando investigaciones que permitan seguir utilizando las plantas medicinales, analizando los metabolitos secundarios y análisis clínicos en seres humanos, debido a que las altas dosis pueden ser tóxicas y en dosis bajas podrían no tener ningún efecto en el organismo o curar la enfermedad.
Por otra parte, se encontró que las plantas utilizadas por los habitantes, 56% (29 especies) son extraídas del medio silvestre y 44% (23 especies) son cultivadas en los huertos familiares. Este predominio de plantas silvestres refleja su importancia en la medicina tradicional, pero también resalta la necesidad de estrategias de conservación para prevenir la sobreexplotación y la pérdida de estos recursos naturales.

Saberes, usos medicinales y valor cultural del toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*) en comunidades de la Sierra de Taxco, Guerrero
A continuación, la información que se presenta está enfocada en la planta de toronjil. La (Figura 3) presenta la población encuestada que conoce, usa y que además tiene el toronjil en su casa. Puede observarse que más del 50% de los habitantes de las tres localidades sí conocen esta especie, por arriba del 39% lo ha usado y más del 29% lo tiene en casa. En las tres variables siempre destaca la localidad de San Juan Tenería, ya que es donde más lo conocen, lo usan y lo tienen en casa. Al realizar la prueba de comparación χ^2 se encontró diferencia significativa, lo que demuestra que el conocimiento, el uso y la disponibilidad de la planta varia considerablemente entre las localidades, para quien lo conoce (χ^2 cal = 29.700; gl = 2, $p \leq 0.0001$); para quien lo ha

usado (χ^2 cal = 20.690; gl = 2, $p \leq 0.0001$) y para los que tienen la planta en casa (χ^2 cal = 29.700; gl = 2, $p \leq 0.0001$), respectivamente. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Hernández-Ramírez *et al*. (2022), donde encontraron que, en la comunidad de General Heliodoro Castillo, municipio de Tlacotepec, Guerrero, también conocen el toronjil y lo usan como planta medicinal, además de darle otros usos como artesanal y ornamental. Por su parte, Santillán-Ramírez *et al*. (2008) reportan que los habitantes del municipio de Temoaya, Estado de México, utilizan el toronjil morado (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*) junto con el toronjil blanco (*Agastache mexicana* subsp. *xolocotziana*) como recurso terapéutico y ornamental.

Al preguntar si la planta de toronjil es nativa de estas localidades o introducida, el mismo porcentaje de personas que dijo conocer la planta, mencionó que no es nativa del lugar, comentaron que la han llevado de otros estados como Puebla y Morelos, y entre familiares y vecinos se han compartido las plantas. Es así como en la actualidad esta especie se puede observar en esta zona. De acuerdo con la prueba de χ^2, se encontró diferencia significativa, lo que indica que dependiendo de la localidad de estudio influye en el conocimiento de las personas sobre la introducción de la planta (χ^2 cal = 20.690; gl = 2, $p \leq 0.0001$).

Valdés-Cobos (2013) señala que las comunidades tradicionales han contribuido al aumento de la biodiversidad al intercambiar especies vegetales de una región a las de otras zonas promoviendo aquellas especies que les resultan útiles. Debido a esto, la biodiversidad, además de ser un patrimonio natural, también es cultural. Es importante hacer énfasis que la introducción de especies vegetales a una zona podría traer problemas de desplazamiento de especies nativas o incluso que podrían ser endémicas, y pérdida de compuestos que aún no se conocen. En las tres localidades se percibió que la preservación y conservación de plantas medicinales lo realizan mediante cubetas, por tal motivo el *Agastache mexicana* subsp. *mexicana* introducida a esta región no podría desplazar otras plantas ni afectar la biodiversidad y compuestos bioactivos.

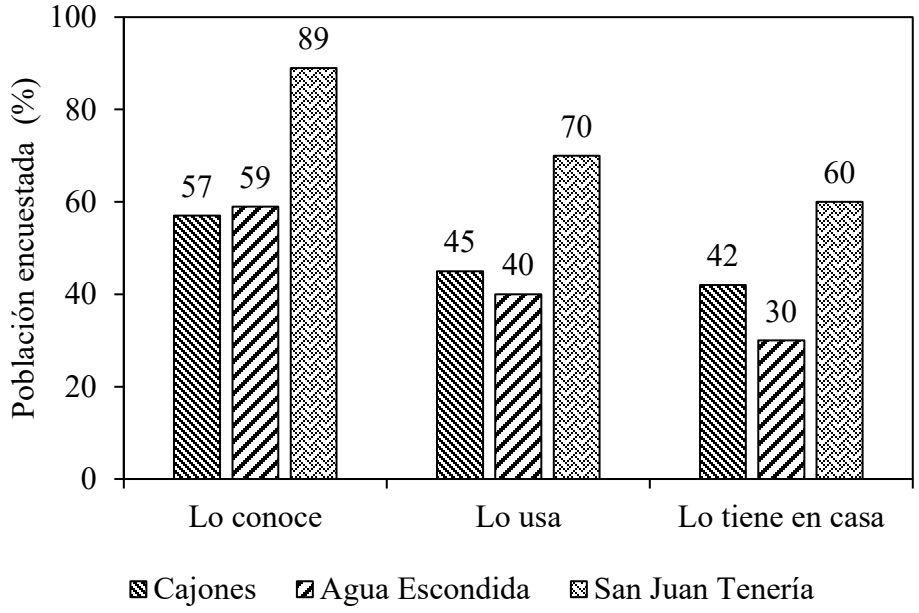


Figura 3. Población que conoce y usa el toronjil en las tres localidades de estudio de la sierra de Taxco, Guerrero, México.

Figure 3. Population that knows and uses lemon balm in the three study locations in the Taxco mountains, Guerrero, Mexico.

En cuanto a las enfermedades o padecimientos que las personas tratan con la planta de toronjil (Figura 4), se encontraron cuatro categorías. Principalmente el toronjil es empleado para tratar dolores de estómago y/o cólicos, enseguida se encuentra los problemas relacionados con afecciones respiratorias, tales como la tos, dolor de garganta y gripe; continúan los relacionados con los nervios y finalmente los que tienen que ver con filiación cultural como el susto. Según los informantes, su uso no solo se restringe a personas adultas, ya que también se administra a niños a partir de los diez años, principalmente en forma de infusión suave y especialmente para los problemas digestivos como dolor de estómago y cólicos. No se reportó su uso en niños más pequeños, debido a que, como lo mencionan, a partir de los diez años el organismo puede tolerar sus propiedades relajantes y digestivas sin riesgo.

El hallazgo de cuatro categorías principales de uso del toronjil refleja la diversidad funcional y la relevancia cultural que esta planta tiene en las comunidades estudiadas. En primer lugar, su empleo predominante para tratar dolores de estómago y cólicos indica un reconocimiento tradicional de sus propiedades digestivas, lo cual coincide con usos etnobotánicos reportados en otras investigaciones. En segundo lugar, el uso para afecciones respiratorias como tos, dolor de garganta y gripe resalta su importancia como remedio natural accesible para problemas comunes de salud. La tercera categoría, relacionada con afecciones nerviosas, muestra cómo el toronjil se valora también por sus efectos relajantes y ansiolíticos, diversificando sus usos medicinales. Finalmente, la inclusión de usos ligados a la filiación cultural, como el tratamiento del susto, evidencia el papel de la planta no solo en la salud física sino también en el bienestar emocional y espiritual dentro del contexto comunitario.

Además, la presencia de estos usos en niños mayores de diez años, pero no en niños menores, revela un conocimiento tradicional cuidadoso sobre la seguridad y tolerancia del organismo, lo que demuestra una práctica medicinal basada en la experiencia y la observación empírica. En conjunto, estas cuatro categorías reflejan cómo el toronjil es un recurso multifuncional y culturalmente significativo, lo que puede apoyar esfuerzos de conservación y valoración de esta especie en las localidades estudiadas.

En la prueba de comparación χ^2 se encontró que existe diferencia significativa entre las variables evaluadas (χ^2 cal = 20.420; gl = 6, $p \leq 0.0001$). Estos resultados concuerdan con los que obtuvieron Carrillo-Galván *et al*. (2020), quienes encontraron que 80% de la población entrevistada usan el toronjil morado (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*) para aliviar los problemas gastrointestinales, menstruales y para los nervios. A su vez, Estrada-Reyes *et al*. (2014) señalan que el toronjil morado es utilizado en la medicina tradicional mexicana para problemas de filiación cultural, como “susto” o “espanto” y como inductor del sueño. En las investigaciones realizadas en *A. mexicana* subsp. *mexicana* se han aislado metabolitos secundarios como mentona, camfeno, β–pineno, limoneno, p-cimeno, citronelal y pulegona, los cuales tienen extensas actividades biológicas, entre ellas carminativo, estomacal, antiespasmódico, antiinflamatorio, analgésico, aperitivo, antiséptico, expectorante y espasmolítico (Reyes *et al*., 2005). Por su parte, los estudios de Estrada-Reyes *et al*. (2014), en el extracto de *Agastache mexicana* identificaron el Acacetin-7- *O* -glucósido (7-ACAG), que ha mostrado ser de utilidad para el tratamiento de la ansiedad o las condiciones postoperatorias causadas por neurocirugías (Gálvez *et al*., 2015), estos estudios comprueban científicamente que los beneficios que brinda el toronjil se deben a los compuestos que se encuentran presentes.

Núm. 60: 411-439 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

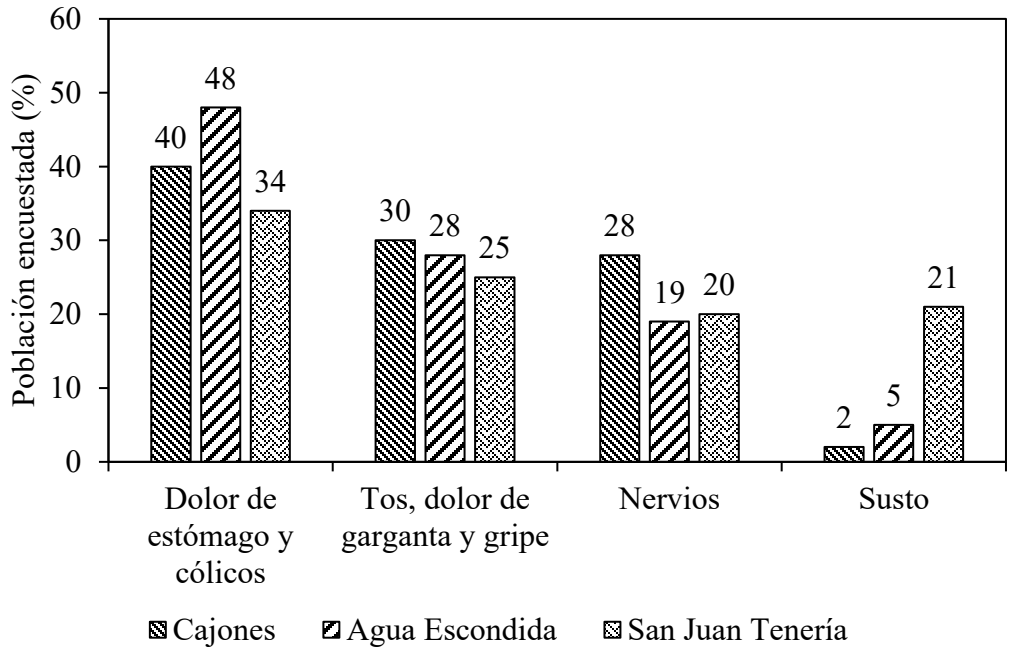


Figura 4. Padecimiento o síntomas que son tratados con la planta de toronjil por las tres localidades de estudio de la sierra de Taxco, Guerrero, México.
Figure 4. Condition or symptoms that are treated with the lemon balm plant in the three study locations in the Sierra de Taxco, Guerrero, Mexico.

Referente a las partes utilizadas de la planta de acuerdo con los resultados, las hojas son principalmente las más utilizadas, le siguen las ramas, el tallo y la flor (Figura 5). A través de la prueba de χ^2 se encontró diferencia significativa en la importancia de las partes de la planta utilizadas por la localidad (χ^2 cal = 20.971; gl = 6, $p \leq 0.0002$). La preferencia de uso por las hojas puede estar relacionado con la disponibilidad del material vegetal, ya que la planta produce suficiente follaje, además como ya se ha mencionado anteriormente en las hojas es donde se realiza la mayoría de la síntesis química y donde hay mayor concentración de los metabolitos secundarios (Angulo *et al*., 2012).

En la forma de preparación los entrevistados comentaron que consumen el toronjil hervido para té, el cual puede ser endulzado con azúcar o con miel, pues esta última le da un mejor sabor; así mismo mencionaron que lo hierven en agua y lo utilizan para bañar a aquellas personas enfermas de susto/espanto.

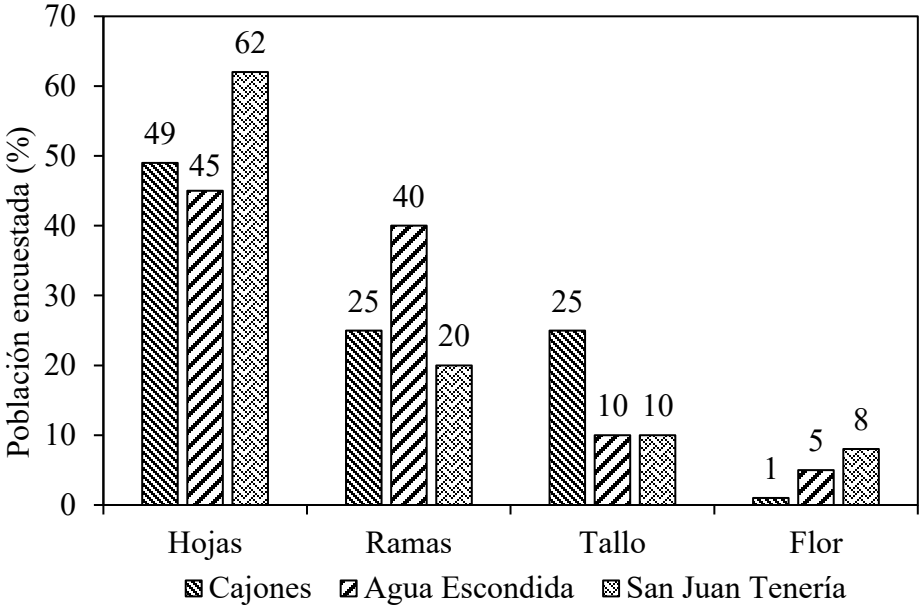


Figura 5. Partes de la planta de toronjil que son utilizadas por las personas de la sierra de Taxco, Guerrero, México.
Figure 5. Parts of the lemon balm plant that are used by people in the Sierra de Taxco, Guerrero, Mexico.

A los habitantes de las tres localidades se les preguntó si estarían dispuestos a comprar la planta de toronjil en caso de que no la tuvieran. Los resultados muestran que un 86% sí la compraría, lo cual revela un alto grado de valoración hacia la planta, no solo por su utilidad medicinal, sino también por la confianza que se tiene en sus beneficios para la salud. En contraste, solo un 14% indicó que no la compraría, argumentando que pueden obtenerla mediante redes de intercambio familiar o comunitario, lo que también subraya la circulación local del conocimiento y los recursos vegetales. Así mismo, a las personas se les preguntó cuánto podrían pagar por la planta. El valor de compra fue más alto en la localidad de Cajones, ya que 60% está dispuesta a pagar entre 31 y 60 pesos por ella; luego le siguió la localidad de Agua Escondida con un 41% con el mismo precio (Figura 6). En la prueba de comparación χ^2 se encontró diferencia significativa (χ^2 cal = 57.604; gl = 8, $p \leq 0.0001$), esto demuestra que el valor económico está asociado con la localidad de estudio. Gutiérrez-García *et al*. (2020) encontraron que el precio de venta de las plantas medicinales en la zona oriente del Estado de México va de los 10 a 25 pesos el manojito, esto depende de la cantidad que contenga el manojo y de la temporada. El hecho de que las personas estén dispuestas a pagar entre 31-60 por una planta de toronjil indica no solo que su precio es accesible, sino que es percibido como una inversión valiosa. Esta percepción se fortalece aún más por la posibilidad de cultivarla en el huerto familiar, lo cual permite un uso continuo y sustentable, ya que la planta puede seguir proporcionando materia vegetal de forma prolongada.

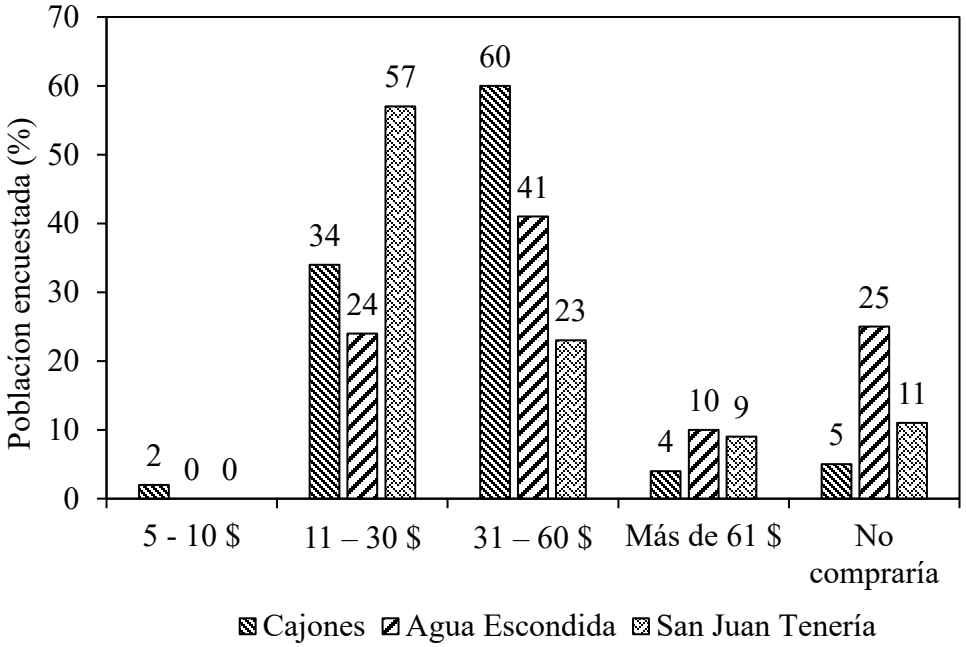


Figura 6. Valor económico que le dan al toronjil en las tres localidades de estudio de la sierra de Taxco, Guerrero, México.
Figure 6. Economic value given to lemon balm in the three study locations in the Sierra de Taxco, Guerrero, Mexico.

Al platicar con la población entrevistada referente a los problemas de saqueo de las plantas medicinales de su ambiente natural y hacer de su conocimiento las consecuencias que conlleva esta actividad, se encontró que más del 90% de las tres localidades muestran interés por llevar a cabo la preservación de las especies medicinales. Una manera de preservar los recursos naturales es dando un manejo sostenible, por lo que la población está interesada en el cultivo y conservación, con la finalidad de seguir utilizando este valioso recurso sin ocasionar su disminución, además de que esta acción contribuye a mantener las posibilidades para satisfacer las necesidades de las generaciones tanto actuales como futuras.

Curso-taller demostrativo

Finalmente, una vez recabada la información, en una segunda etapa se regresó a cada una de las localidades para llevar a cabo un curso-taller demostrativo, con el objetivo de compartir conocimientos sobre el manejo agronómico de las plantas medicinales utilizadas en la región. Para la actividad se contó con un total de 53 personas. En la localidad de Cajones participaron 12 personas: 8 mujeres y 4 hombres. En Agua Escondida asistieron 14 personas, 9 mujeres y 5 hombres. Finalmente, en San Juan Tenería se contó con la participación de 27 personas, de las cuales 22 fueron mujeres y 5 hombres. Los rangos de edad de las personas que asistieron al taller fueron los siguientes: 20-30 años (4 personas); 31-40 años (9); 41-50 años (22); y 51-60 años (18).

En este taller se abordaron temas como la nutrición vegetal, el uso de fertilizantes orgánicos y químicos, los nutrientes esenciales y su función en la fisiología de las plantas, así como las dosis adecuadas según la etapa fenológica. Se dieron recomendaciones sobre riego, selección de sustratos, y el manejo de plagas y enfermedades. Se puso especial énfasis en el toronjil, ya que, como se comentó anteriormente, esta especie es extraída principalmente del medio silvestre, se espera que a futuro, puedan establecerse áreas destinadas a su cultivo, tanto para reducir su extracción del medio natural, así como para contar con materia prima que permita realizar estudios sobre sus metabolitos secundarios los cuales podrían abrir la posibilidad de desarrollar

fitomedicamentos derivados de esta especie, siempre y cuando se compruebe su eficacia y seguridad. Asimismo, dada su alta demanda y uso frecuente, el toronjil podría comercializarse, lo que representaría una alternativa productiva viable para estas comunidades, generando ingresos económicos para sus familias. Ya en trabajos posteriores podrían incorporarse otras plantas de interés medicinal que no están siendo cultivadas.

El curso-taller fue valorado positivamente por los asistentes, quienes lo describieron como una experiencia enriquecedora, en donde además de adquirir nuevas herramientas para mejorar el cultivo de sus plantas medicinales, las y los participantes tuvieron la oportunidad de compartir su visión sobre el papel que tienen las plantas medicinales en su vida cotidiana. Las personas manifestaron que estas especies representan no solo una alternativa accesible y efectiva para el cuidado de la salud, sino también una parte fundamental de su identidad cultural y de sus prácticas heredadas de generación en generación. Señalaron que, ante la pérdida progresiva de estos conocimientos, es urgente fomentar su rescate y conservación, ya que muchos jóvenes ya no reconocen ni saben cómo utilizar las plantas medicinales.

Un aspecto relevante que destacar es la alta participación femenina, que nuevamente se hace evidente en los resultados. Esto refleja el interés particular que tienen las mujeres en el aprendizaje y manejo del cultivo de plantas medicinales. Este estudio resalta la necesidad de fomentar una mayor inclusión del género masculino en este tipo de iniciativas, así como la participación de los jóvenes, promoviendo su sensibilización y participación para lograr un enfoque verdaderamente comunitario y equitativo.

En conjunto, el taller fortaleció el diálogo de saberes entre la comunidad y el equipo facilitador, empoderó a los participantes con conocimientos técnicos útiles y reforzó el valor que las personas otorgan a sus recursos vegetales locales, demostrando que el intercambio de conocimientos puede contribuir tanto al bienestar comunitario como a la conservación de especies de importancia medicinal.

Consideramos que, al tratarse de la primera actividad de este tipo realizada en estas localidades, la participación fue positiva, con un total de 53 personas asistentes. No obstante, esta cifra representa solo una parte del total de personas convocadas (144), lo que indica un área de oportunidad para fortalecer la difusión y el involucramiento comunitario en futuras actividades.

Al finalizar el taller, cada participante recibió cinco macetas con plantas de toronjil listas para trasplante, con el propósito de promover su cultivo en huertos familiares, buscando aumentar la disponibilidad de la planta en las localidades. Sin embargo, no se dio un seguimiento para monitorear si fueron trasplantadas y cuantas lograron establecerse con éxito. Esto representa una oportunidad para futuras intervenciones y dar seguimiento al proceso y fortalecer los resultados esperados.

CONCLUSIONES

En las localidades estudiadas se ha evidenciado un amplio conocimiento sobre el uso de plantas medicinales. Este saber tradicional sigue siendo un recurso fundamental, no solo por su accesibilidad, sino también por su profundo valor cultural. Más allá de su uso terapéutico, estas plantas están estrechamente vinculadas a prácticas, saberes y creencias que conforman la identidad de estas comunidades.

La mujer desempeña un papel fundamental en la conservación y transmisión del conocimiento tradicional sobre el uso de plantas medicinales. En este estudio puede observarse que, son ellas quienes, en su mayoría, recolectan, preparan y administran los remedios a base de plantas, conocimientos que han heredado y transmiten oralmente de generación en generación. Sin embargo, también reconocen que estos saberes están en riesgo de perderse debido al escaso interés de los jóvenes por aprenderlos y preservarlos, siendo las personas adultas particularmente las de mayor edad quienes actualmente concentran la mayor parte de este conocimiento. Esta brecha generacional evidencia la necesidad urgente de fomentar espacios intergeneracionales de aprendizaje y valorización del conocimiento tradicional, para que los saberes no desaparezcan con quienes hoy los resguardan.

Con respecto al toronjil (*Agastache mexicana* subsp. *mexicana*) destaca como una planta de gran valor terapéutico y cultural en las comunidades estudiadas. Sus usos para tratar afecciones digestivas, respiratorias, nerviosas y culturales reflejan un conocimiento tradicional integral. Además de ser un recurso accesible, su uso está ligado a prácticas que fortalecen la identidad comunitaria, lo que subraya la importancia de conservar estos saberes ante su posible pérdida. Esta especie a pesar de no ser originaria de las localidades estudiadas ha sido integrada al conocimiento etnobotánico local, lo que evidencia la capacidad de las comunidades para adaptar y valorar nuevas especies según su utilidad terapéutica. Esta valoración podría aprovecharse para fomentar su cultivo controlado, reduciendo así la presión sobre las poblaciones silvestres.

El curso-taller participativo sobre el manejo agronómico del toronjil y otras plantas medicinales representó una herramienta clave para el fortalecimiento del conocimiento tradicional y el diálogo entre saberes locales y técnicos. Sin embargo, será importante evaluar a largo plazo el impacto de estas intervenciones participativas en la conservación de la biodiversidad y la salud comunitaria.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Barojas, S. (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud En Tabasco*, *11*(1–2), 333–338. https://www.redalyc.org/pdf/487/48711206.pdf

Akram, M., Riaz, M., Noreen, S., Shariati, M. A., Shaheen, G., Akhter, N., Parveen, F., Akhtar, N., Zafar, S., Owais Ghauri, A., Riaz, Z., Khan, F. S., Kausar, S., & Zainab, R. (2020). Therapeutic potential of medicinal plants for the management of scabies. In *Dermatologic Therapy* (Vol. 33, Issue 1). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1111/dth.13186

Angulo, A. F., Rosero, R. A., & González Insuasti, M. S. (2012). Estudio etnobotánico de las plantas medicinales utilizadas por los habitantes del corregimiento de Genoy, Municipio de Pasto, Colombia. *Universidad y Salud*, *Vol. 14*(2), 168–185. http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v14n2/v14n2a07.pdf

Ávila-Uribe, M. M., García-Zárate, S. N., Sepúlveda-Barrera, A. S., & Godínez-Rodríguez, M. A. (2016). Plantas medicinales en dos poblados del municipio de San Martín de las Pirámides, Estado de México. *Polibotánica*, *42*, 215–245. https://doi.org/10.18387/polibotanica.42.11

Banerjee, S. (2024). *Introduction to Ethnobotany and Traditional Medicine* (pp. 1–30). https://doi.org/10.1007/978-981-97-4600-2_1

Carrillo-Galván, G., Bye, R., Eguiarte, L. E., Cristians, S., Pérez-López, P., Vergara-Silva, F., & Luna-Cavazos, M. (2020). Domestication of aromatic medicinal plants in Mexico: Agastache (Lamiaceae)- A n ethnobotanical, morpho-physiological, and phytochemical analysis. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, *16*(1), 1–16. https://doi.org/10.1186/s13002-020-00368-2

Chen, S. L., Yu, H., Luo, H. M., Wu, Q., Li, C. F., & Steinmetz, A. (2016). Conservation and sustainable use of medicinal plants: Problems, progress, and prospects. In *Chinese Medicine (United Kingdom)* (Vol. 11, Issue 1). https://doi.org/10.1186/s13020-016-0108-7

CONEVAL. (2022). *Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Medición de la pobreza.* https://www.coneval.org.mx/Medicion/MP/Paginas/Pobreza_2022.aspx

De Blas, I. (2006). *Sofware winEpi Facultad de Veterinaria (p.)*. http://www.winepi.net/

Ericson, J. A. (2006). A participatory approach to conservation in the Calakmul Biosphere Reserve, Campeche, Mexico. *Landscape and Urban Planning*, *74*(3–4). https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.09.006

Estrada-Reyes, R., López-Rubalcava, C., Ferreyra-Cruz, O. A., Dorantes-Barrón, A. M., Heinze, G., Moreno Aguilar, J., & Martínez-Vázquez, M. (2014). Central nervous system effects and chemical composition of two subspecies of *Agastache mexicana*; An ethnomedicine

of Mexico. *Journal of Ethnopharmacology*, *153*(1), 98–110. https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.12.057

Fernández-Cusimamani, E., Espinel-Jara, V., Gordillo-Alarcón, S., Castillo-Andrade, R., Žiarovská, J., Zepeda-Del Valle, J. M., & Lara-Reimers, E. A. (2019). Estudio etnobotánico de plantas medicinales utilizadas en tres cantones de la provincia Imbabura, Ecuador. *Agrociencia*, *53*(5), 797–810. https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1844/1841

Gálvez, J., Estrada-Reyes, R., Benítez-King, G., Araujo, G., Orozco, S., Fernández-Mas, R., Almazán, S., & Calixto, E. (2015). Involvement of the GABAergic system in the neuroprotective and sedative effects of acacetin 7-O-glucoside in rodents. *Restorative Neurology and Neuroscience*, *33*(5), 683–700. https://doi.org/10.3233/RNN-140486

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.* http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1

Gilmore, M. P., & Young, J. C. (2012). The use of participatory mapping in ethnobiological research, biocultural conservation, and community empowerment: A case study from the peruvian amazon. *Journal of Ethnobiology*, *32*(1). https://doi.org/10.2993/0278-0771-32.1.6

Gutiérrez-García, G., Espinosa-Ayala, E., Abel Hernández-García, P., Pavón-Silva, T. B., & Márquez-Molina, O. (2020). Conocimiento y práctica de la herbolaria en el estado de México, pautas hacia la sustentabilidad. *Agrociencia*, *54*(8), 1043–1058. https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2301/2022

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

Hernández-Ramírez, U., Trujillo-Nájera, M., Romero-Rosales, T., Huicochea Moctezuma, A., Adame-Zambrano, T. de J., & Gruintal-Santos, M. A. (2022). Percepción local de los usos y situación ambiental y económica del toronjil (Lamiaceae) en tres comunidades del estado de Guerrero, México. *Polibotánica*, *(54)*, 257–269. https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.16

INEGI. (2020). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Censo de Población y Vivienda 2020*. https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/default.html#Datos_abiertos

Jiménez-González, A., Mora Zamora, K. J., Rosete Blandariz, S., & Cabrera Verdesoto, C. A. (2021). Utilización de plantas medicinales en cuatro localidades de la zona sur de Manabí, Ecuador. *Siembra*, *8*(2). https://doi.org/10.29166/siembra.v8i2.3223

Lot, A., & Chiang, F. (1986). *Manual de Herbario: Administración y manejo de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos. Consejo Nacional de la Flora de México, A.C. México. 142 pp.* https://issuu.com/jpintoz/docs/1986_lot-chiang_manualherbario_cnfm

Magaña-Alejandro, M. A., Gama-Campillo, L. M., & Mariaca-Méndez, R. (2010). El uso de las plantas medicinales en las comunidades Maya-Chontales de Nacajuca, Tabasco, México. *Polibotánica*, *(29)*, 213–262. https://www.scielo.org.mx/pdf/polib/n29/n29a11.pdf

Martínez, M. (1998). *La investigación cualitativa etnográfica en educación. Tercera edición. México: Trillas.* (pp. 65–68). https://profeinfo.files.wordpress.com/2020/06/investigacion-cualitativa-etnografica-martinez.pdf

Ojha, S. N., Tiwari, D., Anand, A., & Sundriyal, R. C. (2020). Ethnomedicinal knowledge of a marginal hill community of Central Himalaya: Diversity, usage pattern, and conservation concerns. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, *16*(1). https://doi.org/10.1186/s13002-020-00381-5

Parry, L., Radel, C., Adamo, S. B., Clark, N., Counterman, M., Flores-Yeffal, N., Pons, D., Romero-Lankao, P., & Vargo, J. (2019). The (in)visible health risks of climate change. In *Social Science and Medicine* (Vol. 241). https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2019.112448

Recibido:
28/enero/2025

Aceptado:
9/junio/2025

Phondani, P. C., Bhatt, I. D., Negi, V. S., Kothyari, B. P., Bhatt, A., & Maikhuri, R. K. (2016a). Promoting medicinal plants cultivation as a tool for biodiversity conservation and livelihood enhancement in Indian Himalaya. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, *9*(1). https://doi.org/10.1016/j.japb.2015.12.001

Phondani, P. C., Bhatt, I. D., Negi, V. S., Kothyari, B. P., Bhatt, A., & Maikhuri, R. K. (2016b). Promoting medicinal plants cultivation as a tool for biodiversity conservation and livelihood enhancement in Indian Himalaya. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, *9*(1), 39–46. https://doi.org/10.1016/j.japb.2015.12.001

Reyes, R. S., Rojas, I., Arvizu, G., Muñoz, D., Peréz, D., & Sucilla, M. (2005). Caracterización del potencial fitotóxico de *Agastache mexicana* (Kunth.) Lint *et* Epling. *Investigación Universitaria Multidisciplinaria: Revista de Investigación de La Universidad Simón Bolívar*, *(4)*, 2.

Rodrigues, E., Cassas, F., Conde, B. E., Da Cruz, C., Barretto, E. H. P., Dos Santos, G., Figueira, G. M., Passero, L. F. D., Dos Santos, M. A., Gomes, M. A. S., Matta, P., Yazbek, P., Garcia, R. J. F., Braga, S., Aragaki, S., Honda, S., Sauini, T., Da Fonseca-Kruel, V. S., & Ticktin, T. (2020). Participatory ethnobotany and conservation: A methodological case study conducted with quilombola communities in Brazil's Atlantic Forest. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, *16*(1). https://doi.org/10.1186/s13002-019-0352-x

Santillán-Ramírez, M. A., López-Villafranco, M. E., Aguilar-Rodríguez, S., & Aguilar-Contreras, A. (2008). Estudio etnobotánico, arquitectura foliar y anatomía vegetativa de *Agastache mexicana* ssp. *mexicana* y *A. mexicana* ssp. *xolocotziana*. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *79*(2). https://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v79n2/v79n2a24.pdf

Shukla, S. K. (2023). Conservation of medicinal plants: challenges and opportunities. *Journal of Medicinal Botany*. https://doi.org/10.25081/jmb.2023.v7.8437

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/2022.8.0081012

Ssenku, J. E., Okurut, S. A., Namuli, A., Kudamba, A., Tugume, P., Matovu, P., Wasige, G., Kafeero, H. M., & Walusansa, A. (2022). Medicinal plant use, conservation, and the associated traditional knowledge in rural communities in Eastern Uganda. *Tropical Medicine and Health*, *50*(1). https://doi.org/10.1186/s41182-022-00428-1

Thompson, E. (1992). *Wiley Series en probabily and statistics*. *(Vol. 1)*.

UNAM. (2009). *Universidad Nacional Autónoma de México. Biblioteca Digital de la Medicina Tradicional Mexicana.* http://www.medicinatradicionalmexicana.unam.mx/

Valarezo-García, C., Jaramillo Abril, D., Djabayan Djibeyan, P., Vásconez Andrade, P., & Falconí Ontaneda, F. (2016). La amazonia ecuatoriana y sus saberes ancestrales; el uso del extracto de corteza del árbol de Piwi (*Pictocoma discolor*) un saber singular en el accidente ofídico. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, *47*(4), 26–34.

Valdés-Cobos, A. (2013). Conservación y uso de plantas medicinales el caso de la región de la Mixteca Alta Oaxaqueña, México. *Ambiente y Desarrollo*, *17*(33), 87–97. file:///C:/Users/mgrui/Downloads/adminpujojs,+AyD+17-33+Art.+6%20(20).pdf

Zambrano-Intriago, L. F., Buenaño-Allauca, M. P., Mancera-Rodríguez, N. J., & Jiménez-Romero, E. (2015). Estudio etnobotánico de plantas medicinales utilizadas por los habitantes del área rural de la Parroquia San Carlos, Quevedo, Ecuador. *Universidad y Salud*, *17*(1), 97–111. http://www.scielo.org.co/pdf/reus/v17n1/v17n1a09.pdf

Zhang, Y., Long, Y., Yu, S., Li, D., Yang, M., Guan, Y., Zhang, D., Wan, J., Liu, S., Shi, A., Li, N., & Peng, W. (2021). Natural volatile oils derived from herbal medicines: A promising therapy way for treating depressive disorder. In *Pharmacological Research* (Vol. 164). https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.105376

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

ETNOBOTÁNICA DE LOS CHILES SILVESTRES EN DOS COMUNIDADES CH'OLES DE TACOTALPA, TABASCO, MÉXICO

ETHNOBOTANY OF WILD CHILI PEPPERS IN TWO CH'OL COMMUNITIES OF TACOTALPA, TABASCO, MEXICO

Morales Valenzuela, G., M.I. Villegas Ramírez

ETNOBOTÁNICA DE LOS CHILES SILVESTRES EN DOS COMUNIDADES CH'OLES DE TACOTALPA, TABASCO, MÉXICO
ETHNOBOTANY OF WILD CHILI PEPPERS IN TWO CH'OL COMMUNITIES OF TACOTALPA, TABASCO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. **60**: 441-457 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.26

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 441-457 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Etnobotánica de los chiles silvestres en dos comunidades ch'oles de Tacotalpa, Tabasco, México

Ethnobotany of wild chili peppers in two ch'ol communities of Tacotalpa, Tabasco, Mexico

Guadalupe Morales Valenzuela / gpemorales1974@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4289-5415
María Isabel Villegas Ramírez https://orcid.org/0000-0001-8912-5261
Núcleo Académico de la Maestría en Ciencias en Gestión del Patrimonio Biocultural
Universidad Intercultural del Estado de Tabasco

Morales Valenzuela, G., M.I. Villegas Ramírez

ETNOBOTÁNICA DE LOS CHILES SILVESTRES EN DOS COMUNIDADES CH'OLES DE TACOTALPA, TABASCO, MÉXICO

ETHNOBOTANY OF WILD CHILI PEPPERS IN TWO CH'OL COMMUNITIES OF TACOTALPA, TABASCO, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 441-457. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.25

RESUMEN: Se reconocen 43 especies pertenecientes al género *Capsicum*, de las cuales solo cinco se han domesticado, mientras que el resto se considera estrictamente silvestre. Estas especies silvestres representan un valioso recurso local arraigado a la cultura ya que su conservación y uso están intrínsecamente ligados a las comunidades rurales e indígenas. Los estudios etnobotánicos permiten recuperar los conocimientos asociados al manejo de las especies vegetales a fin de implementar estrategias de conservación de éstas. El objetivo de esta investigación fue identificar los morfotipos, usos y manejo de los chiles silvestres en la Sierra de Tabasco. El estudio se llevó a cabo en dos comunidades ch'oles del municipio de Tacotalpa, empleando entrevistas estructuradas y semiestructuradas, así como recorridos por las comunidades. Se identificaron ocho morfotipos de chiles correspondientes a dos especies (*C. annumm y C. frutescens*), de los cuales los más conocidos y consumidos son amashito, picopaloma, blanco y garbanzo. Aunque principalmente se consumen como alimento, también se les atribuyen usos medicinales y rituales. El consumo de chiles silvestres, principalmente en salsas, persiste debido a su arraigo cultural y la forma de preparación varía según el tipo de chile, amashito y picopaloma se suelen asar, mientras que el blanco y garbanzo se utilizan frescos. En cuanto al manejo poscosecha, se observa una práctica limitada de curtido o deshidratado de frutos. De acuerdo con las entrevistas, los chiles silvestres enfrentan el riesgo de desaparición debido a la destrucción de su hábitat natural. Aunque algunos campesinos realizan almácigos para propagar las plantas, generalmente se considera que estos chiles crecen de manera espontánea. Los chiles tienen un papel integral en la vida cotidiana y la cultura de las comunidades ch'oles del municipio de Tacotalpa y son un recurso muy versátil por lo que es necesario implementar acciones de conservación y manejo sostenible.
Palabras clave: tradición, diversidad, manejo, biocultural, costumbre, medicinal, ritual, silvestre.

ABSTRACT: Forty-three species belonging to the genus *Capsicum* have been identified, of which only five have been domesticated, while the rest are considered strictly wild. These wild species represent a valuable local resource deeply rooted in culture, as their conservation and use are intrinsically linked to rural and Indigenous communities. Ethnobotanical studies enable the recovery of knowledge associated with the management of plant species to develop conservation strategies for these resources. The objective of this research was to identify the morphotypes, uses, and management of wild chili peppers in the Sierra de Tabasco. The study was conducted in two ch'ol communities in the municipality of Tacotalpa, employing structured and semi-structured interviews as well as community surveys. Eight morphotypes of chili peppers corresponding to two species (*C. annuum* and *C. frutescens*) were identified, with the most well-known and consumed being amashito, picopaloma, blanco, and garbanzo. While primarily consumed as food, these chiles are also attributed to medicinal and ritual uses. The consumption of wild chili peppers, particularly in

sauces, persists due to cultural ties, and preparation methods vary depending on the morphotype of chili peppers: amashito and picopaloma are usually roasted, while blanco and garbanzo are used fresh. Post-harvest management shows limited practices of pickling or drying fruits. According to interviews, wild chili peppers face the risk of disappearing due to the destruction of their natural habitat. Although some farmers create seedbeds to propagate the plants, these chiles are generally considered to grow spontaneously. Chili peppers play an integral role in the daily life and culture of the ch'ol communities of Tacotalpa and are a highly versatile resource, making it essential to implement conservation actions and sustainable management practices.
Key words: tradition, diversity, management, biocultural, custom, medicinal, ritual.

INTRODUCCIÓN

Se reconocen 43 especies pertenecientes al género *Capsicum*, de las cuales solo cinco se han domesticado (*C. annuum, C. chinense, C. pubescens, C. frutescens* y *C. baccatum*), mientras que el resto se considera silvestres (Barboza *et al.*, 2022). Estas especies silvestres representan un valioso recurso local arraigado en la tradición cultural, estando su conservación y uso intrínsecamente ligados a la comunidad local. Long-Solís (1998) señala que el chile, está profundamente arraigado en las diversas culturas del México contemporáneo.

La investigación sobre el género *Capsicum* en el sureste de México es fundamental no solo para la conservación de la diversidad genética, sino también para el aprovechamiento cultural y agrícola de sus especies. El trabajo reciente de Castillo-Aguilar *et al.* (2023), se centra en la caracterización morfológica de chiles maax (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) y picopaloma (*Capsicum frutescens*), encontrando que estas especies son representativas de la gran diversidad de morfotipos en la región sureste de México.

Por su parte, estudios arqueológicos en Chiapas, analizando residuos de muestras de cerámica revelan la utilización prehispánica de los chiles en Chiapas, demuestran el uso histórico en la gastronomía y la cultura local y ofrecen una perspectiva importante sobre la relevancia cultural de *Capsicum* en el sureste de México (Powis *et al*., 2013).

En Tabasco los chiles silvestres son de uso común en comunidades rurales e indígenas ya que se conservan en los huertos de traspatio y otros agroecosistemas tradicionales. Montes-Hernández *et al.* (2006) señalan que los chiles silvestres son una fuente adicional de ingresos en la época de recolecta ya que puede representar hasta el 46% del total del ingreso familiar. Los habitantes de la sierra de Tabasco recolectan los chiles para el autoconsumo y comercialización, lo que representa una fuente importante de generación de recursos económicos (Lina-Manjarrez *et al.*, 2022). Sin embargo, esta actividad ejerce una presión fuerte sobre el recurso, y los mismos recolectores manifiestan una disminución en el tamaño de las poblaciones de chile silvestre.

Al respecto, Balderas Quezada *et al.* (2023) mencionan que, en el caso del chile piquín (*C. annumm* var. *glabriusculum*), su aprovechamiento y comercialización derivan principalmente de recolectas de plantas silvestres, sin embargo, las malas prácticas de cosecha han impactado negativamente en las plantas, ocasionando un deterioro de las poblaciones silvestres. Además, Montes-Hernández *et al.* (2006) señalan que la eliminación del hábitat en el que crecen los chiles silvestres y el deterioro del ecosistema han puesto en peligro de extinción a estos chiles. Por lo que se debe trabajar para implementar buenas prácticas para la conservación de este recurso.

Las investigaciones realizadas en Tabasco evidencian la importancia de fortalecer las conexiones entre la conservación de la biodiversidad y el patrimonio cultural que estos chiles representan. Por ejemplo, un estudio realizado por Velázquez-Ventura *et al.* (2018) indica que estas especies son cruciales no solo para la biodiversidad, sino también para preservar prácticas culturales y económicas en la región.

En este sentido, los estudios etnobotánicos permiten recuperar los conocimientos asociados al uso y manejo de las especies vegetales por comunidades indígenas, a fin de implementar estrategias para la conservación de las especies de interés. Además, es importante que los estudios etnobotánicos integren datos cualitativos y cuantitativos ya que la combinación de

ambos enfoques, como propone la etnobiología evolutiva, muestra cómo los factores culturales y ecológicos moldean la relación entre humanos y plantas, lo que permite una comprensión holística de las interacciones humano-planta (Albuquerque *et al.*, 2015). Por su parte, Gaoue *et al.* (2021) destacan la necesidad de integrar métodos mixtos para validar conocimientos locales con datos ecológicos y modelar impactos antropogénicos.

Por lo que un estudio etnobotánico de chiles silvestres es importante no solo para preservar el conocimiento tradicional, sino también para promover la conservación de la diversidad biológica y cultural. Esto requiere una integración continua de enfoques cualitativos y cuantitativos que reflejan las complejas interacciones entre las comunidades y su entorno biológico. Por lo que el objetivo de esta investigación fue identificar los morfotipos, usos, prácticas de manejo, así como la percepción del riesgo y las causas de pérdida de los chiles silvestres en dos comunidades ch'oles del municipio de Tacotalpa, Tabasco, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en las comunidades de Cuitláhuac y Oxolotán, Tacotalpa, Tabasco, este municipio encuentra entre las coordenadas 17° 35' 5" latitud norte y 92° 49' 6" longitud oeste. Colinda al norte con los municipios de Jalpa y Macuspana, Tabasco, al sur y al este con el estado de Chiapas y al oeste con el municipio de Teapa, Tabasco (Figura 1). De acuerdo con Morales-Valenzuela & Carrillo-Contreras (2020), estas localidades forman parte de la Región Biocultural Ch'ol de Tacotalpa.

En esta región se encuentran algunos relictos de selva alta perennifolia y selva mediana subperennifolia, cuya protección ha sido reconocida a nivel estatal mediante decreto de Áreas Naturales Protegidas, además de acahuales y agroecosistemas tradicionales. Esta región alberga una importante diversidad biológica que se está viendo amenazada por factores como la deforestación, la agricultura intensiva y el cambio climático (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y Gobierno del Estado de Tabasco, 2019).

Núm. 60: 441-457 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

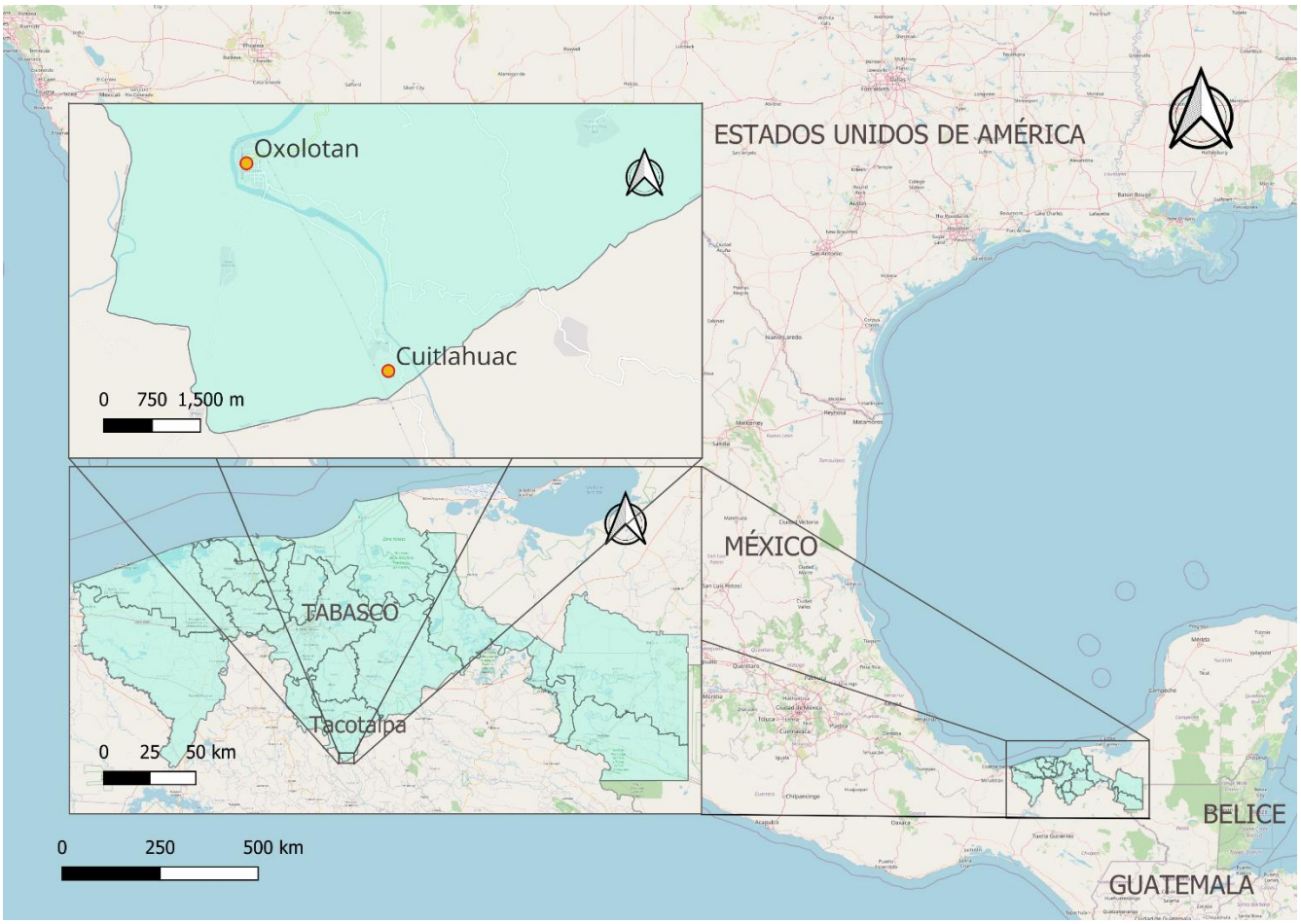


Figura 1. Localización del municipio de Tacotalpa y las localidades donde se realizó la investigación.
Figure 1. Location of the municipality of Tacotalpa and the localities where the research was carried out.
Fuente: Universidad Intercultural del Estado de Tabasco. Cuerpo Académico Desarrollo Regional / Observatorio Turístico de Tabasco.

La comunidad de Cuitláhuac, ubicada a 82 m s.n.m., fue fundada aproximadamente en el año de 1910 por migrantes del municipio de Sabanilla, Chiapas, quienes buscaban mejores condiciones de vida y escapar de la "esclavitud" de las fincas cafetaleras de la región. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda 2020, esta localidad cuenta con una población de 698 habitantes, de los cuales el 68.77% pertenece a hogares indígenas (cuadro 1) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020). Por su parte, Oxolotán tiene un origen diferente, ya que fue históricamente habitado por los zoques desde la época prehispánica y posteriormente repoblado por migrantes ch'oles provenientes comunidades de Chiapas y Tabasco. Se reporta una población de 1949 habitantes y solo el 28.52% forma parte de hogares indígenas (cuadro 1) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020).

Es importante destacar que, de acuerdo con Maimone Moroni (2023), los pueblos zoques y ch'oles de Tabasco comparten una identidad forjada a partir de una historia común que se transmite mediante la memoria colectiva. A través de relatos compartidos, se resignifican personajes, seres sobrenaturales y acontecimientos, que se convierten en símbolos fundamentales de su identidad cultural. Esta construcción simbólica contribuye a una constante reconFiguración del territorio, entendido no solo como un espacio delimitado geográfica y económicamente, sino como un escenario dinámico de vida social y cultural, cargado de significados diversos según las experiencias y valoraciones de sus habitantes.

Núm. 60: 441-457 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

El grupo étnico zoque, originario de la región centro-sur de México, tiene una rica historia y cultura que se manifiesta principalmente en los estados de Chiapas, Tabasco y Oaxaca. Aunque la población se extiende mayormente por Chiapas, su presencia en Tabasco es significativa, en los municipios de Teapa y Tacotalpa, principalmente. Por su parte los ch'oles se distribuyen en los estados de Chiapas, Campeche y Tabasco. En este último estado, las poblaciones se concentran en los municipios de Macuspana y Tacotalpa. Este grupo indígena ha desarrollado un vínculo intrínseco con su medio físico que no solo informa sus prácticas culturales, sino que también refleja una conexión con su patrimonio biocultural (Morales Valenzuela *et al.*, 2022).

Cuadro 1. Características de las localidades donde se realizó el trabajo de investigación.
Table 1. Characteristics of the locations where the research work was carried out.

Localidad	Altitud (m s.n.m.)	Población total	Número de hogares	Población en hogares indígenas (%)	Población hablante de lengua indígena (%)
Cuitláhuac	82	698	171	68.77	40.00
Oxolotán	50	1,949	556	28.52	15.23

Fuente: INEGI, Censo de Población y Vivienda 2020.

Se realizaron 140 entrevistas estructuradas (34 en Cuitláhuac y 106 en Oxolotán) a representantes de los hogares para identificar el conocimiento y preferencias de uso de los chiles silvestres, para lo cual se utilizó un muestro sistemático aplicando la entrevista cada cinco viviendas ocupadas. El instrumento utilizado se ingresó a la plataforma Kobotoolbox (www.kobotoolbox.org), con el fin de facilitar la recolección de datos por medio de dispositivos electrónicos.

También se realizaron 22 entrevistas semiestructuradas a profundidad (10 en Cuitláhuac y 12 en Oxolotán) para recuperar los conocimientos sobre usos y manejo de los chiles. Los entrevistados fueron seleccionados mediante muestreo "Bola de nieve", este método es eficaz en la identificación de sujetos clave que poseen información importante (Lohr, 2021). Además, se realizaron recorridos por las comunidades para observar la presencia de los chiles en los agroecosistemas locales.

Los datos cuantitativos se procesaron en una hoja de Microsoft Excel® y se analizaron en el software estadístico SPSS ver. 19 y la información cualitativa se procesó en Microsoft Word® y se analizó en el software Atlas.Ti ver. 9.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 162 participantes, el 55% eran mujeres y el resto hombres, con edades de entre 19 y 90 años con un promedio de 48.5 años. El 41.4% de las y los entrevistados son hablantes de lengua indígena, principalmente ch'ol.

Los resultados de las entrevistas estructuradas muestran que se reconocen ocho morfotipos de chiles silvestres correspondientes a dos especies, *C. annumm* y *C. frutescens* (Cuadro 2). Los chiles más conocidos y consumidos son el amashito, picopaloma, blanco, milpa y garbanzo (Figura 2). Estos resultados son similares a los reportados por Castañón-Nájera *et al.* (2008) para el estado de Tabasco, donde identificaron 11 morfotipos de chiles silvestres, siendo el amashito y el picopaloma los más frecuentes. Asi mismo, Narez-Jiménez *et al.* (2014), en un estudio realizado en 38 comunidades de Tabasco, documentaron la presencia de los morfotipos amashito, ojo de cangrejo y garbanzo, pertenecientes a *Capsicum annuum* var. *glabriusculum*, así como el picopaloma, correspondiente a *Capsicum frutescens.*

Es importante señalar que, Luna Ruiz *et al.* (2018), en un estudio sobre distribución ecogeográfica de los chiles silvestres, detectaron sitios con *Capsicum* silvestre en 14 de los 21

tipos de clima descritos para México. Los climas cálidos concentran 45% de los sitios de colecta, aunque para condiciones de clima cálido húmedo solo reportan una distribución de 7.9% de las colectas encontradas.

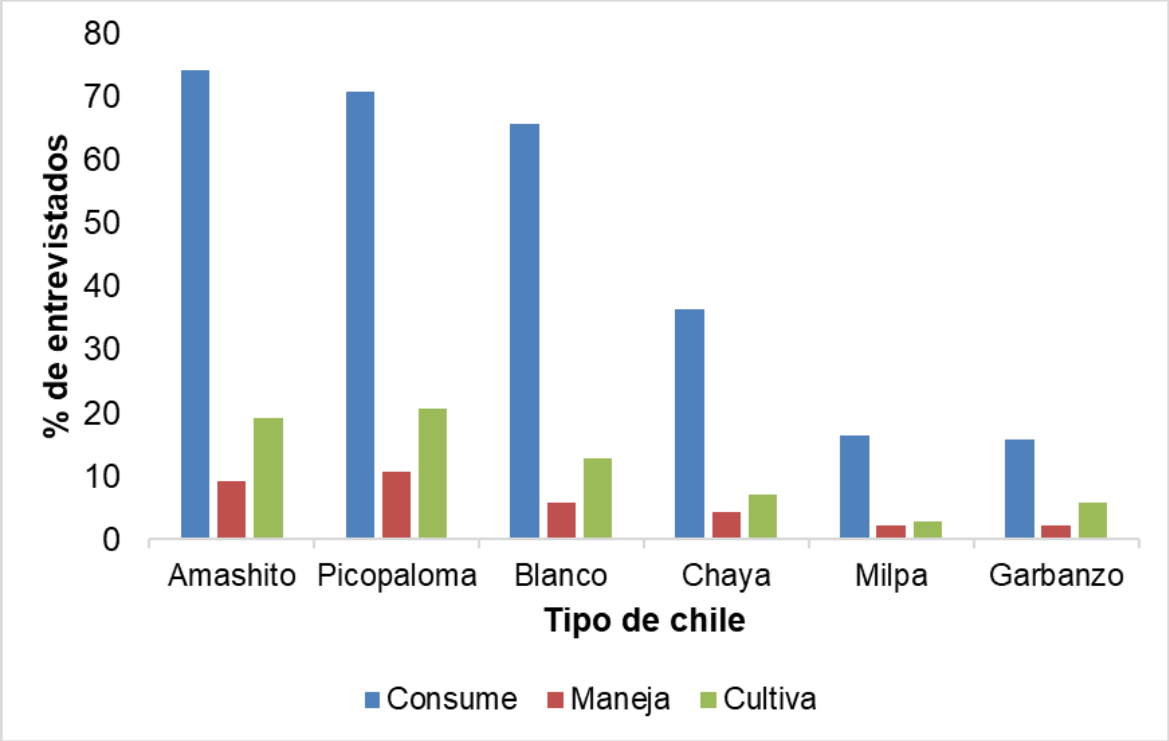


Figura 2. Consumo, manejo y cultivo de los chiles silvestres presentes en localidades ch'oles de Tacotalpa.
Figure 2. Consumption, consumption, handling and cultivation of wild chili peppers present in Ch'ol localities of Tacotalpa.

La mayoría de los chiles silvestres de la región se pueden diferenciar morfológicamente por tamaño, forma, color y grado de pungencia, en la Figura 3 se pueden observar algunas diferencias morfológicas. Es importante señalar que los participantes pueden diferenciarlos de otros chiles que no son de la región, al respecto una entrevistada menciona lo siguiente:
"…tenemos un chile que le llamamos…chile de chaya, es un chile barrigoncito que tiene muy buen sabor y olor, pero no es muy picoso. También hay un chile, chile blanco, el de la región, chile blanco, pequeñito, que se utiliza asadito, para frijol y todo eso. Es muy, muy, este… conocido, ahorita en la temporada. Conozco también el chile que le llamamos chile paloma, que unos le dicen miraparriba, también ese sí es picoso, muy picoso. El chile amashito, hay un chile amashito también blanco, hay dos versiones, el verde y el blanco. Hay un chile garbanzo, bastante picosito, también de aquí de la región. El chile blanco, que es más largo, parecido al chile xkatik, pero no es chile xkatik, parecido, también es de la región" (mujer, 60 años).

Núm. 60: 441-457 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Figura 3. Chiles silvestres más aprovechados en la sierra de Tabasco. a) Amashito, b) Picopaloma, c) Blanco y d) Garbanzo. Fuente: fotos tomadas por los autores.
Figure 3. Wild chili peppers most used in the Tabasco mountains. a) Amashito, b) Picopaloma, c) Blanco y d) Garbanzo.

Los chiles mencionados pueden recibir distintos nombres, y en algunos casos, estos pueden coincidir con la denominación de otro tipo de chile (Cuadro 2). Esto puede llevar a la suposición de que se trata de la misma variedad, como ocurre con el chile amashito, simojovel y ojo de cangrejo. En particular, el chile amashito es conocido con al menos siete nombres diferentes. Al respecto, Latournerie-Moreno *et al.* (2020) señalan la existencia de nueve morfotipos de chile amashito en Tabasco y el norte de Chiapas, de los cuales tres se encontraron en el municipio de Tacotalpa.

Cuadro 2. Chiles conocidos y consumidos en tres comunidades ch'oles de Tacotalpa, Tabasco.
Table 2. Chili peppers known and consumed in three ch'ol communities of Tacotalpa, Tabasco.

Nombre común	Otros nombres	Nombre en ch'ol	Nombre científico
Picopaloma	Miraparriba, paloma	Ich	*C. frutescens*
Amashito	Chile tonto, de árbol, garbancera, pájaro, pico de gallo, piquín	Mulision ich	*C. annumm* var. *glabriusculum*
Blanco	Milpa, amashito, criollo	Säsäk ich	*C. frutescens*
Chaya	Milpa, de Chiapas, amashito, tabaquero	Tyamäl ich	*C. annumm*
Milpa	Blanco	Säsäk ich	*C. annumm*
Garbanzo	Que no pica, milpa	Tyamäl ich, Wowol ich	*C. annumm*
Simojovel	Amashito, pájaro, serrano, picopaloma	Ich	*C. annumm* var. *glabriusculum*
Ojo de cangrejo	Bola, bolita, garbanzo, garbancera	Wowol ich	*C. annumm* var. *glabriusculum*

Fuente: Elaboración propia

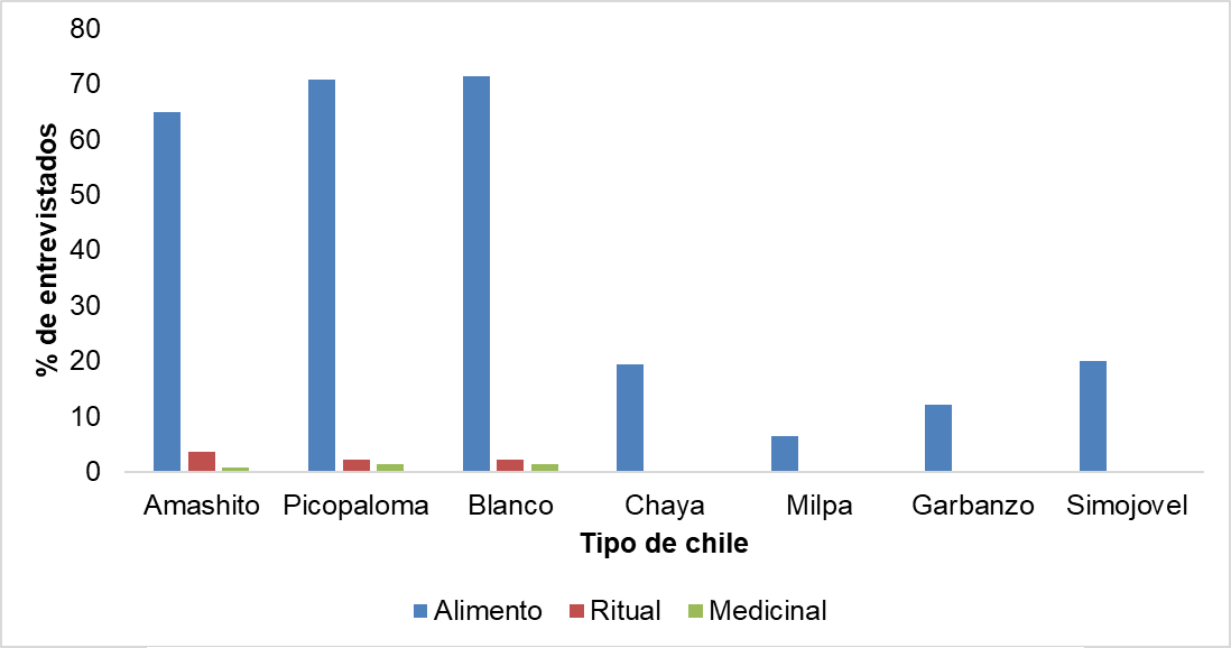


Figura 4. Uso de los chiles silvestres en dos localidades ch'oles de Tacotalpa, Tabasco.
Figure 4. Use of wild chili peppers in two ch'ol localities in Tacotalpa, Tabasco.

Aunque su uso predominante es como alimento, algunos chiles también se emplean con fines medicinales y rituales (Figura 4). En un estudio sobre las condiciones socioculturales asociadas a la conservación de los chiles silvestres en Chiapas, Bran *et al.* (2007) señalaron que la población rural posee conocimientos sobre el uso de los chiles silvestres y semidomesticados, principalmente como alimento y condimento.

En este estudio, los entrevistados identificaron cuatro formas principales de consumo: en salsa, fresco, asado y frito (Figura 5). Sin embargo, la preferencia depende del tipo de chile. Por

ejemplo, los chiles picopaloma y amashito suelen consumirse en salsa, pero previamente asados al comal, mientras que los chiles blanco y garbanzo se utilizan en salsas en su forma fresca. Estos resultados coinciden con los hallazgos de Castellón-Martínez *et al.* (2012), quienes indican que los chiles regionales de Oaxaca se consumen principalmente en salsas.

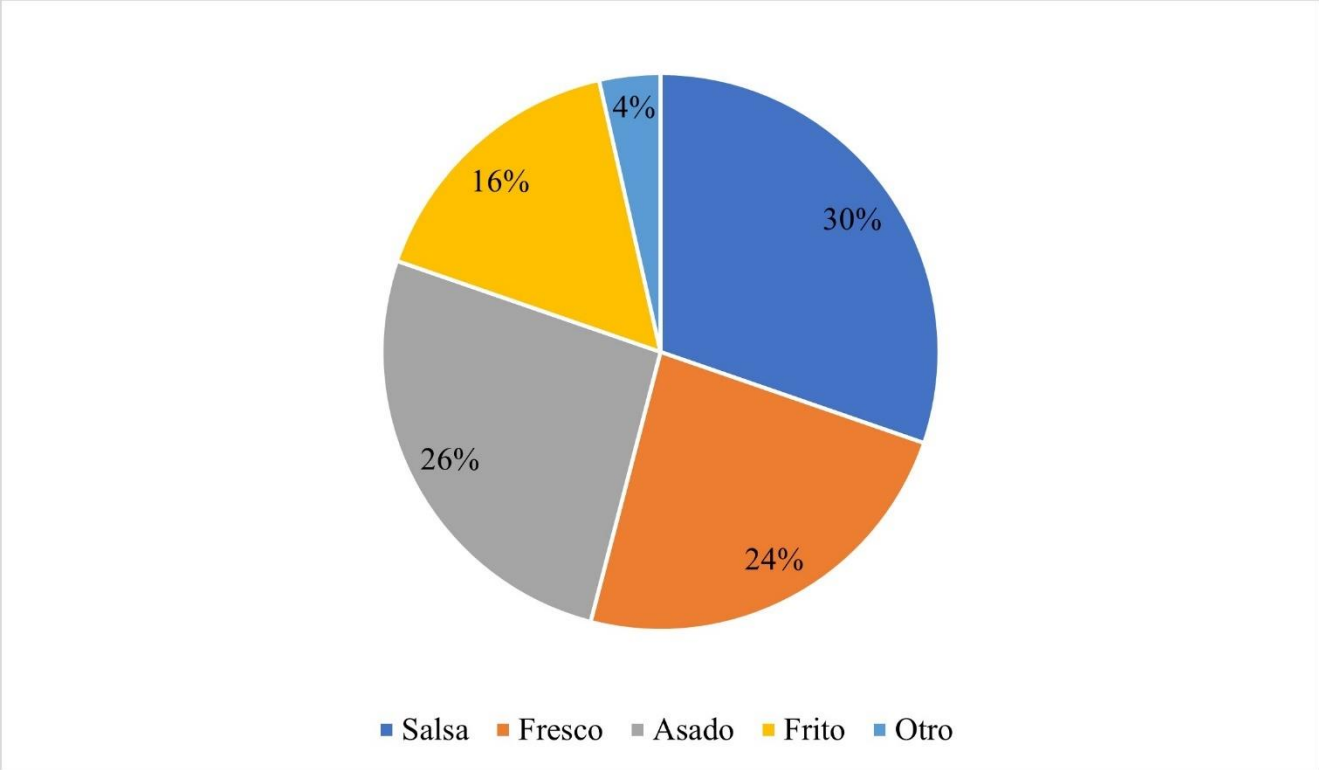


Figura 5. Formas de consumo de los chiles silvestres en la sierra de Tabasco.
Figure 5. Ways of consumption of wild chili peppers in the Tabasco mountains.

Se reconocen diversos tipos de salsas, el morfotipo de chile que se utiliza y el proceso de elaboración de cada salsa depende del tipo de comida, tal como lo menciona una entrevistada en el siguiente testimonio:

"Bueno, ese es… ese chile lo agarramos nosotros para hacer salsa, por ejemplo, si quieres un pollo sancochado, ya se le asa su chile, se machaca bien y se le pone limón; si lo quieres con limón o cebollita y haces en salsita aparte, su comida así, caldo pues. Y ya pues lo comes con eso, para eso, yo para eso ocupo ese el chile. Por ejemplo, el chile habanero o el amashito, también ese se puede hacer en salsa, pero como yo tengo mi venta de empanada, pues ya lo licuo igual ahí, con la salsa de tomate, pero se puede hacer así también en salsita, pues. El chile blanco igual, el chile blanco se puede comer con pozol, así asado, machacado con igual así, con chaya así asado, el chile, le machacas su chaya en su comida y como lo quieras, viste. Pero son sabrosos esos chiles" (mujer, 57 años).

Figura 6. Salsas más comunes elaboradas con chiles silvestres en Tacotalpa, Tabasco. Fuente: fotos tomadas por los autores.
Figure 6. Most common sauces made with wild chili peppers in Tacotalpa, Tabasco. Source: photos taken by the authors.

Basado en el uso medicinal, los chiles picopaloma, amashito y blanco tienen este uso, ya que los entrevistados lo usan para prevenir problemas respiratorios, particularmente el Covid19. Similar a lo encontrado por Martínez Torres *et al.* (2021) quienes señalan que, en comunidades de Querétaro, el chile piquín (*C. annumm* var. *glabriusculum*) se utiliza para las infecciones pulmonares y las fiebres. Al respecto, Bernstein *et al.* (2011) demostraron que la capsaicina intranasal mejora de forma rápida y segura los síntomas en sujetos con rinitis, es decir, el consumo de chile puede mejorar la secreción nasal y aliviar la congestión nasal. Asimismo, López Ordaz & Yáñez Fernández (2023) mencionan que los chiles proporcionan efectos farmacológicos benéficos en tratamientos contra artritis, rinitis, sinusitis, migraña y enfermedades cardiovasculares, anticancerígenas, obesidad, y diabetes tipo II.

Es importante destacar, que los entrevistados reconocen el uso ritual de los chiles en animales y humanos. Ruiz Núñez & Vásquez-Dávila (2018) mencionan que, en localidades de Oaxaca, el chile silvestre (*Capsicum annuum* var. g*labriusculum*) se utiliza de forma ritual, sahumando tanto a animales domésticos como a humanos, con chile seco, asado en el comal con romero, palma bendita, cuerno de chivo o buey y copal. Del mismo modo, Long-Solís (1998) menciona que el uso del chile en limpias para tratar el mal de ojo o el espíritu del aire está ampliamente documentado. Aguilar-Meléndez *et al.* (2021) describen el papel cultural del chile como alimento y como medicina para el cuerpo y el alma en diferentes culturas de México.

En las comunidades ch'oles se mencionó el uso medicinal del follaje de chile amashito, el cual se utiliza para elaborar el "cordial", un curtido elaborado con diversas hierbas, alcohol y loción Faisán®, tal como lo señalan Morales-Valenzuela *et al.* (2023). Este preparado se utiliza para tratar la "vista caliente", "calentamiento de cabeza" y "espanto" en niños. Así lo mencionó un entrevistado de Cuitláhuac:

"…la hoja del chile amashito sirve para curar el "mal de ojo" o "calentamiento de cabeza" de los niños, la hoja del chile amashito, se prepara machado o amasado y con eso se moja la cabeza del niño" (hombre, 72 años).

En lo que respecta al uso en animales, los entrevistados mencionaron que se utiliza "para sahumar a los perros para que aprendan a cazar" ya que, de acuerdo con un entrevistado "los

perros en su mayoría no cazan porque tienen gripe y eso le impide olfatear a sus presas, al sahumarlo destapan el olfato y se vuelven cazadores". Este mismo entrevistado describe el proceso de sahumado:

"Para sahumar a los perros, se utiliza un recipiente de aluminio o peltre tipo freidera, carbón encendido (brasa), chile seco, de preferencia picopaloma por su picor, un pedazo de caparazón de armadillo, pelo de algún animal silvestre como venado, tepezcuintle o mapache. Primero se busca una pequeña loma para poder hacer dos agujeros: uno vertical otro horizontal, ambas excavaciones deben encontrarse y formar un codo de tal manera que cuando se coloque el recipiente en el agujero horizontal con la brasa encendida y el chile seco, el humo salga por el agujero vertical que sería la chimenea y en ella se colocará la nariz del perro a sahumar, pero el animal deberá estar amarrado de pie y mano para evitar rasguños o accidentes" (hombre, 39 años).

En Tabasco se ha reportado el uso etnoveterinario del chile amashito y picopaloma para tratar el "calentamiento de cabeza" en aves de traspatio (Nava Hernández *et al.*, 2019). En este sentido, Waizel-Bucay & Camacho Morfín (2011) reporta el uso del chile amashito para sahumar animales timpanizados y con mal de ojo.

Las comunidades rurales e indígenas aún mantienen sus preferencias alimentarias considerando el chile como parte del patrimonio biocultural, Aguilar-Meléndez & Lira-Noriega (2018) señalan que se ha descrito el papel esencial del chile en la vida diaria y fiestas de los indígenas de Mesoamérica. En este sentido, el 54% de los entrevistados reconoce que prefieren consumir chiles silvestres por costumbre (Figura 7). Esta costumbre es un aspecto arraigado en la gastronomía y la cultura del país y no solo refleja la diversidad culinaria, sino también el patrimonio biocultural vinculado al uso de diversas especies de Capsicum, el uso y manejo de estas especies involucran un conocimiento local acumulado a través de generaciones, el cual es fundamental para la sostenibilidad y el bienestar de las comunidades (Ubiergo-Corvalán *et al.*, 2023).

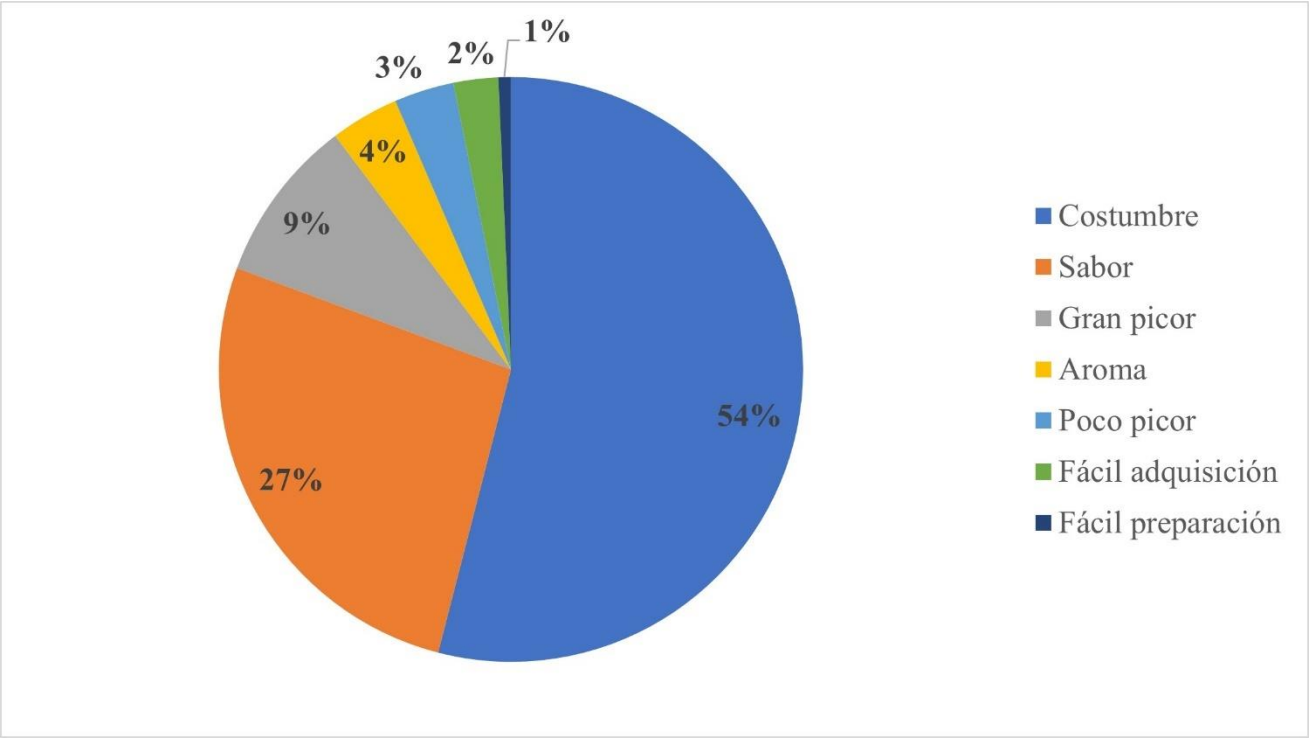


Figura 7. Razones de preferencia de los chiles silvestres en comunidades ch'oles de Tacotalpa, Tabasco.
Figure 7. Reasons for preference of wild chili peppers in ch'ol communities of Tacotalpa, Tabasco.

En lo que respecta al manejo y cultivo, se observó que los chiles amashito, picopaloma y blanco son los que más se manejan o cultivan (Figura 2). Es importante señalar que las prácticas de manejo se refieren a las técnicas que contribuyen a la conservación de las poblaciones silvestres de chiles, mientras que las prácticas de cultivo se centran en la producción intencionada de variedades seleccionadas. En las entrevistas a profundidad se mencionó que la práctica de manejo más importante es la recolección, así lo señala un entrevistado:

"…como tenemos potrero allá de aquel lado, allá sale bastante, de allá traigo, allá sí hay bastante chile, hasta los pajaritos lo comen, nada, ahí lo acaban los pajaritos, porque ya no lo acabamos, en exceso se carga la mata" (hombre, 46 años).

Güemes Jiménez & Aguilar-Meléndez (2018) en su trabajo sobre etnobotánica del chile nahua, señalan que los chiles silvestres usualmente se recolectan y los chiles domesticados mejorados se cultivan a mayor escala para obtener mayores ganancias económicas. En este estudio se reconoce la siembra de chiles domesticados y silvestres como lo menciona una entrevistada:

"De los que siembran hay chile blanco, el amashito, el otro, el chile picopaloma, que le decimos. picopaloma, igual este… bueno, yo igual he sembrado el chile este… este, morrón que le dicen, igual se da y pues yo lo he sembrado. Ajá, y el habanero igual. Hay uno igual, que le dicen el chile chaya, son como unas bolitas, pero le llaman chile chaya" (mujer, 54 años).

Cuando se siembran los chiles silvestres, por lo regular se establecen almácigos y se trasplantan en los agroecosistemas tradicionales como la milpa y huerto familiar. Esto coincide con lo señalado por Morales-Valenzuela *et al.* (2023) en su trabajo sobre etnobotánica del chile amashito (*C. annumm* var. *glabriusculum*) en Tacotalpa, Tabasco.

Por otra parte, aunque solo el 21% de los entrevistados considera que los chiles silvestres están en riesgo de desaparecer, la mayoría señala que la principal causa es la destrucción de su hábitat (Figura 8). Como se mencionó anteriormente, la eliminación de las áreas donde crecen estos chiles y el deterioro del ecosistema han puesto en peligro de extinción a estas especies, una preocupación enfatizada por Montes-Hernández *et al.* (2006) en el caso del chile piquín (*C. annumm* var. *glabriusculum*).

"Se están perdiendo porque la verdad, mire, mucha gente que ya no lo siembra, se está perdiendo, te dije que se está perdiendo la tradición y costumbre. ¿Sabes por qué? Porque este… bueno, es que también, sinceramente a mí me ha pasado, en cuanto a este chile donde se dan en las milpas, en la milpa, cuando siembra uno el maíz. Ya sembraste maíz, siembra chile. Pero desafortunadamente empezaron a venir los líquidos para matar, matamonte. ¿Y qué hace la gente? Compra su litro el líquido y con la bomba, empieza a rociar. Y ese es muy, es maligno, ese líquido. Porque mata todo tipo de monte, y si siembra chile, no lo puede, no se puede tener, lo mata" (hombre, 58 años).

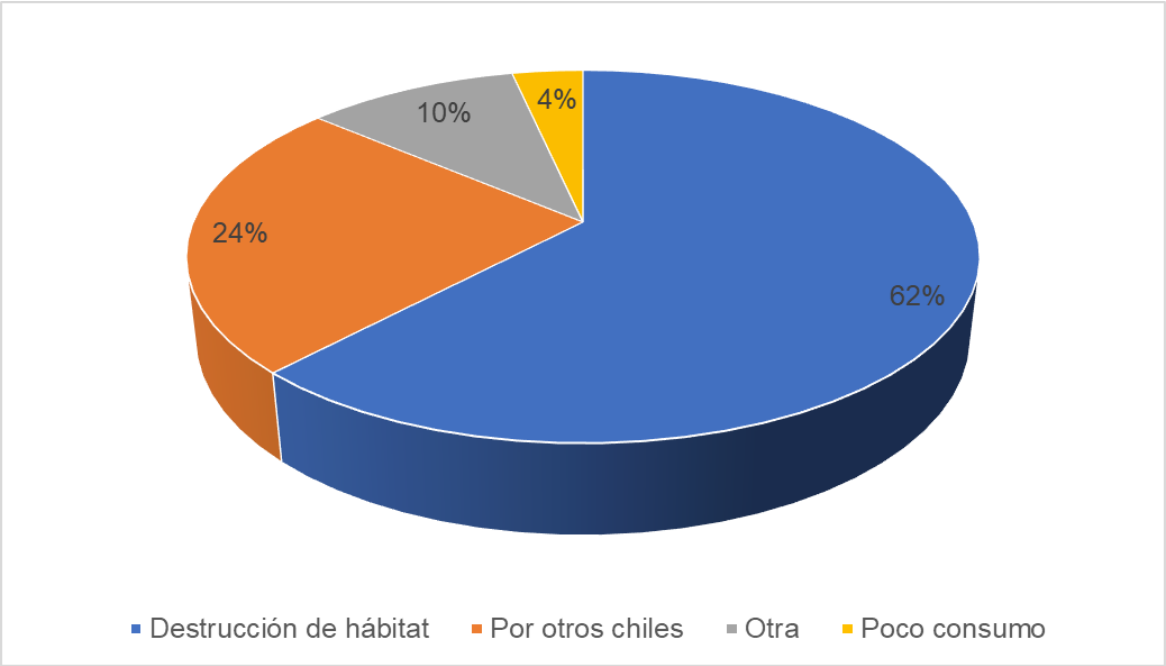


Figura 8. Percepción sobre posibles causas de desaparición de los chiles silvestres.
Figure 8. Perception of possible causes of the disappearance of wild chili peppers.

Es importante señalar que, aunque se reconocen diversas variedades de chiles silvestres, se han identificado pocas prácticas de conservación, ya que en muy pocos casos se contribuye a su propagación (Figura 3). Al respecto, Bran *et al.* (2007) reportaron que en algunas localidades de Chiapas solo el 13.7% de las personas guardan semillas de chiles silvestres para sembrarlas en pequeñas áreas o almácigos.

En cuanto a la conservación *in situ*, esta debe centrarse en la protección de las poblaciones silvestres en sus hábitats naturales, considerando sus interacciones ecológicas con plantas nodrizas y agentes dispersores como las aves. En este sentido, Tewksbury *et al.* (1999) destacan la importancia de estas relaciones ecológicas. En el presente estudio, los entrevistados subrayaron el papel relevante de la chilera (*Pitangus sulphuratus*) en la dispersión de algunas variedades de chiles silvestres.

CONCLUSIONES

Se reconocen ocho morfotipos de chiles silvestres que recolectan o se adquieren comprados y se consumen principalmente en salsas. Es importante resaltar el uso medicinal y ritual de los frutos y hojas de chiles silvestres. Los chiles silvestres tienen un papel integral en la vida cotidiana y la cultura de las comunidades ch'oles del municipio de Tacotalpa. Además, son un recurso muy versátil ya que se prepara de diversas formas por lo que es necesario implementar acciones de conservación y manejo sostenible.

LITERATURA CITADA

Aguilar-Meléndez, A., & Lira-Noriega, A. (2018). ¿Dónde crecen los chiles en México? In A. Aguilar-Meléndez, M. A. Vásquez-Dávila, E. Katz, & M. R. Hernández Colorado (Eds.), *Los chiles que le dan sabor al mundo* (pp. 75–92). IRD Éditions, Universidad Veracruzana. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.30931

Aguilar-Meléndez, A., Vásquez-Dávila, M. A., Manzanero-Medina, G. I., & Katz, E. (2021). Chile (*Capsicum* spp.) as Food-Medicine Continuum in Multiethnic Mexico. *Foods*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/foods10102502

Albuquerque, U. P., de Medeiros, P. M., & Casas, A. (2015). Evolutionary Ethnobiology. In P. M. and C. A. Albuquerque Ulysses Paulino and De Medeiros (Ed.), *Evolutionary Ethnobiology* (pp. 1–5). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19917-7_1

Balderas Quezada, K. I., Piña Ramírez, F. J., García Muñoz, S. A., Soto Parra, J. M., & Yáñez Muñoz, R. M. (2023). Chile Piquín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) Tesoro Picante de la Naturaleza. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, *11*(2), 18–23. https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v11i2.485

Barboza, G. E., García, C. C., Bianchetti, L. de B., Romero, M. V, & Scaldaferro, M. (2022). Monograph of wild and cultivated chili peppers (*Capsicum* L., Solanaceae). *PhytoKeys*, *200*, 1–423. https://doi.org/10.3897/phytokeys.200.71667

Bernstein, J. A., Davis, B. P., Picard, J. K., Cooper, J. P., Zheng, S., & Levin, L. S. (2011). A randomized, double-blind, parallel trial comparing capsaicin nasal spray with placebo in subjects with a significant component of nonallergic rhinitis. *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, *107*(2), 171–178. https://doi.org/10.1016/j.anai.2011.05.016

Bran, R. A. A., Moya, C., Ponce, P., Álvarez, M., & Varela, M. (2007). Diagnóstico participativo de las condiciones socioculturales asociadas a la conservación de los chiles silvestres (*Capsicum* spp.) en la Depresión Central de Chiapas, México. *Cultivos Tropicales*, *28*(1), 69–73. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193215858012

Castañón-Nájera, G., Latournerie-Moreno, L., Mendoza-Elos, M., Vargas-López, A., & Cárdenas-Morales, H. (2008). Colección y caracterización de Chile (*Capsicum* spp) en Tabasco, México. *Phyton*, *77*, 189–202. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-56572008000100016&lng=es&tlng=es.

Castellón-Martínez, É., Chávez-Servia, J. L., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Vera-Guzman, A. M. (2012). Preferencias de consumo de chiles (*Capsicum annuum* L.) nativos en los valles centrales de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *35*, 27–35. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802012000500007&lng=es&tlng=es.

Castillo-Aguilar, C., Chiquini-Medina, R., & Lara-Reyna, J. (2023). Morphological characterization of Maax pepper (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) and Pico Paloma pepper (*Capsicum frutescens*). *Agro Productividad*, *16*(4), 125–132. https://doi.org/10.32854/agrop.v16i5.2347

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y Gobierno del Estado de Tabasco. (2019). *La biodiversidad en Tabasco. Estudio de Estado* (CONABIO, Ed.). CONABIO. https://bioteca.biodiversidad.gob.mx/janium-bin/detalle.pl?Id=20250506170658

Gaoue, O. G., Moutouama, J. K., Coe, M. A., Bond, M. O., Green, E., Sero, N. B., Bezeng, B. S., & Yessoufou, K. (2021). Methodological advances for hypothesis-driven ethnobiology. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, *96*(5), 2281–2303. https://doi.org/10.1111/brv.12752

Güemes Jiménez, R., & Aguilar-Meléndez, A. (2018). Etnobotánica nahua del chile en la Huasteca meridonal. In *Los chiles que le dan sabor al mundo* (pp. 236–259). IRD Éditions. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.30967

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Latournerie-Moreno, L., Gutiérrez-Burón, R., Garruña-Hernández, R., Ruiz-Sánchez, E., Lara-Martín, A. R., & Castañón-Nájera, G. (2020). Diversidad fenotípica de chile Amashito de Tabasco y Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *11*(3), 649–662. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.2087

Lina-Manjarrez, P., Gallegos-Tejeda, P., & Morales-Valenzuela, G. (2022). Huertos, solares y agroecología urbana, más allá de la Soberanía Alimentaria. In C. Elizondo & D. Merlín-López (Eds.), *Agroecología en México, soberanía alimentaria, saberes, cosmovisión y patrimonio biocultural. Conocimiento, práctica, movimiento y corazón. Tomo II.* (1st ed., pp. 433–456). Editorial Chiapaneros, Sociedad Mexicana de Agroecología.

Lohr, S. L. (2021). *Sampling: Design and Analysis* (3rd ed.). Chapman and Hall/CRC. https://doi.org/10.1201/9780429298899

Long-Solís, J. (1998). *Capsicum y cultura: la historia del chilli* (Fondo de Cultura Económica, Ed.; 2nd ed.). https://books.google.com.mx/books?id=_mdEAAAAYAAJ

López Ordaz, P., & Yáñez Fernández, J. (2023). Propiedades farmacológicas del chile (*Capsicum*) y sus beneficios en la salud humana: Una revisión bibliográfica. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, *4*(2), 3827–3840. https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.873

Luna Ruiz, J., Pérez Chávez, M., Martínez de Anda, J., & Sosa Ramírez, J. (2018). Distribución ecogeográfica del chile silvestre en México y su conservación *ex situ*. In A. Aguilar-Meléndez, M. A. Vásquez-Dávila, & E. Katz (Eds.), *Los chiles que le dan sabor al mundo*. IRD Éditions, Universidad Veracruzana. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.30934

Maimone Moroni, D. (2023). *Zoques y choles de Tabasco: entre el mito y la historia*. Editorial Entretejas de México, S.A. de C.V.

Martínez Torres, H. L., Montes Hernández, S., Corona Torres, T., & Vibrans, H. (2021). Etnobotánica del chile quipín en seis municipios de Querétaro. In M. A. Dávila Vásquez, A. Aguilar Meléndez, E. Katz, & G. I. Medina Manzanero (Eds.), *Chiles en México*. IRD Éditions Universidad Veracruzana. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.45866.

Montes-Hernández, S., Ramírez-Meraz, M., Mendoza-Vilallón, H., Medina-Martínez, T., Morales-Cuén, A., Heredia-García, E., Ramos-Soto, M., López-de-León, R., Estrada-Cardona, A., & Martínez-Torres, H. L. (2006). Conservación y aprovechamiento sostenible de chile silvestre (*Capsicum* sp., Solanaceae) en México. In P. López-López & S. Montes-Hernández (Eds.), *Avances de investigación de la red de hortalizas del SINAREFI* (pp. 71–174). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Morales Valenzuela, G., Villegas Ramírez, M. I., & De los Santos Ruiz, C. P. (2022). Cultura-naturaleza en la sierra de Tabasco: patrimonio biocultural de los ch'oles de Tacotalpa. *LiminaR Estudios Sociales y Humanísticos*, *20*(2), 1–17. https://doi.org/10.29043/liminar.v20i2.935

Morales-Valenzuela, G., & Carrillo-Contreras, J. (2020). Región Biocultural Ch'ol de Tacotalpa, Tabasco. In D. Luque-Agraz, C. Gay, & B. Ortíz-Espejel (Eds.), *Complejos Bioculturales de México: Bienestar comunitario en escenario de cambio climático* (pp. 303–326). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y Red Temática Sobre Patrimonio Biocultural de México.

Morales-Valenzuela, G., Villegas Ramírez, M. I., & García Hernández, J. J. (2023). Etnobotánica del chile amashito (*Capsicum annum* var. *glabriusculum*) en el ejido Oxolotán, Tacotalpa, Tabasco. In C. Hernández-Hernández & D. Sumano-López (Eds.), *Innovaciones científicas y tecnológicas para el desarrollo sostenible de la agricultura* (pp. 103–110). INIFAP.

Narez-Jiménez, C. A., Gómez-Vázquez, A., Castañón-Nájera, G., Márquez-Quiroz, C., & Cruz-Hernández, A. (2014). *La diversidad morfológica in situ de chiles silvestres (Capsicum* spp.*) de Tabasco, México*. *37*(3), 209–215.

Recibido:
5/febrero/2025

Aceptado:
9/junio/2025

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802014000300005&lng=es&tlng=es.

Nava Hernández, G., Aldasoro Maya, E. M., Perezgrovas Garza, R., & Vera Cortés, G. (2019). Interacciones del ser humano con animales de traspatio: un estudio desde la Etnoveterinaria en Tabasco, México. *Nova Scientia*, *10*, 258–309. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=203359541015

Powis, T. G., Gallaga Murrieta, E., Lesure, R., Lopez Bravo, R., Grivetti, L., Kucera, H., & Gaikwad, N. W. (2013). Prehispanic use of chili peppers in Chiapas, Mexico. *PLOS ONE*, *8*(11), e79013. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0079013

Ruiz Núñez, N., & Vásquez-Dávila, M. (2018). Etnoecología del chile de campo en Guelavía, Oaxaca. In A. Aguilar-Meléndez, M. A. Vásquez-Dávila, E. Katz, & M. R. Colorado Hernández (Eds.), *Los chiles que le dan sabor al mundo*. IRD Éditions, Universidad Veracruzana. https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.30970.

Tewksbury, J. J., Nabhan, G. P., Norman, D., Suzán, H., Tuxill, J., & Donovan, J. (1999). In situ conservation of wild chiles and their biotic associates. *Conservation Biology*, *13*(1), 98–107. https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97399.x

Ubiergo-Corvalán, P., Rodríguez-Galván, M. G., & Zaragoza-Martínez, M. de L. (2023). Cultura agroalimentaria y manejo de plantas en huertos de familias maya-ch'ol de Chiapas. *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, *33*(62).

Velázquez-Ventura, J. C., de la Cruz-Lazaro, E., Osorio-Osorio, R., & Preciado-Rangel, P. (2018). Morphological variation of wild peppers (*Capsicum* spp.) from the state of Tabasco, Mexico. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, *30*(2), 115–121. https://doi.org/10.9755/ejfa.2018.v30.i2.1603

Waizel-Bucay, J., & Camacho Morfín, R. (2011). El género *Capsicum* spp. ("chile") Una versión panorámica. *Aleph Zero*, *16*(60), 67–79.

POLIBOTÁNICA

Polibotánica
ISSN electrónico: 2395-9525
polibotanica@gmail.com
Instituto Politécnico Nacional
México
http://www.polibotanica.mx

CARACTERIZACIÓN SENSORIAL PARA LA DIFERENCIACIÓN DE MEZCAL ANCESTRAL DE DOS ZONAS PRODUCTORAS DE OAXACA, MÉXICO

SENSORY CHARACTERIZATION FOR THE DIFFERENTIATION OF ANCESTRAL MEZCAL FROM TWO PRODUCING AREAS OF OAXACA, MEXICO

López García, S.Y., A. Espejel García, A. Hernández Montes, A.I. Barrera Rodríguez

CARACTERIZACIÓN SENSORIAL PARA LA DIFERENCIACIÓN DE MEZCAL ANCESTRAL DE DOS ZONAS PRODUCTORAS DE OAXACA, MÉXICO
SENSORY CHARACTERIZATION FOR THE DIFFERENTIATION OF ANCESTRAL MEZCAL FROM TWO PRODUCING AREAS OF OAXACA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 459-473 México. Julio 2025
DOI: 10.18387/polibotanica.60.27

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

POLIBOTÁNICA

Núm. 60: 459-473 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

Caracterización sensorial para la diferenciación de mezcal ancestral de dos zonas productoras de Oaxaca, México

Sensory characterization for the differentiation of ancestral mezcal from two producing areas of Oaxaca, Mexico

Susana Yareth López-García https://orcid.org/0000-0002-6221-0789
Anastacio Espejel-García / anastacio.espejel@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-6462-6681
Arturo Hernández-Montes https://orcid.org/0000-0003-1502-3101
Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Autónoma Chapingo km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México, 56230

Ariadna Isabel Barrera-Rodríguez https://orcid.org/0000-0001-7352-1091
Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México, 56230

López García, S.Y., A. Espejel García, A. Hernández Montes, A.I. Barrera Rodríguez

CARACTERIZACIÓN SENSORIAL PARA LA DIFERENCIACIÓN DE MEZCAL ANCESTRAL DE DOS ZONAS PRODUCTORAS DE OAXACA

CHARACTERIZATION FOR THE DIFFERENTIATION OF ANCESTRAL MEZCAL FROM TWO PRODUCING AREAS OF OAXACA

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 60: 459-473. Julio 2025

DOI: 10.18387/polibotanica.60.27

RESUMEN: El mezcal ancestral es una bebida tradicional producida por la destilación del jugo de agave fermentado, su calidad sensorial depende de la composición de compuestos volátiles y no volátiles, los cuales difieren respecto a la especie o variedad de agave, región y condiciones en el proceso de producción y destilación, siendo los consumidores quienes evalúan los atributos sensoriales y no sensoriales del producto, lo que no solo permite diferenciar entre los tipos de mezcal, sino que también contribuyen a preservar su autenticidad, identidad y tipicidad. El objetivo de este estudio fue identificar atributos sensoriales y no sensoriales diferenciadores del mezcal ancestral de dos zonas productoras del estado de Oaxaca (Santa María Ixcatlán y Santa Catarina Minas) y de dos especies de agave (*Agave angustifolia* y *Agave potatorum*), así como los atributos de un mezcal ancestral ideal definidos por los consumidores. Para ello, se aplicó el método CATA a consumidores de mezcal (n=100), obteniendo 16 atributos que permitieron diferenciar las cuatro muestras de mezcal ancestral. Con un panel (n=10) y mismas muestras de mezcal ancestral, se realizó un Perfil Flash basado en seis atributos consensuados, lo que demostró una mejor diferenciación por especie que por zona de producción. Se concluyó que el mezcal ancestral, dependiendo de la especie de agave utilizada en su elaboración y de la zona de producción presentó atributos sensoriales diferenciadores, los cuales podrían contribuir a fortalecer su identidad y valorización como bebida tradicional.
Palabras clave: bebida ancestral, atributos sensoriales, atributos no sensoriales, agaves silvestres.

ABSTRACT: Ancestral mezcal is a traditional beverage produced by the distillation of fermented agave juice. Its sensory quality depends on the composition of volatile and non-volatile compounds, which differ according to the species or variety of agave, region and conditions in the production process, being the consumers who evaluate the sensory and non-sensory attributes of the product, which not only allows differentiating between types of mezcal, but also contributes to preserve its authenticity and identity. The objective of this study was to identify sensory and non-sensory differentiating attributes of ancestral mezcal from two producing areas in the state of Oaxaca (Santa María Ixcatlán and Santa Catarina Minas) and two agave species (Agave angustifolia and Agave potatorum), and the attributes of an ideal ancestral mezcal. For this purpose, the CATA method was applied to mezcal consumers (n=100), obtaining sixteen attributes

that allowed differentiating the four samples of ancestral mezcal. With a panel (n=10) and the same samples of ancestral mezcal, a Flash Profile was made based on six cosensus attributes, which showed a better differentiation by species than by production zone. It is concluded that ancestral mezcal, depending on the agave species used in its production and the production zone, presented differentiating sensory attributes, which could contribute to strengthen its identity and valorization as a traditional beverage.
Key words: ancestral beverage, sensory attributes, non-sensory attributes, wild agaves.

INTRODUCCIÓN

El mezcal es una bebida inherente a las tradiciones y cultura de las regiones productoras de México, obtenida de la destilación de jugos de agave fermentados (Rage *et al.*, 2020). En la actualidad la producción de mezcal en México ha tenido un incremento importante, siendo el estado de Oaxaca el que tiene mayor aporte a la producción a nivel nacional (Cuevas Reyes *et al.*, 2019). El estado de Oaxaca cuenta con muchas zonas mezcaleras en los distritos de Ocotlán, Teotitlán de Flores Magón, Miahuatlán, Sola de Vega, Ejutla, Tlacolula, Tlaxiaco, Yautepec, entre otros (Pérez, 2007); en estos distritos se encuentran los municipios de Santa María Ixcatlán y Santa Catarina Minas, reconocidos como productores de mezcal ancestral. Cada región mezcalera aprovecha las especies de agave que se desarrollan en las condiciones ambientales especificas del lugar, siendo el Espadín (Agave angustifolia) y el Tobalá (*Agave potatorum*) las especies más utilizadas para su elaboración (Hernández-López, 2018).

La elaboración de mezcal, una bebida espirituosa tradicional incluye diferentes etapas en su proceso: cocción, molienda, fermentación y destilación. De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-070-SCFI-2016, esta bebida se clasifica en tres categorías según el tipo de proceso utilizado. La primera es el mezcal, que incorpora el uso de instrumentos modernos e innovaciones en las técnicas con el objetivo de optimizar el proceso. La segunda categoría es el mezcal artesanal, en el que predomina el uso de alambiques de cobre para la destilación y se conservan las prácticas tradicionales en las demás etapas del proceso. Finalmente, el mezcal ancestral se elabora mediante técnicas completamente tradicionales: la cocción del agave se realiza exclusivamente en hornos de pozo; la molienda o machacado se lleva a cabo manualmente con un mazo; la fermentación de las piñas de agave machacadas tiene lugar en tinas de pieles de animal; y la destilación se realiza a fuego directo en olla y montera de barro. Esta última categoría se distingue por la ausencia total de maquinaria moderna, lo que permite preservar técnicas transmitidas de generación en generación.

Dado que la producción de mezcal no está completamente estandarizada, diversos factores involucrados en su elaboración como especies de agave utilizada, región de producción, técnicas de producción, palenques (fábricas de producción), maestro mezcalero, temporada de producción y zonas de corte, dan como resultado una gran variedad de tipos de mezcal con características particulares y distintivas (Pérez, 2007; Vera-Guzmán *et al.*, 2018). Al tratarse de una bebida destilada, presenta un determinado grado alcohólico y una compleja composición de compuestos volátiles y no volátiles, que le confieren atributos sensoriales (Chavez-Parga *et al.*, 2016), tales como el aroma, sabor, textura y apariencia, que son elementos esenciales para comprender las preferencias y aceptación del consumidor, además de apreciar y diferenciar entre los tipos de mezcal.

Los métodos de evaluación sensorial descriptivos rápidos se han desarrollado como alternativas a los métodos tradicionales de análisis sensorial descriptivo, eficaces para la descripción y cuantificación de características sensoriales (Lawless & Heymann, 2010; Liu *et al.*, 2018). Los métodos rápidos, como el Perfil Flash y el CATA (Check All That Apply), se han consolidado como herramientas valiosas para evaluar productos con características sensoriales complejas. Además, estos métodos consumen menos tiempo, son más flexibles y pueden utilizarse con evaluadores semiprofesionales e incluso con consumidores (Aung e*t al.*, 2024; Meilgaard *et al.*, 2016). El Perfil Flash desarrollado por Dairou y Sieffermann (2002) se basa en la jerarquización de los productos para cada atributo sensorial establecido y en la presentación simultánea de todo

Núm. 60: 459-473 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

el conjunto de productos que permite una mejor discriminación de las diferencias sensoriales entre ellos (Liu *et al.*, 2018).

Por otro lado, el método CATA consta de cuestionarios apropiados para consumidores que contiene una lista predefinida de descriptores que puede incluir tanto atributos sensoriales y no sensoriales (hedónicos, emociones, ocasiones de uso), en este caso los productos se presentan en forma monádica, es decir, presentar un solo producto a la vez al evaluador y se les pide seleccionar todos los términos aplicables que describan al producto, esta técnica también puede incluir las puntuaciones de aceptación global y la evaluación de un producto ideal, entendido como aquel que maximiza el agrado del consumidor hacia el producto. (Adams *et al.*, 2007; Varela & Ares, 2012). CATA y Perfil Flash han sido implementados en diversos productos como: bebida de trigo, vinos y yogur (Aung *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2018; Verissimo *et al.*, 2020), por lo que resultó viable aplicarlos en mezcal ancestral, producto de alto valor cultural y económico.

En este contexto, identificar atributos sensoriales que diferencian los mezcales ancestrales de distintas regiones y especies de agave es esencial para documentar su perfil sensorial, fortalecer su identidad de origen y orientar estrategias de posicionamiento en el mercado. Además, conocer los atributos que conforman el perfil de un mezcal ancestral ideal desde la perspectiva del consumidor permite establecer criterios para la aceptación del producto, sin comprometer su autenticidad. Las hipótesis que guiaron esta investigación fueron: a) los mezcales producidos en Santa María Ixcatlán y Santa Catarina Minas presentas atributos sensoriales y no sensoriales diferenciadores atribuibles a la región de origen y a la especie de agave (*Agave angustifolia* y *Agave potatorum*); b) existen atributos sensoriales específicos que contribuyan al agrado del consumidor y que definan el perfil de un mezcal ancestral ideal.

Por lo que, los objetivos fueron identificar atributos sensoriales y no sensoriales diferenciadores de mezcal ancestral de dos zonas productoras del estado de Oaxaca (Santa María Ixcatlán y Santa Catarina Minas) y de dos especies de agave (*Agave angustifolia* y *Agave potatorum*), e identificar los atributos sensoriales de un mezcal ancestral ideal.

MÉTODOS

Objeto de estudio

Se emplearon cuatro muestras de mezcal ancestral provenientes de dos especies de agave; *Agave potatorum* (Tobalá) y *Agave angustifolia* (Espadín). Dos muestras de mezcal, una de cada especie, fueron recolectadas en palenques ubicados en Santa María Ixcatlán (17° 51’ 09’’ N, 97° 11’ 33’’ O, 1885 msnm), los otras dos muestras, una de cada especie, fueron recolectadas en Santa Catarina Minas (16° 46’ 41’’ N, 96° 36’ 58’’ O, 1562 msnm), zonas productoras de mezcal ancestral en el estado de Oaxaca, durante el mes de abril de 2020. La obtención de las muestras se hizo mediante un muestreo dirigido, seleccionando aquellos palenques con mayor experiencia y antigüedad en la producción de mezcal ancestral en cada una de las zonas mencionadas, fueron recolectadas en botellas de vidrio color ámbar y almacenados a temperatura de refrigeración (5 °C), para posteriormente ser evaluadas.

Grupos focales

Se realizaron tres grupos focales: el primero estuvo integrado por cuatro consumidores y cuatro maestros mezcaleros, el segundo incluyó nueve maestros mezcaleros y el tercero ocho consumidores, cuyo fin fue generar descriptores y/o atributos sensoriales y no sensoriales (Meilgaard *et al.*, 2016) para ser utilizados en los métodos CATA y Perfil Flash. En todos los grupos se siguió la misma dinámica; se proporcionaron a cada integrante cuatro muestras de mezcal ancestral sin identificar y se les solicitó que anotaran en una hoja en blanco los atributos presentes en cada muestra que permitieran diferenciarlas entre sí. Posteriormente, se efectuó un consenso entre todos los integrantes de cada panel para obtener los atributos utilizados en las metodologías mencionadas, cada uno de los atributos se agruparon en categorías sensoriales (apariencia, aroma, sabor) y no sensoriales (hedónicos, emociones, ocasiones de uso).

Núm. 60: 459-473 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

CATA (Check All That Apply)

Se reclutó un total de 100 consumidores habituales de mezcal de ambos géneros (25% mujeres y 75% hombres). Todos los participantes eran mayores de edad, con edades comprendidas entre los 18 a 65 años. A cada consumidor se le presentaron de manera monádica las cuatro muestras de mezcal ancestral: Tobalá de Santa Catarina Minas, Tobalá de Santa María Ixcatlán, Espadín de Santa Catarina Minas y Espadín de Santa María Ixcatlán, y se les proporcionó los cuestionarios CATA con 30 atributos sensoriales y no sensoriales (aroma a piña de maguey cocida, aroma a piña de maguey quemado, aroma a humo, aroma a alcohol, aroma a madera, sabor dulce, sabor amargo, sabor agrío, sabor a maguey verde, sabor a maguey maduro, sabor a piña de maguey cocida, sabor a piña de maguey quemado, sabor a penca, sabor ferroso, sabor humo, sabor alcohol, sabor a palma, sabor a bagazo, sabor astringente, sabor a barro, picante, rasposo, quemante, agradable, sabroso, natural, relajado, feliz, euforia e identidad de origen), para evaluar todos los términos aplicables a cada muestra y la aceptación global para cada mezcal usando una escala hedónica del 1 al 9, donde 1 hizo referencia a "me disgusta extremadamente" y 9 a "me gusta extremadamente" (Aung *et al.*, 2024; Wong *et al.*, 2023).

La evaluación de las muestras se realizó en un sitio con iluminación adecuada, temperatura ambiente (22 °C), libre de olores y aromas. Se dispuso de agua y galletas habaneras clásicas (Gamesa®, México) entre la evaluación de muestras para eliminar sabores residuales (Jauregui-García *et al.*, 2024).

El análisis del conjunto de datos CATA se realizó mediante el programa XLSTAT versión 2019 (Addinsoft, EE. UU.), se calculó la frecuencia de uso de cada atributo incluido en el cuestionario CATA utilizado por los consumidores para describir cada muestra y se aplicó la prueba de Q de Cochran para identificar diferencias significativas ($\rho \leq 0.05$) entre las muestras para cada atributo (Meyners, 2016). Posteriormente, se aplicó un análisis de correspondencia (AC) para determinar las diferencias entre cada mezcal en cuanto a sus perfiles sensoriales basado en la tabla de frecuencias de cada descriptor que resultó significativo y empleando la distancia de Hellinger para cuantificar las similitudes entre variables. Con los descriptores y la aceptabilidad global se elaboró una gráfica de escalamiento multidimensional (MDS), y se aplicó un análisis de penalización (AP) para evaluar el impacto de cada atributo significativo incluido en el cuestionario CATA sobre el aumento o disminución de la aceptabilidad en relación con el mezcal ideal (Ares *et al.*, 2014; Aung *et al.*, 2024).

Perfil Flash

El método empleado fue el descrito por Dairou y Sieffermann (2002) con modificaciones, que consistieron en reclutar a diez panelistas consumidores de mezcal. A cada panelista de mezcal se le presentaron de manera simultánea cuatro muestras de mezcal ancestral: Tobalá de Santa Catarina Minas, Tobalá de Santa María Ixcatlán, Espadín de Santa Catarina Minas y Espadín de Santa María Ixcatlán, y se les dio a conocer doce atributos sensoriales significativos (aroma a piña de maguey cocida, aroma a madera, sabor dulce, sabor amargo, sabor agrío, sabor a maguey verde, sabor a maguey maduro, sabor a piña de maguey cocida, sabor a piña de maguey quemado, sabor ferroso, sabor humo, sabor astringente) resultantes del método CATA. En una segunda sesión, a cada panelista se le presentaron al mismo tiempo las cuatro muestras y se les pidió jerarquizar las muestras para cada uno de los atributos, mediante una escala ordinal del 1 al 4, se asignó el valor 4 a la muestra con la intensidad mayor del atributo y 1 a la intensidad menor. La jerarquización se hizo por triplicado (Torres-Salas & Hernández-Montes, 2021).

Los datos de las tres repeticiones se analizaron usando un diseño completamente al azar, con la finalidad de evaluar la capacidad discriminativa de cada panelista respecto a cada uno de los atributos del mezcal ancestral, así como su selección. El análisis se realizó utilizando el programa Minitab® 19 (Pennsylvania, EE. UU.). Posteriormente, con datos de los panelistas seleccionados se aplicó un Análisis Procrustes Generalizado (APG) (Torres-Salas & Hernández-Montes, 2021) mediante el programa XLSTAT versión 2019 (Addinsoft, EE. UU.).

RESULTADOS

CATA (Check All That Apply)

En la tabla 1 se presentan los 16 atributos sensoriales y no sensoriales que resultaron significativos ($p \leq 0.05$) según la prueba Q de Cochran ($p \leq 0.05$), de un total de 30 términos empleados en el cuestionario CATA. Estos atributos fueron: aroma a piña de maguey cocida, aroma a madera, sabor dulce, sabor amargo, sabor agrío, sabor a maguey verde, sabor a maguey maduro, sabor a piña de maguey cocida, sabor a piña de maguey quemado, sabor ferroso, sabor humo, sabor astringente, quemante, sabroso, natural e identidad de origen, cada uno de estos atributos permitió a los consumidores percibir diferencias entre los mezcales ancestrales evaluados. Entre ellos, los atributos con mayores frecuencias de uso fueron: aroma a piña de maguey cocida, sabor a maguey maduro, sabor a piña de maguey cocida y natural.

El atributo sabor dulce permitió clasificar los mezcales en dos grupos (a,b), mostrando las mayores frecuencias en aquellos elaborados con agave Tobalá. En contraste, el sabor astringente se asoció con una mayor frecuencia a los mezcales producidos con agave Espadín, lo que sugiere que los consumidores relacionaron estos atributos con la especie de agave utilizada en la elaboración.

Cabe destacar que para los términos identidad de origen y natural se asociaron con mayor frecuencia a los mezcales de Santa María Ixcatlán, este resultado podría estar relacionado con una posible mayor familiaridad de los consumidores con los productos de esta región o al valor histórico y simbólico que dicha zona ha construido en torno a su producción de mezcal.

Tabla 1. Resultados de la prueba de Q de Cochran y frecuencia de los términos usados por los consumidores (n=100) en el cuestionario CATA para la comparación de cuatro muestras de mezcal ancestral.
Table 1. Results of Cochran's Q test and frequency of terms used by consumers (n=100) in the CATA questionnaire for the comparison of four samples of ancestral mezcal.

Atributos	p-valor (Q de Cochran)	Santa María Ixcatlán		Santa Catarina Minas	
		Tobalá	Espadín	Tobalá	Espadín
Aroma a piña de maguey cocida	**0.000**	0.760 (b[z])	0.630 (ab)	0.450 (a)	0.640 (b)
Aroma a piña de maguey quemado	0.066	0.210 (a)	0.360 (a)	0.290 (a)	0.330 (a)
Aroma a humo	0.081	0.410 (a)	0.290 (a)	0.380 (a)	0.270 (a)
Aroma a alcohol	0.264	0.320 (a)	0.400 (a)	0.410 (a)	0.410 (a)
Aroma a madera	**0.000**	0.140 (a)	0.350 (b)	0.320 (b)	0.150 (a)
Sabor dulce	**0.001**	0.580 (b)	0.350 (a)	0.460 (ab)	0.310 (a)
Sabor amargo	**0.010**	0.320 (a)	0.380 (ab)	0.410 (ab)	0.550 (b)
Sabor agrío	**0.000**	0.170 (a)	0.430 (b)	0.200 (a)	0.250 (a)
Sabor a maguey verde	**0.001**	0.340 (a)	0.440 (ab)	0.430 (a)	0.630 (b)
Sabor a maguey maduro	**0.000**	0.700 (b)	0.570 (ab)	0.480 (a)	0.360 (a)
Sabor a piña de maguey cocida	**0.000**	0.770 (b)	0.600 (ab)	0.490 (a)	0.540 (a)
Sabor a piña de maguey quemado	**0.006**	0.310 (a)	0.530 (b)	0.370 (ab)	0.470 (ab)
Sabor a penca	0.347	0.330 (a)	0.330 (a)	0.410 (a)	0.350 (a)
Sabor ferroso	**0.000**	0.090 (a)	0.150 (ab)	0.520 (c)	0.290 (b)
Sabor humo	**0.004**	0.460 (b)	0.330 (ab)	0.340 (ab)	0.230 (a)
Sabor alcohol	0.078	0.280 (a)	0.410 (a)	0.340 (a)	0.380 (a)
Sabor a palma	0.085	0.170 (a)	0.240 (a)	0.130 (a)	0.140 (a)

Atributos	p-valor (Q de Cochran)	Santa María Ixcatlán		Santa Catarina Minas	
		Tobalá	Espadín	Tobalá	Espadín
Sabor a bagazo	0.160	0.170 (a)	0.260 (a)	0.290 (a)	0.230 (a)
Sabor astringente	**0.000**	0.400 (ab)	0.590 (b)	0.310 (a)	0.620 (b)
Sabor a barro	0.450	0.300 (a)	0.280 (a)	0.220 (a)	0.250 (a)
Picante	0.337	0.200 (a)	0.250 (a)	0.270 (a)	0.290 (a)
Rasposo	0.301	0.220 (a)	0.330 (a)	0.300 (a)	0.300 (a)
Quemante	**0.000**	0.290 (a)	0.420 (a)	0.420 (a)	0.610 (b)
Agradable	0.434	0.590 (a)	0.610 (a)	0.600 (a)	0.510 (a)
Sabroso	**0.002**	0.610 (b)	0.570 (ab)	0.380 (a)	0.430 (ab)
Natural	**0.000**	0.820 (c)	0.750 (bc)	0.520 (a)	0.620 (ab)
Relajado	0.514	0.600 (a)	0.530 (a)	0.510 (a)	0.520 (a)
Feliz	0.120	0.520 (a)	0.520 (a)	0.470 (a)	0.380 (a)
Euforia	0.562	0.130 (a)	0.190 (a)	0.130 (a)	0.160 (a)
Identidad de origen	**0.000**	0.570 (b)	0.430 (ab)	0.240 (a)	0.310 (a)

[z]Proporciones con distinta letra en la misma fila, son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

[z]Proportions with different letter in the same row are statistically different ($p \leq 0.05$). Source: Own elaboration.

Se realizó un Análisis de Correspondencia (AC) con el objetivo de evaluar la relación de los atributos sensoriales y no sensoriales significativos, cuatro mezcales ancestrales y el perfil del mezcal ideal según los consumidores (Figura 1). Los dos primeros componentes explicaron el 90.14% de la variabilidad total de los datos, lo que indicó una representación adecuada.

Los resultados muestran que el mezcal ancestral Tobalá de Santa María Ixcatlán se caracterizó por los atributos aroma a piña de maguey cocida y natural. En contraste, el mezcal ancestral Tóbala de Santa Catarina Minas se caracterizó por un sabor ferroso. Asimismo, los mezcales ancestrales elaborados con agave Espadín, tanto de Santa María Ixcatlán y Santa Catarina Minas su representación fue cercana en el espacio bidimensional y se describieron por los atributos: sabor a piña de maguey quemado, sabor astringente y sabor agrío. Además, el perfil sensorial del mezcal ancestral ideal, según los consumidores se definió por sabor dulce, sabor a maguey maduro, sabor a piña de maguey cocida, sabroso e identidad de origen (Figura 1).

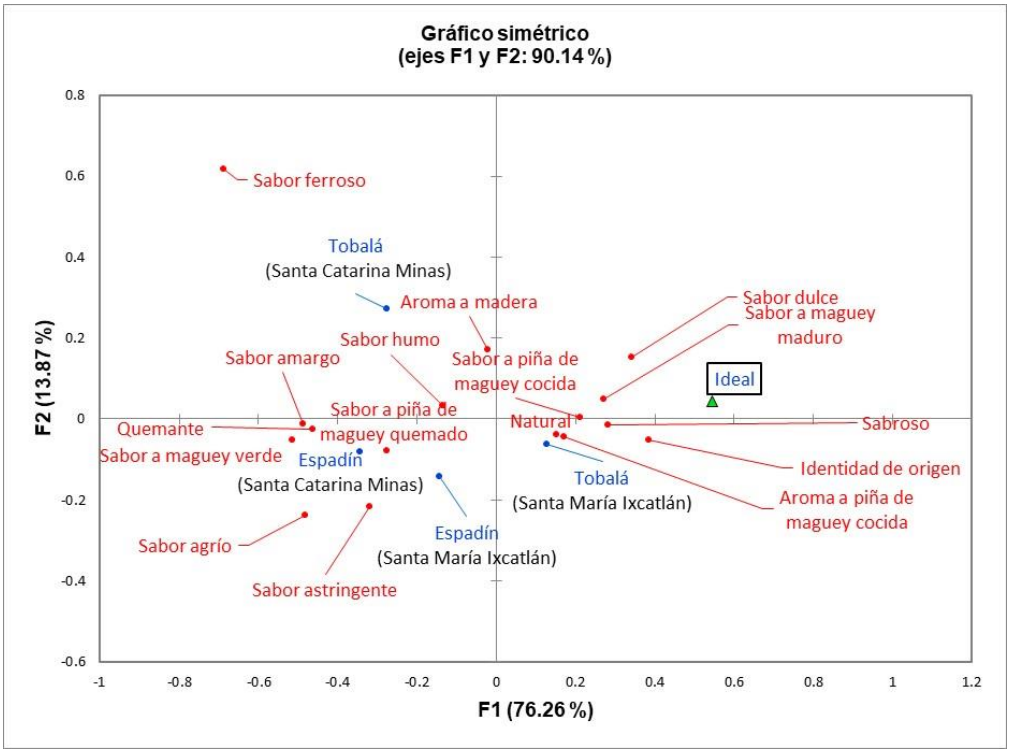


Figura 1. Representación de las muestras de mezcal ancestral (●), los atributos sensoriales y no sensoriales (●) y el mezcal ideal (▲), en las primeras dos dimensiones del Análisis de Correspondencia (AC). Fuente: Elaboración propia.
Figure 1. Representation of ancestral mezcal samples (●), sensory and non-sensory attributes (●) and ideal mezcal (▲), in the first two dimensions of the Correspondence Analysis (CA). Source: Own elaboration.

Mediante un análisis de Escalamiento Multidimensional (MDS) se examinó la correlación de los atributos significativos y la aceptabilidad global (Figura 2). Los resultados mostraron que el sabor a piña de maguey cocida e identidad de origen estuvieron fuertemente correlacionados con la aceptabilidad, lo que sugiere que los mezcales asociados a estos atributos fueron los más preferidos por los consumidores. En contraste, los atributos sabor ferroso, sabor amargo y sensación quemante presentaron una baja correlación con la aceptabilidad. En este contexto, el mezcal ancestral Tobalá de Santa María Ixcatlán que se caracterizó por los atributos que estuvieron fuertemente correlacionados con la aceptabilidad se considera como la muestra más preferida según la evaluación CATA.

Núm. 60: 459-473 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

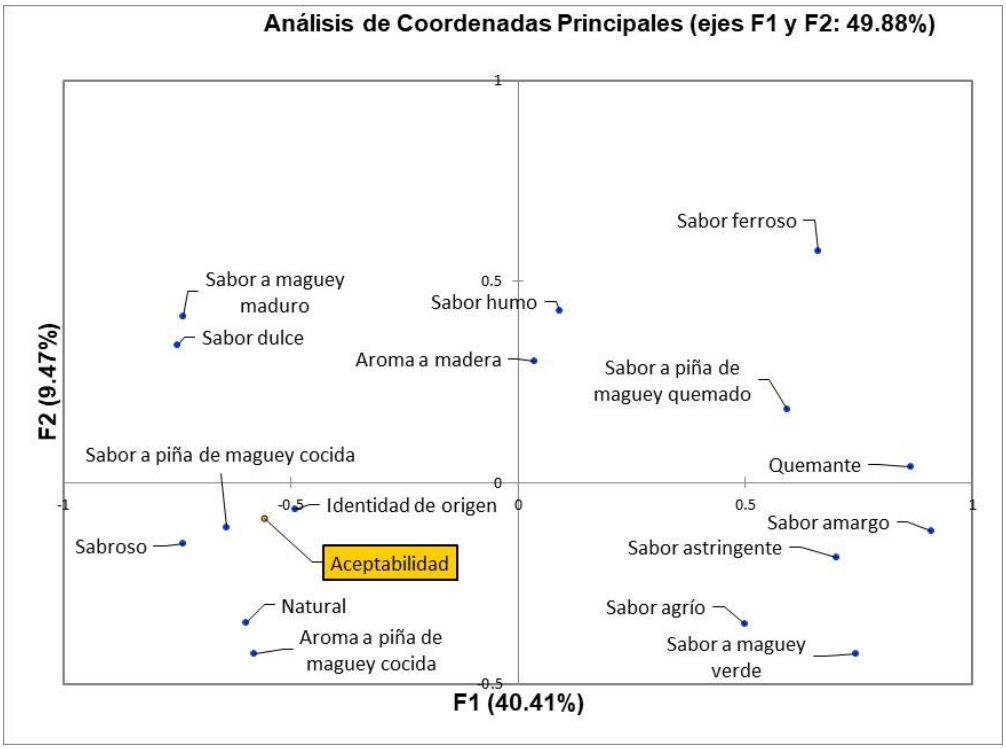


Figura 2. Gráfica de las asociaciones entre atributos sensoriales y no sensoriales (●) y la aceptación global de mezcales ancestrales basada en el escalamiento multidimensional (MDS). Fuente: Elaboración propia.

Figure 2. Graph of associations between sensory and non-sensory attributes (●) and global acceptance of ancestral mezcals based on multidimensional scaling (MDS). Source: Own elaboration.

El análisis de penalización (PA), que evalúa el efecto de los atributos sobre el agrado (aceptabilidad), se aplicó a los datos obtenidos mediante el cuestionario CATA con el propósito de identificar el efecto positivo o negativo de cada atributo sobre la media de aceptabilidad (Figura 3 y 4). Los atributos aroma a piña de maguey cocida, sabor dulce, sabor a maguey maduro, sabor a piña de maguey cocida, sabroso, natural e identidad de origen mostraron una penalización positiva significativa ($p \leq 0.0001$) en la media de aceptabilidad. Sabor amargo, sabor agrío, sabor a maguey verde, sabor a piña de maguey quemado, sabor ferroso, sabor astringente y quemante presentaron una penalización negativa significativa ($p \leq 0.0001$) en la media de aceptabilidad, sugiriendo que su presencia reduce el agrado del consumidor hacia el mezcal ancestral.

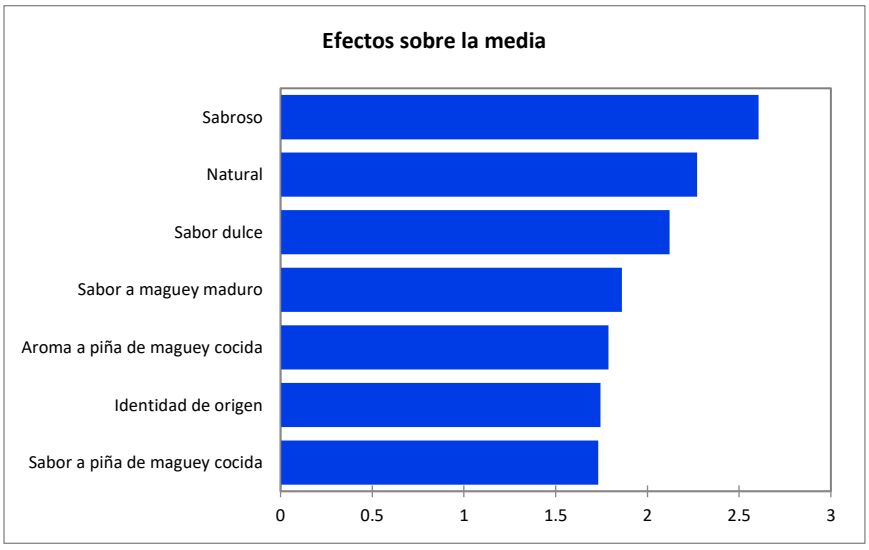


Figura 3. Representación gráfica de los atributos con efecto positivo sobre la aceptabilidad de mezcal ancestral, según el análisis de penalización. Fuente: Elaboración propia.
Figure 3. Graphic representation of the attributes with a positive effect on the acceptability of ancestral mezcal, according to the penalty analysis. Source: Own elaboration.

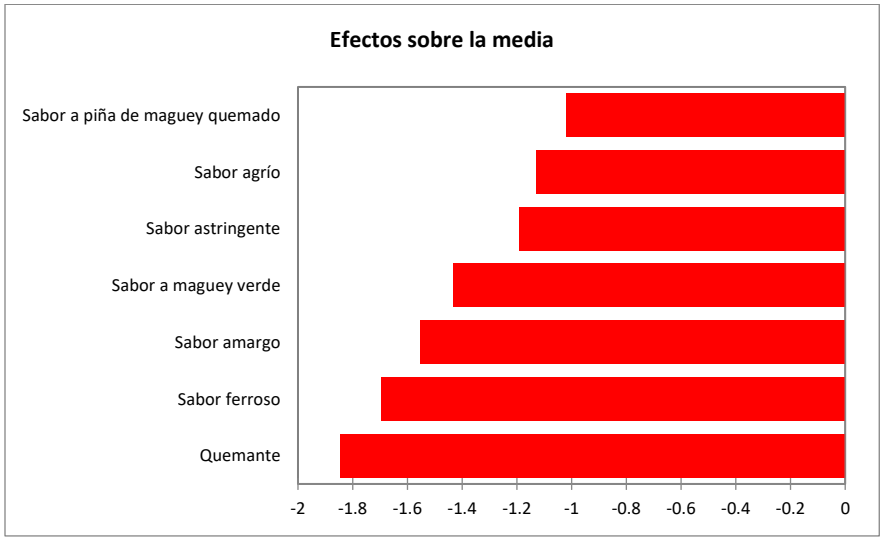


Figura 4. Representación gráfica de los atributos con efecto negativo sobre la aceptabilidad de mezcal ancestral, según el análisis de penalización. Fuente: Elaboración propia.
Figure 4. Graphic representation of the attributes with a negative effect on the acceptability of ancestral mezcal, according to the penalty analysis. Source: Own elaboration.

En la Figura 5 se muestra la representación gráfica de los resultados del análisis de penalización, basada en la incongruencia del uso de los atributos. Esta incongruencia se refiere a situaciones en las que un atributo fue utilizado exclusivamente para caracterizar el mezcal ancestral ideal (P[No]I[Sí]), interpretado como un atributo deseable y representados en la parte superior derecha

Núm. 60: 459-473 Julio 2025 ISSN electrónico: 2395-9525

del gráfico; o bien cuando el atributo fue utilizado exclusivamente para las muestras reales de mezcal ancestral (P[Sí]I[No]), interpretado como un atributo no deseado o que debería evitarse en el mezcal ancestral ideal y representados en la parte inferior derecha del gráfico.

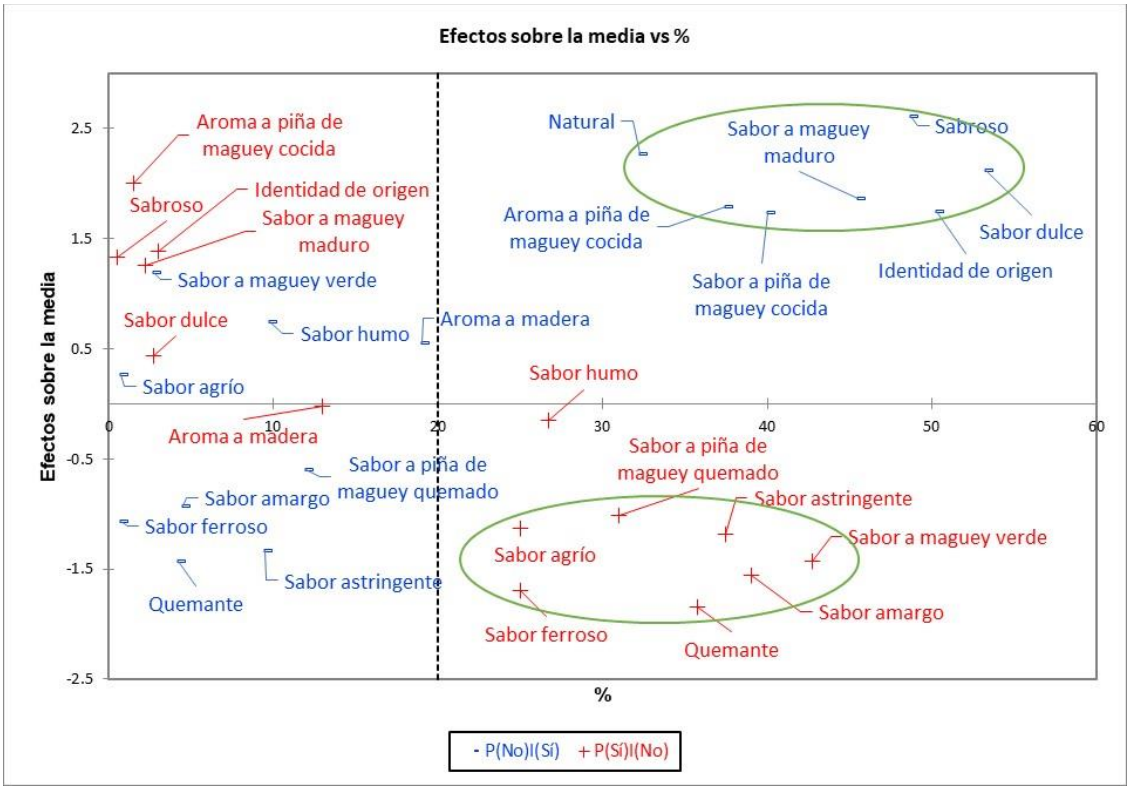


Figura 5. Gráfica de efectos sobre la media contra porcentaje de consumidores en los que se produjo incongruencia. Fuente: Elaboración propia.
Figure 5. Graph of effects on the mean versus percentage of consumers in which incongruence occurred. Source: Own elaboration.

Perfil Flash

Derivado del análisis de datos obtenidos mediante el método de Perfil Flash, se seleccionaron 8 panelistas y 6 atributos (aroma a piña de maguey cocida, sabor amargo, sabor a maguey verde, sabor a piña de maguey cocida, sabor ferroso y sabor astringente) que permitieron diferenciar los mezcales ancestrales. El APG mostró que la transformación óptima de la configuración consensuada explicó en los dos primeros componentes el 97.91% de la variabilidad total de los datos (Figura 6). El primer componente explicó un 67.24%, con mayores cargas asociadas a los atributos sabor a piña de maguey cocida, sabor amargo y sabor a maguey verde. El segundo componente explicó un 30.67% y las cargas mayores se asociaron con los atributos aroma a piña de maguey cocida, sabor astringente y sabor ferroso.

En cuanto a la distribución de mezcales ancestrales en el gráfico, el mezcal Tobalá de Santa María Ixcatlán se caracterizó por los atributos sabor a piña de maguey cocida y aroma a piña de maguey cocida, el mezcal Tobalá de Santa Catarina Minas se caracterizó principalmente por el atributo sabor ferroso. En cambio, los atributos sabor a maguey verde, sabor amargo y sabor astringente estuvieron más asociados con los mezcales elaborados a partir de agave Espadín, independientemente de su zona de producción. Estos resultados sugieren que el perfil sensorial de estos mezcales ancestrales evaluados está influenciado principalmente por la especie de agave

utilizada en su producción. Destacando que los elaborados a partir de agave Tobalá están más asociados a atributos agradables. Esta diferenciación puede ser clave para comprender las preferencias del consumidor y valorización del mezcal ancestral según su origen botánico y geográfico.

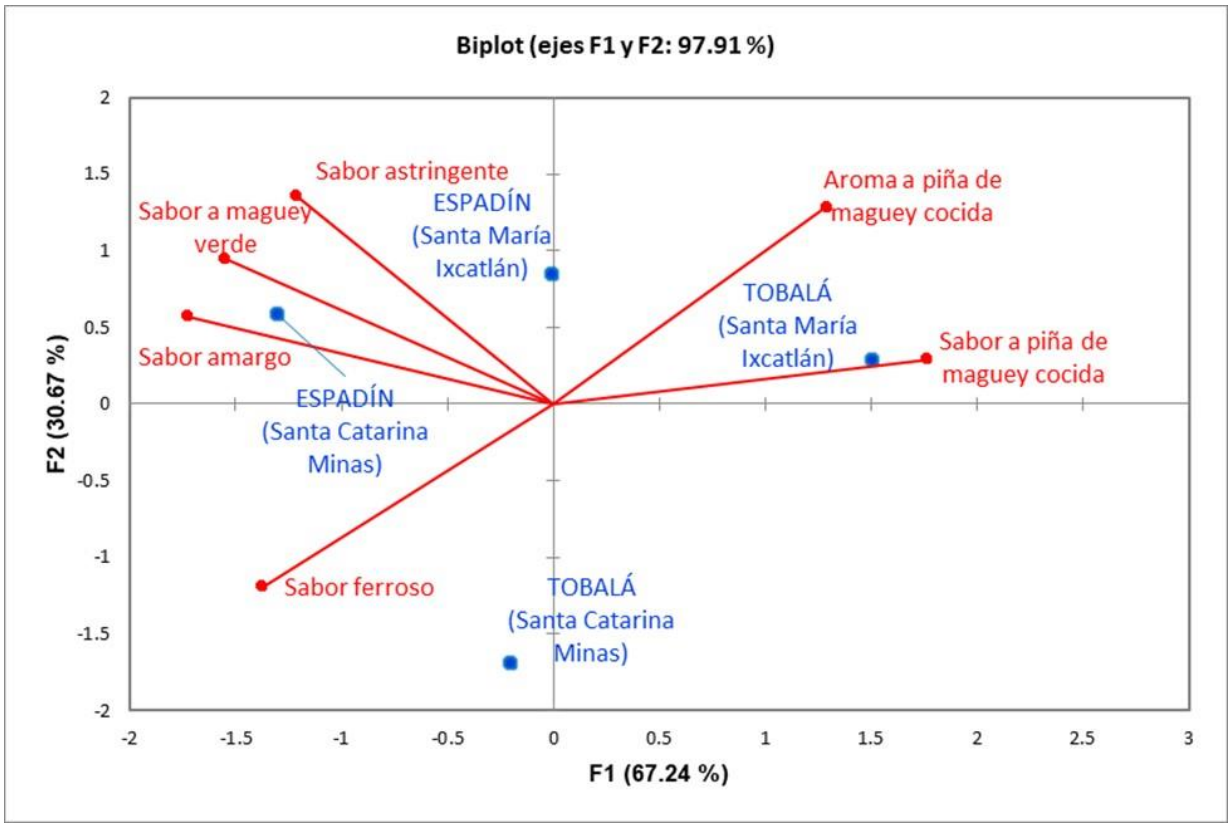


Figura 6. Representación gráfica de los mezcales ancestrales (●) y atributos (●) con los dos primeros ejes principales del Análisis Procrustes Generalizado (APG). Fuente: Elaboración propia.

Figure 6. Graphic representation of ancestral mezcals (●) and attributes (●) with the first two main axes of the Generalized Procrustes Analysis (GPA). Source: Own elaboration.

DISCUSIÓN

En los últimos años, se ha observado un aumento en la demanda de bebidas tradicionales, acompañado de una creciente preocupación por parte de los consumidores respecto a la garantía e información sobre los métodos de producción y el origen del producto (Cerjak *et al.*, 2011; Jordana, 2000). Este interés responde a un proceso de revalorización cultural que privilegia a productos con fuerte vínculo territorial y autenticidad. Los consumidores suelen reconocer a estas bebidas tradicionales con atributos sensoriales y no sensoriales, relacionados con su composición química (compuestos volátiles y no volátiles) y con su identidad regional, esta combinación de factores contribuye a su aceptación, percepción y actitud positiva hacia tales productos (Guerrero *et al.*, 2009). En este contexto el mezcal ancestral es un caso ejemplar de una bebida tradicional, representativa de la cultura mexicana y con características sensoriales particulares.

En línea con esta perspectiva, los resultados obtenidos a través del método CATA evidenciaron 16 atributos sensoriales y no sensoriales que permitieron a los consumidores diferenciar entre las muestras de mezcal ancestral. De manera similar, en un estudio realizado por Verissimo et al. (2020) utilizando el mismo método para caracterizar vinos tropicales (*Vitis vinifera* L.) se identificaron siete atributos (color rojizo, claro, aroma a alcohol, sabor agrio, sabor astringente, sabor a alcohol y sabor persistente), que permitieron diferenciar las muestras evaluadas. La identificación de atributos discriminantes no solo evidencia la riqueza sensorial del producto a evaluar, sino que, en el caso del mezcal ancestral, estos hallazgos refuerzan su potencial como bebida sensorialmente distintiva y culturalmente significativa, consolidando su posición como una bebida tradicional con potencial de valorización por consumidores conocedores de este tipo de productos.

Los atributos identificados para mezcales ancestrales elaborados con agave Espadín, tanto de Santa María Ixcatlán como de Santa Catarina Minas fueron los atributos de sabor a piña de maguey quemada, sabor astringente y sabor agrío. Estos atributos son similares con los reportados por Pablo (2019), quien definió el perfil sensorial de mezcales oaxaqueños provenientes de Villa Sola de Vega y San Pedro Quiatoni, ambas reconocidas zonas productoras de mezcal en Oaxaca. Además, Vera Guzmán *et al.* (2009) al realizar la determinación de ácido acético en mezcal elaborado a partir de las especies Espadín (*Agave angustifolia*) y Tobalá (*Agave potatorum*), reportaron concentraciones mayores en la primera especie, compuesto al que se le puede atribuir el sabor agrío percibido en las muestras evaluadas en el presente estudio. Cabe señalar que las diferencias en el perfil sensorial de los mezcales pueden atribuirse a diversos factores relacionados, tales como las condiciones y prácticas de producción en cada zona de producción, saber-hacer del maestro mezcalero y especie o variedad de agave utilizada (Hernández-López, 2018). En este caso particular, la especie de agave mostró ser un factor determinante.

El perfil sensorial del mezcal ancestral ideal, según los consumidores, evidenció atributos que desempeñan un papel clave en la preferencia por esta bebida destilada. Asimismo, determinar la penalización positiva o negativa en la media de aceptabilidad permitió identificar aquellos atributos que actúan como atributos impulsores o inhibidores del agrado o satisfacción del consumidor hacia el mezcal ancestral (Adams *et al.*, 2007; Meyners et al., 2013; Varela & Ares, 2012). Estos resultados sugieren que los participantes en la evaluación mostraron mayor preferencia por las muestras de mezcal ancestral elaborados de agave Tobalá, específicamente por atributos como sabor dulce, sabor a maguey maduro, sabor a piña de maguey cocida, aroma a piña de maguey cocida, sabroso, natural e identidad de origen. Un estudio similar realizado por Aung *et al.* (2024) en bebidas de trigo germinado, observaron que aroma a té de cebada, sabor a nuez y sabor puro mostraron una penalización positiva, mientras que sabor amargo, sabor sofocante y sabor astringente una penalización negativa, reduciendo la satisfacción del consumidor hacía la bebida.

El Perfil Flash en este estudio permitió una diferenciación basada en 6 atributos consensuados, conjuntamente los resultados mostraron una mejor diferenciación por especie de agave que por región de producción. Estos hallazgos determinaron que la especie de agave es un factor determinante en el perfil sensorial del mezcal ancestral, independientemente de la zona de producción. Al igual que en CATA, el mezcal elaborado con agave Tobalá tiende asociarse con atributos sensoriales más valorados por los consumidores, lo que podría explicar su creciente apreciación en mercados especializados (CRM, 2023). Esta diferenciación del perfil sensorial, no solo permite identificar los atributos presentes en las muestras, sino que también ofrece una base objetiva para la valorización comercial del mezcal ancestral según su origen botánico y geográfico.

CONCLUSIÓN

Los consumidores identificaron atributos sensoriales y no sensoriales que diferenciaron al mezcal ancestral según la especie de agave utilizada (*Agave angustifolia* y *Agave potatorum*) y la región de producción (Santa María Ixcatlán y Santa Catarina Minas), mediante el uso de los métodos

CATA y Perfil Flash. Se concluye que la especie de agave fue el factor que más influyó en el perfil sensorial del mezcal ancestral por encima del origen geográfico. Los mezcales elaborados de agave Espadín se vincularon a atributos como sabor agrío, sabor amargo y sabor astringente, en cambio, los mezcales elaborados con agave Tobalá fueron los preferidos por los consumidores, al estar más asociados a atributos como sabor dulce, sabor a maguey maduro, sabor y aroma a piña de maguey cocida, así como atributos no sensoriales como natural e identidad de origen. Estas diferencias no solo reflejan la composición química del agave y cultural del mezcal ancestral, sino también su potencial de valorización como producto tradicional diferenciado. Por lo tanto, el reconocimiento de esta caracterización sensorial puede fortalecer la identidad de origen del mezcal ancestral y contribuir a estrategias de protección, comercialización y posicionamiento en mercados especializados.

LITERATURA CITADA

Adams, J., Williams, A., Lancaster, B., & Foley, M. (2007). Advantages and uses of check-all-that-apply response compared to traditional scaling of attributes for salty snacks. *In 7th Pangborn Sensory Science Symposium. Minneapolis, USA, 12-16 August 2007*.

Ares, G., Dauber, C., Fernández, E., Giménez, A., & Varela, P. (2014). Penalty analysis based on CATA questions to identify drivers of liking and directions for product reformulation. *Food Quality and Preference*, *32*, 65-76. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.05.014

Aung, T., Kim, B. R., & Kim, M. J. (2024). Check-all-that-apply (CATA)- and rate-all-that-apply (RATA)-based sensometric assessment of germinated-wheat beverages. *Journal of Food Science and Technology*, *61*(5), 897-906. https://doi.org/10.1007/s13197-023-05884-z

Cerjak, M., Karolyi, D., & Kovačić, D. (2011). Effect of information about pig breed on consumers' acceptability of dry sausage. *Journal of Sensory Studies*, *26*(2), 128-134. https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2011.00329.x

Chavez-Parga, M. D. C., Pérez Hernández, E., & González Hernández, J. C. (2016). Revisión del agave y el mezcal. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *18*(1), 148-164. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n1.49552

Consejo Regulador del Mezcal (CRM). (2023). Informe estadístico 2020.

Cuevas Reyes, V., Sánchez Toledano, B. I., Borja Bravo, M., Espejel García, A., Sosa Montes, M., Barrera Rodríguez, A. I., & Saavedra García, M. J. (2019). Caracterización de la producción de maguey en el Distrito de Miahuatlán, Oaxaca. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *10*, 365-377. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342019000200365&nrm=iso

Dairou, V., & Sieffermann, J.-M. (2002). A Comparison of 14 Jams Characterized by Conventional Profile and a Quick Original Method, the Flash Profile. *Journal of Food Science*, *67*(2), 826-834. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10685.x

Guerrero, L., Guàrdia, M. D., Xicola, J., Verbeke, W., Vanhonacker, F., Zakowska-Biemans, S., Sajdakowska, M., Sulmont-Rossé, C., Issanchou, S., Contel, M., Scalvedi, M. L., Granli, B. S., & Hersleth, M. (2009). Consumer-driven definition of traditional food products and innovation in traditional foods. A qualitative cross-cultural study. *Appetite*, *52*(2), 345-354. https://doi.org/10.1016/j.appet.2008.11.008

Hernández-López, J. (2018). El mezcal como patrimonio social: de indicaciones geográficas genéricas a denominaciones de origen regionales. *Em Questão*, *24*(2), 404-433. https://doi.org/10.19132/1808-5245242.404-433

Jauregui-García, C. Z., Hernández-Montes, A., Espejel-García, A., Hernández-Rodríguez, L., & Barrera-Rodríguez, A. I. (2024). Caracterización sensorial de vino tinto Shiraz de Parras, Coahuila, México. *Acta universitaria*, *34*, 1-20. https://doi.org/10.15174/au.2024.4182

Jordana, J. (2000). Traditional foods: challenges facing the European food industry. *Food Research International*, *33*(3), 147-152. https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00028-4

Recibido:
19/febrero/2025

Aceptado:
12/junio/2025

Liu, J., Bredie, W. L. P., Sherman, E., Harbertson, J. F., & Heymann, H. (2018). Comparison of rapid descriptive sensory methodologies: Free-Choice Profiling, Flash Profile and modified Flash Profile. *Food Research International*, *106*, 892-900. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.01.062

Meilgaard, M. C., Civille, G. V., & Carr, B. T. (2016). *Sensory Evaluation Techniques* (C. press, Ed. Fifth ed.).

Meyners, M. (2016). Testing for differences between impact of attributes in penalty-lift analysis. *Food Quality and Preference*, *47*, 29-33. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.11.001

Meyners, M., Castura, J. C., & Carr, B. T. (2013). Existing and new approaches for the analysis of CATA data. *Food Quality and Preference*, *30*(2), 309-319. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2013.06.010

Pablo, M. (2019). Caracterización sensorial y química de mezcales oaxaqueños, valoración e identificación de su calidad intangible. (Tesis de Doctorado). Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Ingeniería Agroindustrial.

Pérez, C. (2007). Mezcales tradicionales de los pueblos de México, herencia cultural y biodiversidad. *Ciencias*, *87*, 54-60.

Rage, G., Atasi, O., Wilhelmus, M. M., Hernández-Sánchez, J. F., Haut, B., Scheid, B., Legendre, D., & Zenit, R. (2020). Bubbles determine the amount of alcohol in Mezcal. *Scientific Reports*, *10*(1), 11014. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67286-x

Torres-Salas, V., & Hernández-Montes, A. (2021). Respuestas emocionales en consumidores de Queso de Zacazonapan y probabilidad de consumo durante maduración. *Agrociencia*, *55*(3), 243-259. https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2416

Varela, P., & Ares, G. (2012). Sensory profiling, the blurred line between sensory and consumer science. A review of novel methods for product characterization. *Food Research International*, *48*(2), 893-908. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.06.037

Vera-Guzmán, A. M., Guzmán-Gerónimo, R. I., López, M. G., & Chávez-Servia, J. L. (2018). Volatile Compound Profiles in Mezcal Spirits as Influenced by Agave Species and Production Processes. *Beverages*, *4*(1), 9. https://www.mdpi.com/2306-5710/4/1/9

Vera Guzmán, A. M., Santiago García, P. A., & López, M. G. (2009). Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mezcal de Agave angustifolia y Agave potatorum. *Revista fitotecnia mexicana*, *32*, 273-279. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802009000400005&nrm=iso

Verissimo, C. M., Morais, S. D., Lima, L. L. D., Pereira, G. E., & Maciel, M. I. S. (2020). A short training as an enhancer of sensory ability: The case of red wine consumers [Article; Early Access]. *Journal of Sensory Studies*, 10, Article e12629. https://doi.org/10.1111/joss.12629

Wong, B., Owens, A., Phillips, M., & Kam, R. (2023). Identifying sensory attributes of Korean rice wine (makgeolli) using sensory evaluation and chemical analysis. *Journal of Food Science*, *88*(10), 4247-4261. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16762