

SEP

POLIBOTÁNICA

(Online) ISSN 2395-9525

(Print) ISSN 1405-2768



Enero 2025

Núm. 59

POLIBOTÁNICA



CONAHCYT



Núm. 59

 CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Enero 2025



PÁG.

CONTENIDO

- 1 Dos registros nuevos y comentarios taxonómicos de Selaginellaceae descubiertos en las amenazadas Praderas Intertropicales Templadas de Oaxaca y Querétaro, México
 Two new records and taxonomic comments of Selaginellaceae found out in the threatened Temperate Intertropical Prairies of Oaxaca and Queretaro, Mexico
 Ernesto Velázquez Montes | Carlos Martorell
- 15 Contribución a la taxonomía de especies mexicanas de *Colubrina* (Rhamnaceae) basadas en la arquitectura foliar y las superficies epidérmicas de las hojas
 Contribution to the taxonomy of Mexican species of *Colubrina* (Rhamnaceae) based on leaf architecture and epidermal surfaces
 Coral Yamileth Jorge Cruz | Rafael Fernández Nava | María de la Luz Arreguín Sánchez
- 43 Diversidad florística y atributo socioeconómico de los huertos familiares de Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca, México
 Floristic diversity and socioeconomic attribute of family gardens in Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca, Mexico
 Ciro Aquino Vásquez | Cecilia Vásquez Santiago | Joel Martínez López
- 63 Estructura de la comunidad de arvenses en parcelas de maíz de temporal en la Montaña de Guerrero, México
 Community structure of weeds in rainfed maize fields in the Montaña region of Guerrero, Mexico
 Marisa Silva Aparicio | Eugenia Pacheco Cantú | Cutberto Pacheco Flores
- 81 Variabilidad estructural de una comunidad de referencia del matorral espinoso tamaulipeco
 Variability of the structure, composition and diversity of a reference community of tamaulipan thorn scrub
 Eduardo Alanís-Rodríguez | Ana María Patiño-Flores | Alejandro Collantes-Chávez-Costa | Víctor M. Molina-Guerra | Ernesto Rubio-Camacho | Arturo Mora Olivo
- 97 Resiliencia de *Abies durangensis* Martínez a sequías en el suroeste de Durango mediante proxies dendroecológicos
 Drought resilience of *Abies durangensis* Martínez in southwestern Durango using dendroecological proxies
 José Alexis Martínez Rivas | Andrea Cecilia Acosta-Hernández | Eduardo Daniel Vivar-Vivar | Nancy Silva Ávila
- 117 Caracterización morfométrica de poblaciones del complejo *Agave angustifolia* (Asparagaceae: Agavoideae) en la región norte de Guerrero, México
 Morphometric characterization of populations of the *Agave angustifolia* complex (Asparagaceae: Agavoideae) in the northern region of Guerrero, Mexico
 Jorge Huerta Zavala | Abisaí Josué García Mendoza | Elías Hernández Castro | Héctor Ramón Segura Pacheco | Agustín Damián Nava | Flaviano Godínez Jaimes
- 141 Evaluación del establecimiento del arbusto sámota (*Coursetia glandulosa* A. Gray) a partir de semillas, bajo diferentes condiciones en terreno árido degradado de Hermosillo, Sonora, México
 Evaluation of the establishment of the sámota bush (*Coursetia glandulosa* A. Gray) from seeds, under different conditions in degraded arid land of Hermosillo, Sonora, Mexico
 Hernán Celaya Michel | Diana Miriam Mc Caughey Espinoza | Jesús del Rosario Ruelas Islas | Miguel Angel Barrera Silva | María Eugenia Rentería Martínez
- 149 Impacto de la poda temprana en el crecimiento y forma de *Brosimum alicastrum* Sw.
 Impact of early pruning on growth and shape of *Brosimum alicastrum* Sw.
 Alfredo Esteban Tadeo Noble | Alberto Santillán Fernández | Jaime Bautista Ortega | Sixto Paredes Ríos
- 159 Diagnóstico y servicios ecosistémicos del arbolado de alineación en Xalapa, Veracruz, México
 Assessment of street trees and their ecosystem services in Xalapa, Veracruz, Mexico
 Arturo García Valencia | Odilón Sánchez Sánchez | Aníbal Ramírez Soto | Carlos Renato Ramos Palacios
- 181 Propagación vegetativa de *Salvia elegans* Vahl cultivada a diferentes intensidades lumínicas y evaluación de su efecto antiinflamatorio
 Vegetative propagation of *Salvia elegans* Vahl grown at different light intensities and evaluation of its anti-inflammatory effect
 Maribel Herrera Ruiz | Enrique Jiménez Ferrer | Manasés González Cortazar | Martha Lucía Arenas Ocampo | Antonio Ruperto Jiménez Aparicio | Nayeli Monterrosas Brisson



PÁG.

CONTENIDO

- 199 Comparación de la germinación de semillas y el desarrollo inicial de plántulas de *Agave angustifolia* Haw. y *Agave karwinskii* Zucc. en condiciones *in vitro* y en invernadero
 Comparison of seed germination and seedlings initial development of *Agave angustifolia* Haw. and *Agave karwinskii* Zucc. *in vitro* and greenhouse conditions
 Victoria Cebrián Barba | Eugenio Pérez Molphe Balch | Lucía Isabel Chávez Ortiz
- 213 Evaluación *in vitro* de nanopartículas de síntesis verde y otros métodos bioracionales para el control de *Pectobacterium carotovorum* en *Agave cupreata*
 In vitro evaluation of green synthesis nanoparticles and other biorational methods for the control of *Pectobacterium carotovorum* in *Agave cupreata*
 Hilda Guadalupe García Núñez | José Manuel Soria Díaz | Amaury Martín Arzate Fernández | Tomás Héctor Norman Mondragón | Eulogio De la Cruz Torres
- 225 Efecto de osmolitos, inhibidores y reguladores del crecimiento vegetal en la conservación *in vitro* de tres especies de *Agave* spp.
 Effect of osmolytes, inhibitors, and plant growth regulators on the *in vitro* conservation of three *Agave* spp. species
 Jesús Antonio Vega García | Amaury Martín Arzate Fernández | Hilda García Núñez | Jesús Ignacio Reyes-Díaz
- 237 Evaluación del efecto citotóxico del extracto etanólico y saponinas terpélicas de *Solanum elaeagnifolium* sobre células de cáncer de mama triple negativo
 Evaluation of the cytotoxic effect of ethanolic extract and terpenic saponins from *Solanum elaeagnifolium* on triple-negative breast cancer cells
 Oscar Alberto Alvarez Quezada | Imelda Neri Vargas | Claudia Lucía Vargas Requena
- 251 Efecto antifúngico de extractos etanólicos de plantas medicinales de la Sierra Norte de Puebla contra *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp.
 Antifungal effect of the ethanolic extracts from medicinal plants of the Sierra Norte de Puebla against *Phytophthora* sp. and *Rhizoctonia* sp.
 José Bernal Alzate | Luis Manuel Hernández Loaiza | Francisco Javier Camacho Martínez | Karla Arroyo Guevara | Laura Ortega-Hernández | Juana Trocoli Carmona
- 261 Efecto de tres fertilizantes orgánicos foliares en el crecimiento de *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (*Lamiaceae*)
 Effect of three organic fertilizers on the growth of *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (*Lamiaceae*)
 Uriel Hernández Ramírez | Saúl Rojas Hernández | Miguel Angel Gruinalt Santos | Judith Morales Barrera | Mirna Vázquez Villamar | Teolincacihuatl Romero Rosales
- 275 Componentes antioxidantes y calidad nutricional de aguamiel de diversos cultivares de agave pulquero (*Agave salmiana* y *A. mapisaga*)
 Antioxidant components and nutritional quality of aguamiel of some cultivars from agave pulquero (*Agave salmiana* y *A. mapisaga*)
 Lyzbeth Hernández Ramos | María del Rosario García Mateos | María Carmen Ybarra Moncada
- 295 Actividad biológica de extractos etanólicos de *Ardisia compressa* Kunth sobre la mosca blanca *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) y una cepa de *Fusarium oxysporum* Schltld
 Biological activity of ethanolic extracts of *Ardisia compressa* Kunth on whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) and a strain of *Fusarium oxysporum* Schltld
 Jesús Rigoberto Molina Maldonado | Esaú Ruiz Sánchez | Rubén Humberto Andueza Noh | René Garruña Hernández | Federico Antonio Gutiérrez Miceli | Luis Filipe da Conceição Dos Santos | Arnoldo Wong Villarreal | Emanuel Hernández Núñez
- 313 Diversidad genética en el complejo poblacional de la raza durango de frijol *Phaseolus vulgaris* L.
 Genetic diversity in the durango race population complex of common bean *Phaseolus vulgaris* L.
 Rigoberto Rosales Serna | Norma Almaraz Abarca | Donaji Sierra Zurita | Ana Isabel Chaidez Ayala | Eli Amanda Delgado Alvarado
- 329 Etnomicología y venta de hongos comestibles silvestres en el tianguis de San Antonio Acahualco
 Ethnomicology and sale of wild edible mushrooms at tianguis in San Antonio Acahualco, State of Mexico
 Xochitl Jasso Arriaga
- 347 Estudio descriptivo sobre el uso de plantas antiinflamatorias para trastornos menstruales en mujeres residentes en Trujillo, La Libertad, Perú
 Descriptive study on the use of anti-inflammatory plants for menstrual disorders in women residents in Trujillo, La Libertad, Peru
 Alisson Esthefany Santamaría Balarezo | Carlos Alberto Pérez-Pérez | Hevi Elise Cavero Parra | Jhonler Estalin Paz López | Jhoseline Stayce Guillén



Portada

Las **plantas arvenses** son aquellas que crecen de manera espontánea en ambientes cultivados, generalmente consideradas como **malezas o malas hierbas** debido a que compiten con los cultivos por recursos como agua, luz y nutrientes. Aunque suelen tener connotaciones negativas en la agricultura, muchas especies arvenses poseen valores ecológicos, medicinales o alimenticios, y pueden contribuir a la biodiversidad del entorno. Su manejo adecuado es fundamental para equilibrar su impacto en los sistemas agrícolas.

Weed plants are those that grow spontaneously in cultivated environments, often considered as **weeds or unwanted plants** because they compete with crops for resources such as water, light, and nutrients. Although they are often seen negatively in agriculture, many weed species have ecological, medicinal, or nutritional value and can contribute to the biodiversity of their surroundings. Proper management is essential to balance their impact on agricultural systems.

por/by

Rafael Fernández Nava



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Director General: *Dr. Arturo Reyes Sandoval*

Secretario General: *Ing. Arq. Carlos Ruiz Cárdenas*

Secretario Académico: *Mtro. Mauricio Igor Jasso Zaranda*

Secretario de Innovación e Integración Social: *M. en C. Ricardo Monterrubio López*

Secretario de Investigación y Posgrado: *Dra. Laura Arreola Mendoza*

Secretario de Servicios Educativos: *Dra. Ana Lilia Coria Páez*

Secretario de Administración: *M. en C. Javier Tapia Santoyo*

Director de Educación Superior: *Dra. María Guadalupe Ramírez Sotelo*

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Director:

Dr. Isaac Juan Luna Romero

Subdirectora Académica:

M. en C. Martha Patricia Cervantes Cervantes

Jefe de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación:

Dr. Gerardo Aparicio Ozores

Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social:

Biól. Gonzalo Galindo Becerril

POLIBOTÁNICA, Año 30, No. 59, enero 2025, es una publicación semestral editada por el Instituto Politécnico Nacional, a través de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Santo Tomas C.P. 11340 Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. Teléfono 57296000 ext. 62331.
<http://www.herbario.encb.ipn.mx/>, Editor responsable: Rafael Fernández Nava. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-011309001300-203. ISSN impreso: 1405-2768, ISSN digital: 2395-9525, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de informática de la ENCB del IPN, Rafael Fernández Nava, Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Santo Tomas CP 11340 Delegación Miguel Hidalgo México, D.F.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Politécnico Nacional.

REVISTA BOTÁNICA INTERNACIONAL DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

EDITOR EN JEFE
Rafael Fernández Nava

EDITORAS ASOCIADAS
Maria 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

POLIBOTÁNICA, revista botánica internacional del Instituto Politécnico Nacional, incluye exclusivamente artículos que representen los resultados de investigaciones originales en el área. Tiene una periodicidad de dos números al año, con distribución y Comité Editorial Internacional.

Todos los artículos enviados a la revista para su posible publicación son sometidos por lo menos a un par de árbitros, reconocidos especialistas nacionales o internacionales que los revisan y evalúan y son los que finalmente recomiendan la pertinencia o no de la publicación del artículo, cabe destacar que este es el medio con que contamos para cuidar el nivel y la calidad de los trabajos publicados.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS

Se aceptarán aquellos originales que se ajusten a las prescripciones siguientes:

POLIBOTÁNICA incluye exclusivamente artículos que representen los resultados de investigaciones originales que no hayan sido publicados.

- 1.** El autor deberá anexar una carta membretada y firmada dirigida al Editor, donde se presente el manuscrito, así como la indicación de que el trabajo es original e inédito, ya que no se aceptan trabajos publicados o presentados anterior o simultáneamente en otra revista, circunstancia que el autor(es) deberá declarar expresamente en la carta de presentación de su artículo.
- 2.** Al quedar aceptado un trabajo, su autor no podrá ya enviarlo a ninguna otra revista nacional o extranjera.
- 3.** Los artículos deberán estar escritos en español, inglés, francés o portugués. En el caso de estar escritos en otros idiomas diferentes al español, deberá incluirse un amplio resumen en este idioma.
- 4.** Como parte de los requisitos del CONACYT, **POLIBOTÁNICA** ahora usa la plataforma del Open Journal System (OJS); para la gestión de los artículos sometidos a la misma. Así que le solicitamos de la manera más atenta sea tan amable de registrarse y enviar su artículo en la siguiente liga: www.polibotanica.mx/ojs/index.php/polibotanica
 - a) cargar el trabajo en archivo electrónico de office-word, no hay un máximo de páginas con las siguientes características:
 - b) en páginas tamaño carta, letra times new roman 12 puntos a doble espacio y 2 cm por margen
- 5.** Las figuras, imágenes, gráficas del trabajo deben estar incluidas en el documento de Word original:
 - a) en formato jpg
 - b) con una resolución mínima de 300 dpi y un tamaño mínimo de 140 mm de ancho
 - c) las letras deben estar perfectamente legibles y contrastadas
- 6.** Todo trabajo deberá ir encabezado por:
 - a) Un título tanto en español como en inglés que exprese claramente el problema a que se refiere. El formato para el título es: negritas, tamaño 14 y centrado;
 - b) El nombre del autor o autores, con sus iniciales correspondientes, sin expresión de títulos o grados académicos. El formato para los autores es: alineados a la izquierda, cada uno en un párrafo distinto y tamaño 12. Cada autor debe tener un número en formato superíndice indicando a qué afiliación pertenece;
 - c) La designación del laboratorio e institución donde se realizó el trabajo. La(s) afiliación(es) debe(n) estar abajo del grupo de autores. Cada afiliación deberá estar en un párrafo y tamaño

12. Al inicio de cada afiliación estará el número en superíndice que lo relaciona con uno o más autor/es.

d) El autor para correspondencia deberá estar en el siguiente párrafo, alineado a la izquierda, tamaño 12.

7. Todo trabajo deberá estar formado por los siguientes capítulos:

a) RESUMEN y ABSTRACT. Palabras clave y Key Words. El resumen debe venir después de la afiliación de los autores, alineado a la izquierda, tamaño 12. La palabra “Resumen: / Abstract:” debe venir en negritas y con dos puntos. El texto del resumen debe empezar en el párrafo siguiente, tamaño 12 y justificado. El texto “Palabras clave / Key Words:” debe venir en negritas seguido de dos puntos. Cada una de las palabras clave deben estar separadas por coma o punto y coma, finalizadas por punto.

b) INTRODUCCIÓN y MÉTODOS empleados. Cuando se trate de técnicas o métodos ya conocidos, solamente se les mencionará por la cita de la publicación original en la que se dieron a conocer. El formato para todas las secciones en esta lista es: negritas, tamaño 16 y centrado.

c) RESULTADOS obtenidos. Presentación acompañada del número necesario de gráficas, tablas, figuras o diagramas de tamaño muy cercano al que tendrá su reproducción impresa (19 x 14 cm).

d) DISCUSIÓN concisa de los resultados obtenidos, limitada a lo que sea original y a otros datos relacionados directamente y que se consideren nuevos.

e) CONCLUSIONES.

ESPECIFICACIONES DE FORMATO PARA EL CUERPO DEL TRABAJO

1. Secciones/Subtítulos de párrafo: Fuente tamaño 16, centrado, en negritas, con la primera letra en mayúscula.
2. Subsecciones/Subtítulos de párrafo secundarios : Fuente tamaño 14, centrado, en negritas, con la primera letra en mayúscula. Cuando existan subsecciones de subsección formatear en tamaño 13 negrita y centrado.
3. Cuerpo del texto: Fuente tamaño 12, justificado. NO debe haber saltos de línea entre párrafos.
4. Las notas de pie de página deben estar al final de cada página, fuente tamaño 12 justificadas.
5. Cita textual con mas de tres líneas: Fuente tamaño 12, margen izquierdo de 4 cm.
6. Título de imágenes: Fuente tamaño 12, centrado y en negritas, separado por dos puntos de su descripción. Descripción de las imágenes: tamaño 12.
7. Notas al pie de las imágenes: Fuente tamaño 12 y centradas con respecto a la imagen, la primera letra debe estar en mayúsculas.
8. Imágenes: deben estar en el cuerpo del texto, insertadas en formato png o jpg, a por lo menos 300 dpi de resolución y centradas. Las imágenes deben estar en línea con el texto. Se consideran imágenes: gráficos, cuadros, fotografías, diagramas y, en algunos casos, tablas y ecuaciones.
9. Tablas de tipo texto: El título de las columnas de las tablas debe estar en negritas y los datos del cuerpo de la tabla con fuente normal. Los nombres científicos deben estar en itálicas. Se recomienda utilizar las Tablas como imágenes, estas deberán de ir centradas (a por lo menos 300 dpi de resolución).
10. Notas al pie de la tabla: Fuente tamaño 12 y centradas con respecto a la tabla, la primera letra debe estar en mayúsculas.
11. Ecuaciones pueden estar en Mathtype 1 o en imagen. En este último caso, seguir instrucciones del punto 8.
12. Citas del tipo autor y año deben estar entre paréntesis, con el apellido del autor seguido por el año (Souza, 2007), primera letra en mayúscula.

- 8. LITERATURA CITADA**, Se tomara como base el Estilo APA para las Referencias Bibliográficas, formada por las referencias mencionadas en el texto del trabajo y en orden alfabético. Es obligatorio utilizar Mendeley® (software bibliográfico). El propósito de utilizar este tipo de software es asegurar que los datos contenidos en las referencias están correctamente estructurados y corresponden a las citas del cuerpo del texto.

ESTRUCTURA Y FORMATO DE LOS AGRADECIMIENTOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Los Agradecimientos deberán estar después de la última sección del cuerpo del texto. Esta información debe tener como título la palabra “Agradecimientos”, o su equivalente en otro idioma, en negritas, tamaño 12 y centrado. El texto de esta información debe estar en tamaño 12 justificado.
2. Las Referencias bibliográficas deben estar en orden alfabético sin salto de línea de párrafo, alineados a la izquierda, en tamaño 12.
3. Apéndices, anexos, glosarios y otros materiales deben incluirse después de las referencias bibliográficas. En caso de que estos materiales sean extensos deberán ser creados como archivos PDF.

9. REVISIÓN Y PUBLICACIÓN

Todos los artículos enviados a la revista para su posible publicación serán sometidos a una revisión “doble ciego”, se enviaran por lo menos a un par de árbitros, reconocidos especialistas nacionales o internacionales que los revisarán y evaluarán y serán los que finalmente recomiendan la pertinencia o no de la publicación del artículo, cabe destacar que este es el medio con que contamos para cuidar el nivel y la calidad de los trabajos publicados.

Una vez aceptado el trabajo, se cobrarán al autor(es) \$299 por página más IVA, independientemente del número de fotografías que contenga.

PUBLICATION GUIDELINES

POLIBOTÁNICA, an international botanical journal supported by the National Polytechnic Institute, only publishes material resulting of original research in the botanic area. It has a periodicity of two issues per year with international distribution and an international Editorial Committee.

All articles submitted to **POLIBOTÁNICA** for publication are reviewed by at least a couple of referees. National or international recognized experts will evaluate all submitted materials in order to recommend the appropriateness or otherwise of a publication. Therefore, the quality of published papers in **POLIBOTÁNICA** is of the highest international standards.

FOR PUBLICATION OF ARTICLES

Originals that comply with the following requirements will be accepted:

1. **POLIBOTÁNICA** includes only items that represent the results of original research which have not been published. The author should attach an official and signed letter to Editor stating that the work is original and unpublished. We do not accept articles published or presented before or simultaneously in another journal, a fact that the author (s) must expressly declare in the letter.
2. When an article has been accepted, the author can no longer send it to a different national or foreign journal.
3. Articles should be written in Spanish, English, French or Portuguese. In the case of be written in

languages other than Spanish, it should include an abstract in English.

4. The article ought to be sent to the POLIBOTÁNICA's Open Journal System <http://www.polibotanica.mx/ojs> in an office-word file without a maximum number of pages with the following features:

a) on letter-size pages, Times New Roman font type, 12-point font size, double-spaced and 2 cm margin

5. The figures, images, graphics in the article must be attached as follows:

a) in jpg format

b) with a minimum resolution of 300 dpi and a minimum size of 140 mm wide

c) all characters must be legible and contrasted

6. All articles must include:

a) a title in both Spanish and English that clearly express the problem referred to. The format for this section is: bold, font size 14 and centered.;

b) the name of the author or authors, with their initials, no titles and no academic degrees. The format for this section is: font size 12, aligned to the left, each name in a different paragraph but without spaces in-between and a superscript number indicating the affiliation;

c) complete affiliations of all authors (including laboratory or research institution). The format for this section is: font size 12, aligned to the left, each name in a different paragraph but without spaces in-between and a superscript number at the beginning of the affiliation;

d) correspondence author should be in the next paragraph, font size 12 and aligned to the left.

7. All work should be composed of the following chapters:

a) RESUMEN and ABSTRACT. Palabras clave y Key Words. The format for this section is: bold, font size 12 and centered. Both words (RESUMEN: and ABSTRACT:)must include a colon, be in bold and aligned to the left. The body of the abstract must be justified and in font size 12. Both palabras clave: and keywords:must include a colon, be in bold and aligned to the left. Keywords must be separated by a comma or semicolon, must be justified and in font size 12.

b) INTRODUCTION y METHODS. In the case of techniques or methods that are already known, they were mentioned only by appointment of the original publication in which they were released.

c) RESULTS. Accompanied with presentation of the required number of graphs, tables, figures or diagrams very close to the size which will be printed (19 x 14 cm).

d) DISCUSSION. A concise discussion of the results obtained, limited to what is original and other related directly and considered new data.

e) CONCLUSIONS. The format for sections Introduction, Results, Discussion and Conclusionsis: bold, font size 16 and centered.

FORMAT SPECIFICATIONS FOR THE BODY OF WORK

1. Sections: Font size 16, centered, bold, with the first letter capitalized.
 2. Subsections / Secondary Subtitles: Font size 14, centered, bold, with the first letter capitalized. When there are second grade subsections format in size 13 bold and centered.
 3. Body: Font size 12, justified. There should NOT be line breaks between paragraphs.
 4. Footnotes should be at the bottom of each page, font size 12 and justified.
 5. Textual quotation with more than three lines: Source size 12, left margin of 4 cm.
 6. Image Title: Font size 12, centered and bold, separated by two points from its description. Description of the images: size 12.
 7. Images Footnotes: Font size 12 and centered with respect to the image, the first letter must be in capital letters.
 8. Images: must be in the body of the text, inserted in png or jpg format, at least 300 dpi resolution and centered. Images should be in line with the text. Graphs, charts, photographs, diagrams and, in some cases, tables and equations are considered images.
 9. Text Tables: Only The title of the columns of the tables must be in bold. Scientific names must be in italics. It is recommended to use the Tables as images, they should be centered (at least 300 dpi resolution).
 10. Footnotes: Font size 12 and centered with respect to the table, the first letter must be in upper case.
 11. Equations can be in Mathtype 1 or in image. In the latter case, follow the instructions in point 8.
 12. Quotations of the author and year type must be in parentheses, with the author's last name followed by the year (Souza, 2007), first letter in capital letters.
8. LITERATURE CITED. All references must be cited using the APA stile. POLIBOTÁNICA requires the use of Mendeley® (free reference manager) for the entire bibliography.

STRUCTURE AND FORMAT OF ACKNOWLEDGMENTS AND BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

1. Acknowledgments must be after the last section of the body of the text. This information should be titled the word "Acknowledgments", or its equivalent in another language, in bold, size 12 and centered. The text of this information must be in size 12 justified.
2. Bibliographical references should be in alphabetical order without paragraph line jump, aligned to the left, in size 12.
3. Appendices, annexes, glossaries and other materials should be included after the bibliographic references. If these materials are extensive they should be created as PDF files.

9. REVIEW AND PUBLICATION

All articles submitted to the journal for publication will undergo a review "double-blind", they will be sent at least a couple of referees, recognized national or international experts that reviewed and evaluated and will be finally recommended the relevance or the publication of the article, it is noteworthy that this is the means that we have to take care of the level and quality of published articles.

Once accepted the article, the author will be charged \$15 USD per text page, regardless of how many pictures it contains.

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

rfernand@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.



Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

**DOS REGISTROS NUEVOS Y
COMENTARIOS TAXONÓMICOS DE
Selaginellaceae DESCUBIERTOS EN LAS
AMENAZADAS PRADERAS
INTERTROPICALES TEMPLADAS DE
OAXACA Y QUERÉTARO, MÉXICO**

**TWO NEW RECORDS AND
TAXONOMIC COMMENTS OF
Selaginellaceae FOUND OUT IN THE
THREATENED TEMPERATE
INTERTROPICAL PRAIRIES OF
OAXACA AND QUERETARO, MEXICO**

Velázquez Montes, E. y C. Martorell

DOS REGISTROS NUEVOS Y COMENTARIOS TAXONÓMICOS DE *Selaginellaceae* DESCUBIERTOS EN LAS AMENAZADAS PRADERAS INTERTROPICALES TEMPLADAS DE OAXACA Y QUERÉTARO, MÉXICO
TWO NEW RECORDS AND TAXONOMIC COMMENTS OF *Selaginellaceae* FOUND OUT IN THE THREATENED TEMPERATE INTERTROPICAL PRAIRIES OF OAXACA AND QUERETARO, MEXICO



Dos registros nuevos y comentarios taxonómicos de Selaginellaceae descubiertos en las amenazadas Praderas Intertropicales Templadas de Oaxaca y Querétaro, México**Two new records and taxonomic comments of Selaginellaceae found out in the threatened Temperate Intertropical Prairies of Oaxaca and Queretaro, Mexico**

Ernesto Velázquez Montes y
Carlos Martorell

**DOS REGISTROS NUEVOS
Y COMENTARIOS
TAXONÓMICOS DE
Selaginellaceae
DESCUBIERTOS EN LAS
AMENAZADAS PRADERAS
INTERTROPICALES
TEMPLADAS DE OAXACA
Y QUERÉTARO, MÉXICO**

**TWO NEW RECORDS AND
TAXONOMIC COMMENTS
OF Selaginellaceae FOUND
OUT IN THE THREATENED
TEMPERATE
INTERTROPICAL PRAIRIES
OF OAXACA AND
QUERETARO, MEXICO**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 1-13. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.1

Ernesto Velázquez-Montes Autor de correspondencia: vme@unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-4560-7266>

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias,
Departamento de Biología Comparada, Laboratorio de Plantas Vasculares,
C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Carlos Martorell martorell@ciencias.unam.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0758-3953>

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Departamento de
Ecología y Recursos Naturales, Laboratorio de Ecología de Ambientes Limitantes,
C.P. 04510, Ciudad de México, México.

RESUMEN: Se han llevado a cabo diferentes estudios taxonómicos y florísticos relacionados con licofitas en los estados de Guanajuato, Oaxaca y Querétaro. No obstante, recientes esfuerzos de recolecta realizados en las Praderas Intertropicales Templadas, han permitido el descubrimiento de *Selaginella arsenei* en el estado de Oaxaca y *Selaginella ribae* en Querétaro. Por tanto, los objetivos de este trabajo son informar de la presencia de estas dos especies que constituyen nuevos registros para la flora en dichos estados; confirmar la presencia de esta última especie en Guanajuato y discutir que *Selaginella ribae* y *S. lepidophylla* son especies diferentes; también se resalta la importancia de la biodiversidad de las Praderas Intertropicales Templadas.

Palabras clave: distribución geográfica, flora, licofitas, pastizales.

ABSTRACT: Different taxonomic and floristic treatments related with lycophytes had been carried out in the states of Guanajuato, Oaxaca, and Queretaro. However, recent collection efforts carried out in the Temperate Intertropical Prairies, have led to the discovery of *Selaginella arsenei* in the state of Oaxaca, and *Selaginella ribae* in Queretaro. The aims of this work are to report the presence of these two species that constitute new records to the flora in the aforementioned states; to confirm the presence of the latter species in Guanajuato, and that *Selaginella ribae*, and *S. lepidophylla* are different species, and to call the attention about the biodiversity of the Temperate Intertropical Prairies.

Key words: flora, geographic distribution, grassland, lycophytes.

INTRODUCCIÓN

Durante la realización del proyecto “Diversidad vegetal en los confines sureños de los pastizales norteamericanos”, llevado a cabo por el personal del Laboratorio de Ecología de Ambientes Limitantes de la Facultad de Ciencias de la UNAM, se han hecho hallazgos importantes de plantas en dicho ecosistema, por ejemplo, Martorell *et al.* (2017, 2022) y Velázquez-Montes (2022). El proyecto mencionado pretende documentar el enorme valor biológico de los últimos remanentes de un sistema casi desaparecido: las Praderas Intertropicales Templadas (PIT) de México. Estos pastizales se encuentran desde Canadá hasta el norte de Oaxaca, en climas generalmente semiáridos a subhúmedos, en altitudes

de 2000 a 3000 m s.n.m., y con heladas frecuentes en invierno. Las PIT han sido casi completamente transformadas para establecer campos de cultivo, excepto en su extremo occidental.

En el norte de Oaxaca ($17^{\circ} 51' 0'' - 17^{\circ} 56' 15''$ N, $97^{\circ} 19' 10'' - 97^{\circ} 30' 55''$ W) se encuentra una PIT separada de las demás PIT mexicanas, que se localizan relativamente cerca de la faja volcánica transmexicana, y que constituye el límite sureño de los grandes pastizales que se localizan en el centro de Norteamérica (Cruz-Cisneros & Rzedowski, 1980), (Figura 1). A pesar de que estos últimos autores ya habían reconocido a esta comunidad como un pastizal natural, el cual detenta un récord mundial de diversidad vegetal (Martorell *et al.*, 2017), y que alberga varias especies amenazadas como el águila real (*Aquila chrysaetos*), este extraordinario sistema se encuentra amenazado porque está siendo destruido rápidamente por los mal llamados proyectos de reforestación (Martorell *et al.*, 2017, 2022). Las PIT de Oaxaca se encuentran entre los 2100 y 2700 m s.n.m., con una temperatura media cercana a los 16°C y una precipitación de 515 a 688 mm. Pueden clasificarse en tres unidades que albergan comunidades diferentes; una de ellas (la más distinta de las otras) se desarrolla en suelos calizos, entre los 2100 y 2300 m s.n.m. Las otras dos se ubican sobre toba volcánica. En las partes bajas se encuentra un pastizal casi desprovisto de árboles excepto por unas cuantas leguminosas como *Vachellia farnesiana* (L.) Wight & Arn., y *Mimosa biuncifera* Benth. y algunos encinos, compuestos principalmente por *Quercus castanea* Née (Martorell-Delgado *et al.*, 2022).

En Querétaro es posible reconocer los mismos tres tipos de PIT. Entre los 2000 y 2500 m s.n.m., algunas se encuentran sobre roca volcánica que debieron cubrir buena parte del sur del estado (Ramos de Cárdenas, 1582). En las inmediaciones de Bernal, San Antonio la Cal y Vizarrón, hay pequeños enclaves de pastizal sobre roca caliza (Zamudio-R. *et al.*, 1992). Conforme se asciende a las sierras, el número de árboles va aumentando. Por arriba de los 2500 m hay sabanas de encinos (*Quercus spp.*), pinos piñoneros (*Pinus cembroides* Zucc., y *P. pinceana* Gordon & Glend.) y enebros (*Juniperus deppeana* Steud. y *J. flaccida* Schltld.) sobre roca caliza. Aunque en menor escala que en Oaxaca, estas praderas han sido objeto de una notable tala de árboles y de extracción industrial de roca para elaborar cal (C. Martorell, obs. pers.).

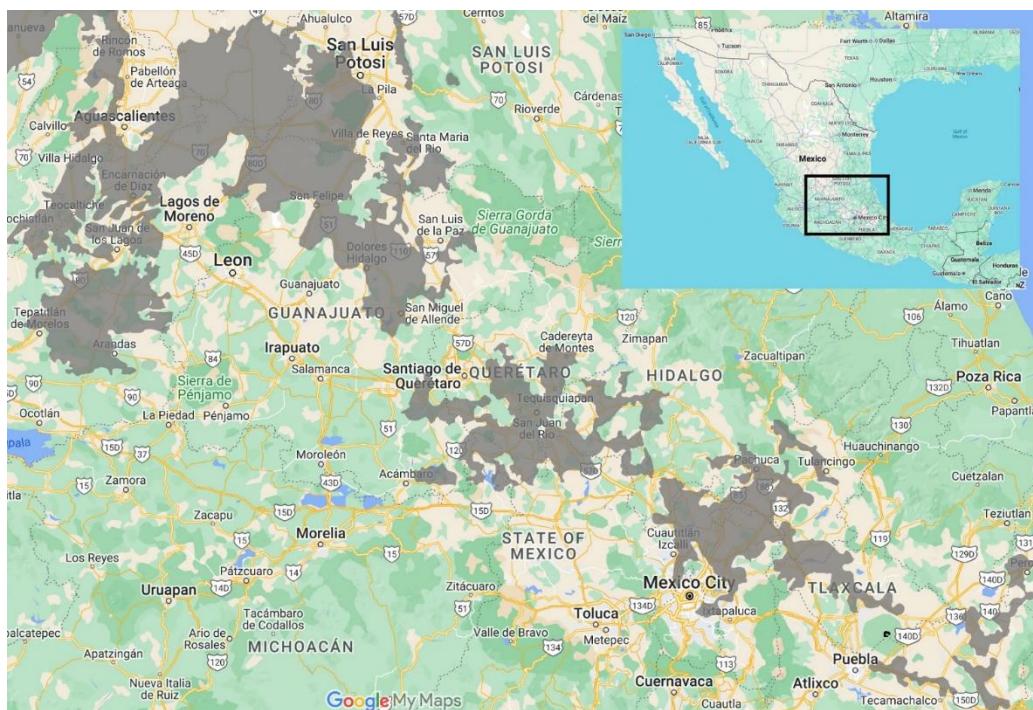


Figure 1. Map of location of the study area. The gray zones show the potential geographic distribution of Temperate Intertropical Prairies. [References: INEGI (2003), scale 1:1 000 000 (potential vegetation), and Google My Maps (topography, towns, and highways)].

Por otro lado, se han publicado diversos estudios florístico-taxonómicos específicamente de licofitas y helechos, los cuales se pueden dividir en dos grupos, el primero donde se abarca todo o una buena parte del territorio mexicano, entre los que se pueden mencionar el de Moran & Riba (1995), el de Mickel & Smith (2004) y el de Villaseñor (2016). El segundo grupo se refiere a estudios a nivel estatal o regional realizados en los estados de Guanajuato, Oaxaca y Querétaro, que son los que se relacionan directamente con este trabajo.

En relación con los trabajos relacionados con Guanajuato y Querétaro, los cuales forman parte de la región del Bajío y regiones adyacentes, destacan el de Díaz-Barriga & Palacios-Ríos (1992) y el de Madrigal-González & Bedolla-García (2021); este último constituye específicamente el tratamiento taxonómico de la familia Selaginellaceae. Otros estudios relacionados con el estado de Guanajuato son el de Zamudio & Galván-Villanueva (2011), donde dan un panorama de la diversidad vegetal, y el de Villaseñor *et al.* (2023), donde exponen la riqueza y endemismo de la flora vascular de dicho estado. Dentro de los estudios relacionados sólo con el estado de Querétaro, son notables el trabajo de Argüelles *et al.* (1991), que es un listado florístico preliminar de la flora vascular y los de Arreguín-Sánchez *et al.* (1996, 2001), en el primero se incluye un listado y en el segundo se ilustra la pteridoflora.

De los estudios relacionados con el estado de Oaxaca, están los regionales y los estatales; dentro de los primeros se pueden mencionar los de García-Mendoza (1983), que trata sobre la ecología y flora de la Sierra de Tamazulapan; el de Reyes-Santiago (1993), acerca de un estudio florístico y fitogeográfico en el Distrito de Juxtlahuaca y el de Riba & Lira (1996), que trata sobre varias familias de pteridofitas en el Valle de Tehuacán-Cuicatlán. Dentro de los segundos, destacan el de Mickel & Beitel (1988), que fue el primer estudio sobre pteridofitas en el estado y los de Tejero-Díez & Mickel (2004, 2011), relacionados con florística y vegetación.

A pesar de lo anterior, los recientes esfuerzos de recolecta en el campo y la revisión de las colecciones botánicas, han permitido el hallazgo de nuevos registros en estas entidades. Dentro de éstos, se tienen dos especies de Selaginellaceae que se consideran nuevos registros, de tal manera que uno de los objetivos del este trabajo es dar a conocer estos resultados a la comunidad científica; otro es discutir la situación taxonómica y la distribución geográfica de *Selaginella ribae* Valdespino, ya que son un poco controvertidas, por lo que se aportan elementos que podrían ayudar a aclarar dicha situación y el otro es resaltar la importancia de estos hallazgos en las Praderas Intertropicales Templadas, los cuales están amenazados por las actividades del hombre.

MATERIALES Y MÉTODO

Se realizaron recolectas botánicas durante los años 2021 y 2022 a los estados de Oaxaca y Querétaro. Dicho material se determinó taxonómicamente y se corroboró con la ayuda de especialistas.

Se revisaron las colecciones de los herbarios ENCB, FCME, IEB, MEXU y UAMIZ para cotejar el material determinado.

Se realizó una revisión minuciosa de la literatura relacionada con el tema.

Se hicieron observaciones de las esporas de *Selaginella lepidophylla* y *S. ribae* con microscopio de transmisión de luz, con el fin de aumentar el grado de confiabilidad de las determinaciones taxonómicas.

También se consultaron las bases de datos Tropicos.org y Gbif.org para cotejar y/o confirmar aspectos relacionados con la distribución geográfica de los taxones en estudio.

Debido a que en años recientes se han hecho varias propuestas sobre la taxonomía del género *Selaginella*, aquí se siguen las propuestas de Schuettpelz *et al.* (2016), Weststrand & Korall (2016a, 2016b) y Valdespino *et al.*, (2024), donde *Selaginella arsenei* y *S. ribae* se ubican en la

Clase Lycopodiopsida, Orden Selaginellales, Familia Selaginellaceae, la cual contiene únicamente al género *Selaginella* s. l. En la discusión se dan las razones sobre esta decisión.

RESULTADOS

Se registra por primera vez en el estado de Oaxaca a *Selaginella arsenei* Weath. y *Selaginella ribae* Valdespino en Querétaro, las cuales, al ser recolectadas en las comunidades conocidas como Praderas Intertropicales Templadas, resaltan la importancia ecológica de éstas, ya que es un sistema que se encuentra amenazado.

Como resultado de la revisión del material depositado en diferentes herbarios, así como la consulta de diferentes bases de datos digitales, se encontraron nuevos ejemplares de dichas especies que amplían su distribución geográfica que había sido anotada anteriormente en la literatura.

Aquí se confirma la presencia de *S. ribae* en el estado de Guanajuato y se discute su validez como entidad taxonómica.

No se encontraron diferencias significativas entre las esporas de *Selaginella ribae* y *S. lepidophylla*.

***Selaginella arsenei*, taxonomía, distribución y ecología**

Selaginella arsenei Weath., J. Arnold Arbor. 25: 417. 1944. *Bryodesma arsenei* (Weath.) Soják, Preslia 64(2): 154. 1992. Tipo: México, Querétaro, G. Arsène 10641 (holotipo: US1000066!; isótipo: GH00022035!).

Selaginella arsenei pertenece al subgénero *Rupestrae* Weststrand & Korall (2016a, 2016b), y anteriormente estuvo ubicada en el subgénero *Tetragonostachys* (Jermy, 1986). Las especies de este grupo monofilético se caracterizan porque tienen rizóforos dorsales, sus licófilas vegetativas están arregladas en espiral alrededor del tallo y ramas, son monomorfas o isófilas; sin embargo, en ocasiones pueden llegar a ser algo dimorfas o anisófilas, coriáceas y linear-lanceoladas, mientras que las esporófilas están arregladas en cuatro hileras y son monomorfas (Weststrand & Korall, 2016a, 2016b). Generalmente se distribuye y se encuentra con mayor frecuencia en lugares con climas secos, es decir, son plantas xéricas. Es endémica de México (Mickel *et al.*, 2004). Cabe señalar que el subgénero *Rupestrae* está compuesto de alrededor de 50 especies, las cuales se distribuyen principalmente en América del Norte (Weststrand & Korall, 2016b).

Selaginella arsenei (Figura 2) se puede confundir morfológicamente con *Selaginella sellowii* Hieron. porque ambas tienen licófilas con la base decurrente (Adame-González *et al.*, 2019), pero se distingue de ésta porque *S. arsenei* tiene tallos hasta 0.4 mm de diámetro (*vs.* de 0.5 a 0.6 mm), el margen de sus licófilas es entero o denticulado (*vs.* ciliado-denticulado), y la arista es hialina y corta, de hasta 0.4 mm de largo (*vs.* blanca, midiendo de 0.5 a 0.8 mm de largo (Mickel *et al.*, 2004).

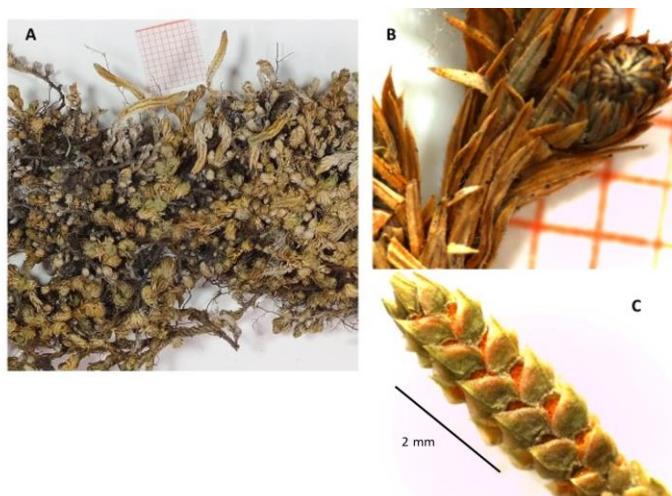


Figura 2. *Selaginella arsenei*. A. Hábito de crecimiento. B. Detalle de las licófilas vegetativas. C. Detalle del estróbilo. (Basado en el ejemplar C. Martorell y Y. Mora No. X928 colectado en Oaxaca).

Figure 2. *Selaginella arsenei*. A. Habit growth. B. Detail of vegetative leaves. C. Detail of the strobilus. (Based on the specimen C. Martorell and Y. Mora No. X928 collected in Oaxaca).

Selaginella arsenei había sido registrada en los estados de Guerrero, Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí (Mickel & Smith, 2004). Además de los estados anteriores, Villaseñor (2016) y Villaseñor *et al.* (2023), mencionan su presencia en Chihuahua, Guanajuato, Sonora y Veracruz, sin citar los ejemplares de referencia; sin embargo, no se encontró evidencia de su presencia en estos últimos estados en ninguno de los herbarios consultados. En la revisión de la base de datos Gbif.org, se encontraron 23 imágenes con el nombre de esta especie; de éstas, las que son de Chihuahua (catálogo: 1478884), Jalisco (catálogo: 100837473), Sinaloa (catálogo: DES00080836) y Sonora (catálogo: ASU0000134), sí corresponden a *S. arsenei*, razón por la cual se incluyen en el mapa correspondiente (Figura 3), ya que esto amplía su área de distribución geográfica. Los ejemplares con número de catálogo DUKE10151698 y MA-01-00233932, del estado de Puebla, están como *S. arsenei*; sin embargo, su determinación es muy dudosa.

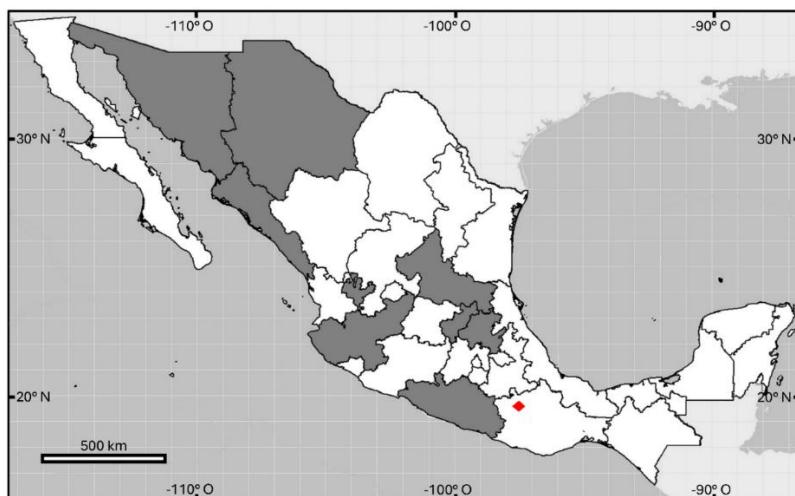


Figura 3. Distribución geográfica de *Selaginella arsenei* en México. Los estados sombreados representan la distribución antes conocida y el rombo rojo representa el nuevo registro en el estado de Oaxaca. Mapa: INEGI (2017).

Figure 3. Geographic distribution of *Selaginella arsenei* in Mexico. Shady states represent the previous known distribution, and the red diamond represent the new record in the state of Oaxaca. Map: INEGI (2017).

Ejemplar examinado: Oaxaca. Distrito Teposcolula, Municipio Villa de Tamazulapan del Progreso. Tamazulapan, Paraje Cerro de la Cal. 17° 41' 10" N, 97° 32' 18" O. Pastizal de *Aristida* sp. Altitud: 2060 m. Fecha de colecta: 24 junio 2022. C. Martorell y Y. Mora X928 (duplicados por distribuirse a ENCB, IEB y MEXU).

El Paraje Cerro de la Cal, lugar donde se encontró a esta especie, pertenece a las PIT oaxaqueñas las cuales se componen principalmente de roca caliza. Desde tiempos precolombinos se cultivaron grandes extensiones de estas praderas, subsistiendo sólo en cerros rocosos no aptos para la agricultura. En tiempo recientes, buena parte de estos remanentes ha sido objeto de la siembra masiva de pinos, en particular *Pinus cembroides*.

***Selaginella ribae*, taxonomía, distribución y ecología**

Selaginella ribae Valdespino, Mem. New York Bot. Gard. 88: 591–592. 2004. *Lepidoselaginella ribae* (Valdespino) Li Bing Zhang & X.M. Zhou, Plant Diversity 45: 656, 2023. Tipo: México, Guerrero, S. Koch et al. 7987 (holotipo: NY; isotipos: CAS, MEXU00290012!, NY00434042!; paratipos: MEXU00454811!, MEXU00539155!).

Selaginella ribae (Figura 4), se ubica en el subgénero *Lepidophyllae*, el cual se caracteriza porque las especies tienen hábito de crecimiento arrosetado, rizóforos dorsales, licófilas vegetativas dimorfas arregladas en 4 hileras, donde las licófilas de las hileras dorsales son más pequeñas o casi iguales que las de las laterales y esporófilas monomorfas formando estróbilos cuadrangulares (Weststrand & Korall, 2016a, 2016b).

Las esporas de esta especie y las de *Selaginella lepidophylla*, son muy similares en tamaños y ornamentación, ya que las microsporas de ambas miden entre 37 y 50 μ de diámetro y tienen superficies reticuladas, mientras que las megasporas miden entre 225 y 290 μ de diámetro y ornamentación reticulada; sin embargo, es pertinente aclarar que sería necesario realizar observaciones con microscopio de barrido para ver si hay diferencias significativas en estas especies.

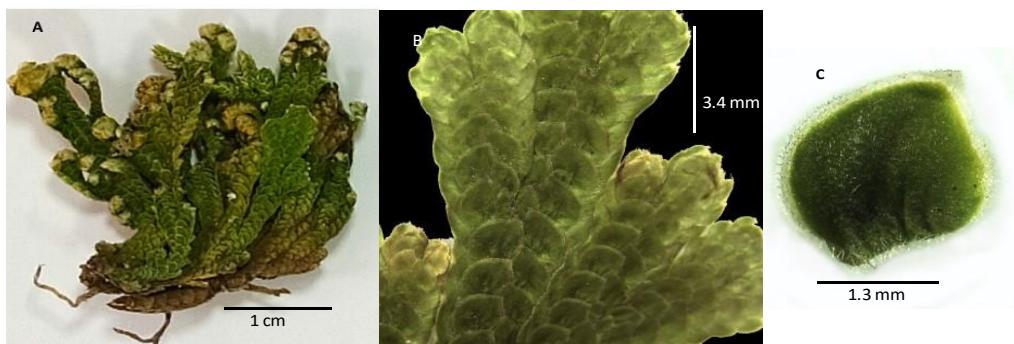


Figura. 4. *Selaginella ribae*. A. Planta juvenil. B. Detalle de las licófilas vegetativas. (Basado en el ejemplar C. Martorell et al. No. Q700 colectado en Querétaro).

Figure 4. *Selaginella ribae*. A. Young plant. B. Detail of vegetative ligophyles. (Based on the specimen C. Martorell et al. No. Q700 collected in Queretaro).

En la propuesta de clasificación subgenérica de Jermy (1986), *S. ribae* estaría ubicada en el subgénero *Stachygynandrum*; en la de Zhou & Zhang (2015) en el subgénero *Ericetorum* sect. *Lepidophyllae* y en la de Zhou & Zhang (2023) en la subfamilia *Gymnogynoideae*, género *Lepidoselaginella*. Cabe mencionar que este último género, derivado del clado del mismo nombre, está fuertemente soportado como el grupo hermano de *Bryodesma* (Zhou & Zhang, 2023).

Selaginella ribae es endémica de México. Mickel et al. (2004) registraron su presencia en Durango, Guerrero y Nuevo León. Además de estos últimos estados, Villaseñor (2016) mencionó su presencia en Tamaulipas, pero ésto no se pudo corroborar en los herbarios consultados; sin embargo, es muy probable su presencia en dicho estado, ya que se encuentra adyacente a Nuevo

León, razón por la cual se anota en el mapa de referencia (Figura 5). De acuerdo con la base de datos Gbif.org, los ejemplares recolectados en el estado de Coahuila, sin duda pertenecen a esta especie, lo cual hace que su área de distribución sea más amplia; dichos ejemplares corresponden a los números de catálogo: 00503210, 00503211 y 00495300. Cabe mencionar que Argüelles *et al.* (1991), en su listado florístico de Querétaro no mencionan a esta especie.

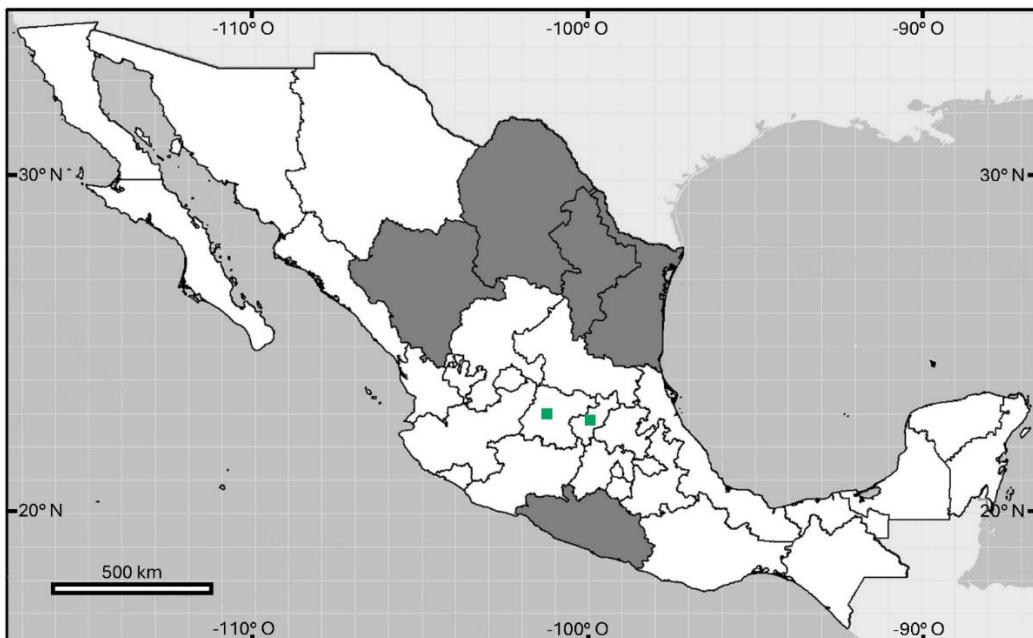


Figura 5. Distribución geográfica de *Selaginella ribae* en México. Los estados sombreados representan la distribución antes conocida; los cuadros verdes representan el nuevo registro en Querétaro y la confirmación de su presencia en Guanajuato. Mapa: INEGI (2017).

Figure 5. Geographic distribution of *Selaginella ribae* in Mexico. Shady states represent the previous known distribution; green squares represent the new record in Queretaro, and the confirmation of its presence in Guanajuato. Map: INEGI (2017).

Ejemplar examinado: Querétaro. Municipio Tolimán. Paraje: San Antonio La Cal, 20° 46' 18" N, 99° 56' 41" O. Pastizal. Altitud: 2120 m. Fecha de colecta: 10 marzo 2022. C. Martorell, A. Balleste y A. Martínez-Blancas No. Q700. (duplicados por distribuirse a ENCB, IEB y MEXU). Las PIT del Paraje San Antonio la Cal, lugar donde se recolectó esta especie, se caracterizan por sus suelos sumamente delgados, la predominancia de pastos amacollados de la especie *Muhlenbergia articulata* y una considerable diversidad de cactáceas, como *Opuntia stenopetala*, *Coryphantha erecta*, *Mammillaria pseudocrucigera*, *Echinocereus pentalophus* y *Turbinicarpus pseudomacrochele*. Hay arbólitos de *Vachellia farnesiana* (Fabaceae) muy dispersos.

DISCUSIÓN

Durante la última década, se han realizado diversos estudios relacionados con la filogenia de la familia Selaginellaceae, considerada monofilética, los cuales han tenido repercusión en su taxonomía y clasificación; uno de estos es el de Zhou & Zhang (2015) donde se propone que el género *Selaginella* este compuesto de los subgéneros *Boreoselaginella*, *Ericetorum*, *Heterostachys*, *Pulviniella*, *Selaginella* y *Stachygynandrum*; otro es el de Zhou *et al.* (2016) donde reconocen los superclados *Ericetorum*, *Heterostachys* y *Stachygynandrum* y 20 clados, sin asignarles un *status taxonómico*. Zhou & Zhang (2023) proponen dividir al género *Selaginella*

en 7 subfamilias y 19 géneros. Wan *et al.* (2023) reconocen 7 subfamilias y 17 géneros, para lo cual proponen que se conserve el género *Selaginella* s. s., con base en el tipo: *S. flabellata* (L.) Spring, en lugar del tipo *S. selaginoides* (L.) P. Beauv. ex Schrank & Mart., usado para *Selaginella* s. l., En contraste a estas últimas propuestas, Weststrand & Korall (2016a, 2016b) proponen que el género *Selaginella* s. l. esté conformado por 7 subgéneros: *Ericetorum*, *Exaltatae*, *Gymnogynum*, *Lepidophyllae*, *Rupestrae*, *Selaginella* y *Stachygynandrum*.

Cabe resaltar que las propuestas de Zhou & Zhang (2023) y Wan *et al.* (2023) fueron refutadas fuertemente por Valdespino *et al.* (2024), ya que tienen una serie de incongruencias que provocan gran inestabilidad nomenclatural; además, sus estudios son poco representativos ya que están basados únicamente en 300 especies, del total de 700 especies Schuettpelz *et al.* (2016) o ca. 800 especies, Zhou & Zhang (2015), reconocidas para *Selaginella* s. l.; además, algunos de los caracteres morfológicos usados, están basados principalmente en las esporas, de tal manera que dichas propuestas no han sido convincentes para una buena parte de los especialistas, por lo que Valdespino *et al.* (2024) proponen que el género *Selaginella* s. l. se conserve, con lo cual los autores de este trabajo están de acuerdo.

Con relación a *Selaginella ribae*, Madrigal-González & Bedolla-García (2021), en el tratamiento taxonómico de la familia Selaginellaceae para la Flora del Bajío y Regiones Adyacentes, mencionan que Iván Valdespino, autor de *Selaginella ribae*, considera que esta especie “probablemente represente una variante de *S. lepidophylla*”; sin embargo, es pertinente señalar que, en el protólogo de *S. ribae* (Mickel *et al.*, 2004), no se menciona nada relacionado con lo anterior, sólo se resalta el hecho de que tanto *S. ribae*, como *S. lepidophylla* y *S. novoleonensis*, son especies que se parecen mucho por su hábito arrosetado y la pubescencia en sus tallos, pero *S. ribae* se distingue de las otras dos porque sus licófilas tienen el ápice de redondeado a anchamente obtuso (vs. ápice agudo o mucronado en *S. lepidophylla*, o aristado en *S. novoleonensis*), caracteres que son suficientes para distinguirlas morfológicamente y, por lo tanto, para reconocer a *S. ribae* como una entidad taxonómica diferente.

(Madrigal-González & Bedolla-García, 2021, pág. 7) también anotan, refiriéndose a *S. ribae*, ...“se recibió la noticia de su presencia en el estado de Guanajuato” sin indicar la fuente de dicha información; sin embargo, Brenda Bedolla-García (com. pers., 1 feb. 2024), mencionó que Daniel Tejero Díez fue quien les proporcionó dicha información. Lo anterior lo confirmó el Dr. Tejero Díez a uno de los autores de este trabajo. Al comprobarse la existencia en MEXU del ejemplar que respalda lo anterior, se confirma que *S. ribae* también se encuentra en el estado de Guanajuato. Cabe mencionar que Zamudio & Galván-Villanueva (2011) y Villaseñor *et al.* (2023), en sus estudios de la Flora de Guanajuato, no mencionan la presencia de esta especie.

Es pertinente aclarar que *S. ribae* no ha sido considerada hasta el momento en ningún estudio molecular, en cambio, tanto *Selaginella lepidophylla* como *S. novoleonensis* sí han sido consideradas y forman el clado *Lepidophyllae* (Weststrand & Korall, 2016b) o el clado *Lepidoselaginella* (Zhou & Zhang, 2023), los cuales están bien soportados, por lo que sería necesario esperar los estudios futuros que confirmen su grado de parentesco entre estas tres especies y que validen o refuten la identidad taxonómica de *S. ribae*.

Las observaciones de las esporas de *Selaginella ribae* y *S. lepidophylla*, realizadas al microscopio de transmisión de luz, permitieron confirmar que no hay diferencias significativas, ni en tamaño ni en ornamentación, que ayuden a distinguir dichos taxones; sin embargo, se sugiere que es necesario realizar un estudio con microscopio de barrido para ver si con dicha técnica se encuentran dichas diferencias.

Otra especie que se parece mucho a las tres especies mencionadas, por su hábito de crecimiento arrosetado, es *Selaginella pilifera* A. Braun [= *Pulviniella* (como *Pulvinæ*) *pilifera* (A. Braun) Li Bing Zhang & X.M. Zhou], pero difiere principalmente porque sus licófilas axilares son lanceoladas u ovado-lanceoladas, (vs. anchamente ovadas u ovado-deltadas) y las licófilas laterales son de forma y tamaño notablemente diferentes que las dorsales (vs. licófilas laterales y dorsales casi iguales en forma y tamaño); además, los estudios moleculares apoyan la ubicación de esta especie en el subgénero *Stachygynandrum* (Weststrand & Korall, 2016b) o en la subfamilia *Pulvinelloideae* (Zhou & Zhang, 2023).

Los resultados de este estudio, junto con el descubrimiento de *Isoetes mexicana* Underw. (Isoetaceae) en el estado de Oaxaca, (Velázquez-Montes, 2022), que significó el primer registro

de dicha familia en la región del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, constituyen un par de ejemplos que ponen de relieve la importancia de los estudios ecológicos y de biodiversidad que se están realizando en las Praderas Intertropicales Templadas presentes en México, con el propósito de que se tomen mejores medidas para su manejo y conservación.

CONCLUSIONES

Se registra por primera vez la presencia de *Selaginella arsenei* en el estado de Oaxaca y también de *Selaginella ribae* en el estado de Querétaro; además, se confirma la presencia de esta última especie en el estado de Guanajuato, ya que anteriormente se había puesto en duda.

Con base en la revisión de las bases de datos digitales, se hace más amplia el área de distribución geográfica de las dos especies estudiadas, ya que se corroboró la presencia de *S. arsenei* en los estados de Chihuahua, Jalisco, Sinaloa, Sonora; y *S. ribae*, en el estado de Coahuila.

Se discute la validez de la identidad taxonómica de *Selaginella ribae* con respecto a *S. lepidophylla* y *S. novoleonensis* y se espera que los futuros estudios moleculares confirmen o refuten dicha identidad.

No se encontraron diferencias significativas entre las esporas de *Selaginella ribae* y *S. lepidophylla* estudiadas con el microscopio de transmisión de luz.

Se hace énfasis en la importancia de los estudios llevados a cabo en las Praderas Intertropicales Templadas, ya que los notables hallazgos botánicos demuestran que dichos ecosistemas albergan una diversidad inesperada; además, esto mismo es justifica que se continúen con los estudios en esas regiones y a la vez son un llamado de atención para que se implementen mejores estrategias de conservación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Christian A. López (TEX-LL) sus valiosos comentarios para mejorar el manuscrito, así mismo por la confirmación de las determinaciones taxonómicas y su ayuda en proporcionar literatura pertinente; a los revisores anónimos, quienes hicieron sugerencias y comentarios que ayudaron a mejorar de manera importante el manuscrito; a Ana Belén Adame González por la confirmación de la determinación de *S. arsenei*; a Diego García-Meza y los alumnos integrantes del proyecto “Diversidad vegetal en los confines sureños de los pastizales norteamericanos” por su apoyo en el trabajo de campo; a Brenda Bedolla García y Daniel Tejero Díez por la información proporcionada sobre *Selaginella ribae*; a Marco A. Romero por su ayuda en la toma y edición de fotografías digitales, en la elaboración de los mapas de distribución geográfica de las especies y en el arreglo de la bibliografía; a los responsables de los herbarios ENCB, IEB, FCME, MEXU y UAMIZ, por permitir la consulta de las respectivas colecciones. El segundo autor agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM, por el apoyo al proyecto PAPIIT IN215422.

LITERATURA CITADA

- Adame-González, A. B., Muñiz-DL, M. E., & Valencia-A., S. (2019). Comparative leaf morphology and anatomy of six *Selaginella* species (Selaginellaceae, subgen. Rupestrae) with notes on xerophytic adaptations. *Flora: Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151482>
- Argüelles, E., Fernández, R., & Zamudio, S. (1991). Listado florístico preliminar del estado de Querétaro. *Flora Del Bajío y Regiones Adyacentes, Fascículo Complementario II*, 1–155. <https://doi.org/10.21829/FB.144.1991.II>

- Arreguín, M. de la Luz., Fernández, R., Palacios-Chávez R., & Quiroz-García, D. L. (2001). *Pteridoflora ilustrada del Estado de Querétaro, México.* (1a ed.). Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas.
- Arreguín-Sánchez, M. L., Fernández-Nava, R., Rodríguez-Jiménez, C., & Rodríguez-Jiménez, A. (1996). Pteridofitas en el estado de Querétaro, México y su ubicación ecológica. *Polibotánica*, 3, 82–92. <https://polibotanica.mx/index.php/polibotanica/article/view/617>
- Jermy, A. C. (1986). Subgeneric Names in *Selaginella*. *British Fern Gazette*, 13(2), 117–118.
- Cruz-Cisneros, R., & Rzedowski, J. (1980). Vegetación de la Cuenca del río Tepelme, Alta Mixteca, estado de Oaxaca (México). *Anales de La Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*, 22(1–4), 19–84.
- Díaz-Barriga, H., & Palacios-Ríos, M. (1992). Lista preliminar de especies de Pteridofitas de los estados de Guanajuato, Michoacán y Querétaro (México). *Flora Del Bajío y Regiones Adyacentes*. <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/fb.145.1992.III>
- García-Mendoza, A. J. (1983). *Estudio ecológico-florístico de una porción de la Sierra de Tamazulapan, Distrito de Teposcolula, Oaxaca, México* [Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM]. https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/9FBIRP8GPMCD7EYV4YM6XR7YMJBFD137TJYTMDGQCR8GPRYK5A-31741?func=full-set-set&set_number=097061&set_entry=000077&format=999
- INEGI. (2003). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación, Serie II. Continuo Nacional. Escala 1:1,000,000. In *Cartas de Uso del Suelo y Vegetación*. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267865>
- INEGI. (2017). *Mapa Digital de México para escritorio* (6.3.0). Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Madrigal-González, D., & Bedolla-García, B. Y. (2021). Familia Selaginellaceae. *Flora Del Bajío y de Regiones Adyacentes*, Fascículo 220, 1–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/fb.495.2021.220>
- Martorell, C., Zepeda, V., Martínez-Blancas, A., García-Meza, D., & Pedraza, F. (2017). A diversity world record in a grassland at Oaxaca, Mexico. *Botanical Sciences*, 95(1). <https://doi.org/10.17129/botscli.689>
- Martorell-Delgado, C., García-Meza, D., Martínez-Blancas, A., Zepeda-Martínez, V. N., & Vázquez-Ribera, C. (2022). Pastizales de la región Chocholteca: un despreciado récord mundial de diversidad vegetal. In CONABIO (Ed.), *La biodiversidad en Oaxaca* (1a ed., Vol. 1, pp. 290–301). CONABIO.
- Mickel, J. T., & Smith, A. R. (2004). *The pteridophytes of Mexico*. 1054. <https://www.nhbs.com/pteridophyte-flora-of-oaxaca-mexico-book>
- Mickel, J. T., & Beitel, J. M. (1988). *Pteridophyte Flora of Oaxaca, Mexico* (1a ed.). NHBS Academic & Professional Books. <https://www.nhbs.com/pteridophyte-flora-of-oaxaca-mexico-book>
- Mickel, J. T., Smith, A. R., & Valdespino, I. (2004). *Selaginella*. In J. T. Mickel & A. R. Smith (Eds.), *The Pteridophytes of Mexico* (1a ed., Vol. 88, pp. 550–602). Memoirs of the New York Botanical Garden.
- Mickel, J. T., & Smith, A. R. (2004). *The pteridophytes of Mexico* (J. T. Mickel & A. R. Smith, Eds.; 1a ed.). New York Botanical Garden.
- Moran, R. C., & Riba, R. (1995). Psilotaceae a Salviniaceae. In G. Davidse, M. Sousa-S., & S. Knapp (Eds.), *Flora Mesoamericana* (1a ed., Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México, Missouri Botanical Garden Press, y the Natural History Museum (London).
- Ramos de Cárdenas, F. (1582). La relación geográfica de Querétaro de 1582. In J. R. Jiménez Gómez & D. C. Wright Carr (Eds.), *Apéndice, Expediente sobre los límites de las audiencias de Nueva España y Nueva Galicia, y sobre que las minas de Guanajuato y Comanja estén sujetas a lo de Nueva España, como antes estuvieron, 1573* (1a ed.). Instituto de Estudios Constitucionales: Fondo Editorial de Querétaro.
- Reyes-Santiago, P. J. (1993). *Estudio florístico y fitogeográfico en el municipio de San Juan Mixtepec, Distrito de Juxtlahuaca, Oaxaca* [ENEP-Iztacala, UNAM]. <https://tesiunam.dgb.unam.mx/F/KVY7EABENKR2KBIASGXBEU1SGCHMEX7VBQ8>

- SYERRRBSK8R8XEY-09770?func=full-set-set&set_number=097132&set_entry=000134&format=999
- Riba, R., & Lira, R. (1996). Pteridophyta sensu R. Sadebeck: Familias Equisetaceae DC., Lycopodiaceae Mirb. & Selaginellaceae Milde. In *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán: Vol. Fascículo 10* (pp. 1–21). Instituto de Biología, UNAM. <https://www.tropicos.org/reference/1014775>
- Schuettpelz, E., Schneider, H., Smith, A. R., Hovenkamp, P., Prado, J., Rouhan, G., Salino, A., Sundue, M., Almeida, T. E., Parris, B., Sessa, E. B., Field, A. R., de Gasper, A. L., Rothfels, C. J., Windham, M. D., Lehnert, M., Dauphin, B., Ebihara, A., Lehtonen, S., ... Zhou, X. M. (2016). A community-derived classification for extant lycophytes and ferns. *Journal of Systematics and Evolution*, 54(6). <https://doi.org/10.1111/jse.12229>
- Tejero-Díez, J. D., & Mickel, J. T. (2004). Pteridofitas. In A. J. García-Mendoza, M. de J. Ordóñez-Díaz, & M. Briones-Salas (Eds.), *Biodiversidad de Oaxaca* (1a ed., pp. 121–139). Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, World Wild Fund.
- Tejero-Díez, J. D., & Mickel, J. T. (2011). Lycopodiophyta y Polypodiophyta. In A. J. García-Mendoza & J. A. Meave (Eds.), *Diversidad Florística de Oaxaca: de Musgos a Angiospermas (Colecciones y Lista de Especies)* (1a ed., pp. 146–164). Instituto de Biología, UNAM y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Valdespino, I. A., Korall, P., Weststrand, S., López, C. A., Tang, J. Y., Shalimov, A., & Zhang, X. C. (2024). Rebuttal to “(2943) Proposal to conserve *Selaginella*, nom. cons., (Selaginellaceae) with a conserved type”: An unwarranted and disruptive idea. *TAXON*, 73(2), 573–585. <https://doi.org/10.1002/TAX.13145>
- Velázquez-Montes, E. (2022). Isoetaceae. In R. Medina-Lemos (Ed.), *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán* (1st ed., Vol. 2022, pp. 1–8). Instituto de Biología, UNAM. https://www.ib.unam.mx/scripts/download_files.php?crypt=dFITdy9ySDFBRzcrcXBYd0tCNmd3WVBtaDAwWS9xVDNmNXVPK0tiYzIVUlgzTDlnVmFKSDIXR25OQS9QazlMSDdnEk4L0F4VnNuRExKcmJ6NGh5MHNmSmd4T3IIMC9hbkkvN3NvR2JLN1k9
- Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3). <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>
- Villaseñor, J. L., Ortiz, E., Ramírez-Barrios, R., & Murguía-Romero, M. (2023). Riqueza y endemismo de la flora vascular de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 94, e945282–e945282. <https://doi.org/10.22201/IB.20078706E.2023.94.5282>
- Wan, X., Zhou, X. M., Zhang, L., He, Z. R., & Zhang, L. B. (2023). (2943) Proposal to conserve *Selaginella*, nom. cons., (Selaginellaceae) with a conserved type. *TAXON*, 72(2), 429–430. <https://doi.org/10.1002/TAX.12918>
- Weststrand, S., & Korall, P. (2016a). A subgeneric classification of *Selaginella* (Selaginellaceae). *American Journal of Botany*, 103(12). <https://doi.org/10.3732/ajb.1600288>
- Weststrand, S., & Korall, P. (2016b). Phylogeny of Selaginellaceae: There is value in morphology after all! *American Journal of Botany*, 103(12). <https://doi.org/10.3732/ajb.1600156>
- Zamudio, S., & Galván-Villanueva, R. (2011). Fascículo complementario XXVII: La diversidad vegetal del estado de Guanajuato, México. *Flora Del Bajío y de Regiones Adyacentes, Fascículo Complementario* 27, 1–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.21829/fb.142.2011.XXVII>
- Zamudio, S., Rzedowski, J., Carranza-G., E., & Calderón de Rzedowski, G. (1992). *La vegetación en el estado de Querétaro: panorama preliminar* (1a ed.). Instituto de Ecología, Centro Regional del Bajío. https://www.researchgate.net/profile/Sergio-Zamudio/publication/259800980_La_vegetacion_del_estado_de_Queretaro_Panorama_preliminar/links/0f31752ded39c723c6000000/
- Zhou, X. M., Rothfels, C. J., Zhang, L., He, Z. R., Le Péchon, T., He, H., Lu, N. T., Knapp, R., Lorence, D., He, X. J., Gao, X. F., & Zhang, L. B. (2016). A large-scale phylogeny of the lycophyte genus *Selaginella* (Selaginellaceae: Lycopodiopsida) based on plastid and nuclear loci. *Cladistics*, 32(4). <https://doi.org/10.1111/cla.12136>

Recibido:
11/junio/2024

Aceptado:
20/noviembre/2024

- Zhou, X. M., & Zhang, L. B. (2015). A classification of *Selaginella* (Selaginellaceae) based on molecular (chloroplast and nuclear), macromorphological, and spore features. *Taxon*, 64(6). <https://doi.org/10.12705/646.2>
- Zhou, X. M., & Zhang, L. B. (2023). Phylogeny, character evolution, and classification of Selaginellaceae (lycophytes). *Plant Diversity*, 45(6). <https://doi.org/10.1016/j.pld.2023.07.003>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

CONTRIBUCIÓN A LA TAXONOMÍA DE ESPECIES MEXICANAS DE *Colubrina* (Rhamnaceae) BASADAS EN LA ARQUITECTURA FOLIAR Y LAS SUPERFICIES EPIDÉRMICAS DE LAS HOJAS

CONTRIBUTION TO THE TAXONOMY OF MEXICAN SPECIES OF *Colubrina* (Rhamnaceae) BASED ON LEAF ARCHITECTURE AND EPIDERMAL SURFACES

Jorge Cruz, C.Y., R. Fernández Nava y M.L. Arreguín Sánchez

CONTRIBUCIÓN A LA TAXONOMÍA DE ESPECIES MEXICANAS DE *Colubrina* (Rhamnaceae) BASADAS EN LA ARQUITECTURA FOLIAR Y LAS SUPERFICIES EPIDÉRMICAS DE LAS HOJAS

CONTRIBUTION TO THE TAXONOMY OF MEXICAN SPECIES OF *Colubrina* (Rhamnaceae) BASED ON LEAF ARCHITECTURE AND EPIDERMAL SURFACES



Contribución a la taxonomía de especies mexicanas de *Colubrina* (Rhamnaceae) basadas en la arquitectura foliar y las superficies epidérmicas de las hojas

Contribution to the taxonomy of mexican species of *Colubrina* (Rhamnaceae) based on leaf architecture and epidermal surfaces

Coral Yamileth Jorge Cruz,
Rafael Fernández Nava,
María de la Luz Arreguín Sánchez

CONTRIBUCIÓN A LA TAXONOMÍA DE ESPECIES MEXICANAS DE *Colubrina* (Rhamnaceae) BASADAS EN LA ARQUITECTURA FOLIAR Y LAS SUPERFICIES EPIDÉRMICAS DE LAS HOJAS

CONTRIBUTION TO THE TAXONOMY OF MEXICAN SPECIES OF *Colubrina* (Rhamnaceae) BASED ON LEAF ARCHITECTURE AND EPIDERMAL SURFACES

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 15-41. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.2

Coral Yamileth Jorge-Cruz

Rafael Fernández-Nava¹ <https://orcid.org/0000-0001-5636-7109>

María de la Luz Arreguín-Sánchez¹

Autora de correspondencia: luzma1950ipn@gmail.com

Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Departamento de Botánica, Instituto Politécnico Nacional, Plan de Ayala y Prolongación Carpio, Col. Santo Tomás, Ciudad de México 11340. ¹ Becarios de COFAA del IPN.

RESUMEN: Se describió la arquitectura foliar y las superficies epidérmicas de la lámina foliar de nueve especies de *Colubrina* distribuidas de forma natural en México, las cuales pertenecen a dos subgéneros y tres secciones: subgénero *Colubrina* se incluyen las especies *C. arborescens* (Sección *Colubrina*); *C. elliptica*, *C. heteroneura*, *C. johnstonii* y *C. viridis* (Sección Cowania); así como *C. ehrenbergii* y *C. triflora* (Sección Barcena). Por otro lado, el Subgénero Serrataria, comprende a *C. californica* y *C. celtidifolia*. La diferenciación de los taxones se realizó considerando diversos caracteres, como los tipos de venación, la ramificación o no del primer par de venas secundarias inferiores, número de venas secundarias en la superficie foliar, ausencia o presencia de tricomas, tipos de los mismos, con base radial de células epidérmicas modificada o sin ellas, presencia o ausencia de glándulas en la lámina foliar, contorno de las paredes de las células epidérmicas (rectas u onduladas), ausencia o existencia de venas libres en las venas de tercera y cuarta categoría, así como los tipos de estomas.

Se incluyó una clave dicotómica y un análisis de agrupamiento utilizando el método UPGMA, índice de similitud de Jaccard, junto con su respectivo dendrograma, con el cual se identificaron tres grupos principales: el primero con las especies de las secciones Cowania y Barcena; el segundo concentra a *C. arborescens* de la sección *Colubrina* junto con las nueve especies del Subgénero Serrataria y el tercero separa a las especies del subgénero Serrataria en dos subgrupos según el patrón de venación. La presencia de *C. arborescens* en el segundo grupo se atribuyó a las diferencias observadas en los especímenes del sur de México, en comparación con los taxones del Caribe, lo que indica que los ejemplares de la República Mexicana son un taxón diferente. Las especies del subgénero Serrataria no presentan glándulas en los dientes, lo cual es un carácter fundamental mencionado en la literatura y las protuberancias de los dientes se deben a la penetración de una vena secundaria o terciaria dentro de los mismos. Esto sugiere la necesidad de una redescripción o reubicación de este subgénero.

Palabras clave: Subgénero Serrataria, Subgénero *Colubrina*, tipos de venación, tricomas, glándulas.

ABSTRACT: The leaf architecture and epidermal surfaces of the leaf blade of nine species of *Colubrina* species naturally distributed in Mexico were described. They belong to two subgenera and three sections: the subgenus *Colubrina* includes the species *C. arborescens* (Section *Colubrina*); *C. elliptica*, *C. heteroneura*, *C. johnstonii* and *C. viridis* (Section Cowania); as well as *C. ehrenbergii* and *C. triflora* (Section Barcena). On the other hand, the subgenus Serrataria includes *C. californica* and *C. celtidifolia*. The taxa were separated by characters such as venation types, branching or not of the first pair of lower secondary veins, number of secondary veins on the leaf surface, absent

or present trichomes, with modified epidermal cell radial base or without radial base of epidermal cells, presence or absence of glands in the leaf blade, contour of the epidermal cell walls (straight or wavy), presence or absence of free veins in the third and fourth category veins, as well as the types of stomata.

A dichotomous key and a clustering analysis using the UPGMA method, Jaccard's similarity index, together with its respective dendrogram, were included, with which three main groups were identified: the first with the species of Cowania and Barcena sections; the second groups with *C. arborescens* of the Colubrina section together with the nine species of the Serrataria subgenus; and the third separates the species of the subgenus Serrataria into two subgroups according to the venation pattern. The presence of *C. arborescens* in the second group was attributed to the differences observed in the specimens from southern Mexico, compared to the Caribbean taxa, indicating that the specimens from the Mexican Republic are a different taxon or belong to another section of the subgenus Colubrina. The species of the subgenus Serrataria do not have glands on the teeth, which is a fundamental character mentioned in the literature and the protuberances of the teeth are due to the penetration of a secondary or tertiary vein inside them. This suggests the need for a redescription or relocation of this subgenus.

Key words: Subgenus Serrataria, Subgenus Colubrina, venation types, trichomes, glands.

INTRODUCCIÓN

El género *Colubrina* Rich. ex Brong, perteneciente a la familia Rhamnaceae Juss., comprende aproximadamente 30 especies distribuidas en diversas regiones tropicales y subtropicales, con una notable presencia en México donde se concentra el 70% de los taxones conocidos. La distribución abarca también otras áreas de América, Asia y Australia, manifestando una adaptabilidad ecológica que le permite colonizar desde matorrales xerófilos hasta bosques de pino y encinos (Fernández-Nava, 1993 p.90). La variabilidad morfológica y ecológica del género son retos para entender la taxonomía y evolución del mismo, especialmente en el contexto donde la delimitación de especies y subgéneros sigue siendo un desafío. La familia Rhamnaceae ha sido estudiada desde el punto de vista taxonómico-florístico como lo muestran las investigaciones de Standley (1923); Johnston., (1963, 1969 y 1971); Wiggins (1964, 1980); Martínez, (1979), (Fernández_Nava (1993, 1996, 2010), (Pool (2015) y (Nesom, 2013, 2023a, 2023b).

En el ámbito de la anatomía y arquitectura foliar de la familia, destacan los trabajos de Meyer y Meola (1978); Schirarend (1991); Colares y Arambarri (2008); Shisode y Patil (2011); y Hernández-Peñaiza *et al.* (2021), quienes han aportado información valiosa para la comprensión de la variabilidad estructural de varios géneros de Rhamnaceae. Así también, Fernández-Nava, *et al.* (2024) caracterizaron algunas especies de *Colubrina* sección Serrataria a través de la arquitectura foliar y superficies epidérmicas como apoyo a la taxonomía del grupo. En cuanto a la parte etnobotánica de *Colubrina* se destacan en Fernandez-Nava (2010).

En la historia de la taxonomía de *Colubrina*, los géneros afines son *Cormonema* Reissek ex Endlicher e *Hybosperma* Urb., que han sido objeto de debate y finalmente Johnston (1971, p. 7), los incorporó al género *Colubrina*, este mismo autor realizó el estudio monográfico que identificó dos subgéneros: *Colubrina*, que incluyó las secciones *Barcena*, *Cowanía*, *Colubrina* y *Capuronía* (esta última no presente en México) y *Serrataria* que no se subdivide en secciones.

Esta clasificación, aunque ampliamente aceptada, en los últimos años sugiere la necesidad de reevaluar los caracteres utilizados para distinguir los taxones dentro del género (Fernández-Nava *et al.*, 2024). En este contexto, la presente investigación se enfocó en la arquitectura foliar y las superficies epidérmicas de las láminas foliares como herramientas para la diferenciación taxonómica de *Colubrina*. El estudio se realizó en nueve especies mexicanas, cuyas características morfológicas fueron comparadas con los otros siete taxones previamente analizados por Fernández-Nava *et al.* (2024). El propósito de este trabajo fue identificar caracteres distintivos que permitan una mejor delimitación de los taxones y evaluar la validez de la circunscripción actual de los subgéneros y secciones propuestos por Johnston (1971).

MATERIALES Y MÉTODO

El material vegetal utilizado para el estudio se encuentra depositado en los Herbarios de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional (ENCB) y además se examinaron especímenes del Herbario del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (MEXU). La identificación de los taxones fue confirmada por el Dr. Rafael Fernández Nava, especialista en Rhamnaceae. Las muestras de las exsicatas estudiadas fueron:

- 1.- *C. arborescens* (Mill.) Sarg., C. Chan 6061 (ENCB); O. Téllez 1230 (ENCB); E. Ventura y E López 1654 (ENCB).
- 2.- *C. californica* (Miller) Sarg., A. Carter, 4903 (MEXU).
- 3.- *C. celtidifolia* Cham. & Schlecht., A. Goméz-Pompa 743 (MEXU); J. C. Soto Núñez 9371 (MEXU).
- 4.- *C. ehrenbergii* Schlechth., S. Zamudio 2382 (ENCB); L. González-Quintero 3578 (ENCB); J. Rzewdoski 5379 (ENCB).
5. - *C. elliptica* (Swartz) Brizicky & Stern. L. González 2556 (ENCB); D. E. Beedlove 1404 (ENCB); H. Puig 2917(ENCB).
6. - *C. heteroneura* (Griseb.) Standley, W. R. Anderson 12712 (ENCB); C. Davidson 7650 (ENCB); F. Ventura A. 15684 (ENCB).
7. - *C. johnstonii* Wendt, C. Chan, 6061. (ENCB); O. Téllez, 1230 (ENCB); T. Wendt, 2535. (ENCB).
- 8.- *C. triflora* Brongn., V.W. Steiiman 1877 (ENCB); S. Zamudio y E. Pérez 7558 (ENCB).
- 9.- *C. viridis* (M. E. Jones) M. C. Johnston, J. M. Alcocer s.n. (ENCB); Pinkava et al. 21674 (ENCB); C. L. Díaz 2251 (ENCB).

De cada espécimen se tomaron cuatro hojas plenamente desarrolladas ubicadas entre el tercero y quinto nudo de las ramas montadas en las muestras de herbario y de preferencia, de tres ejemplares de cada especie. En algunos de estos taxones las hojas se encuentran pegadas a las cartulinas y no fue posible extraer muestras o bien, ciertas especies están poco representadas en los herbarios y su distribución es muy específica, lo que explica la poca representación en las colecciones como *C. californica* y *C. stricta* de las que se tomaron una muestra y con *C. celtidifolia*, fueron dos especímenes. Una vez que se obtuvieron las muestras para la observación de la arquitectura y anatomía foliar de las especies mexicanas de *Colubrina* se utilizaron dos técnicas para transparentar las láminas foliares, la de Aguirre-Claverán y Arreguín-Sánchez (1988, p. 11) y la de Sheffy y Potter (1969) tomada de Dilcher (1974, p.60), las cuales se describen con detalle en Fernández-Nava et al. (2024).

En el caso de *Colubrina arborescens* que presentaron glóbulos en la superficie foliar que se apreciaron en el material diafanizado aun sin teñir en el microscopio óptico, en estas preparaciones se colocaron dos gotas de Sudán IV y se dejó actuar por 15 minutos, los glóbulos se colorearon debido a que este reactivo se caracteriza por teñir en tonalidades de rojo los lípidos. La densidad de los tricomas en todos los taxones se consideró contando el número de los mismos en un 1 mm² y la densidad estomática se calculó según (Colares y Arambarri, 2008, p. 570). La modificación de la base de los tricomas se explica e ilustra en (Fernández-Nava, 2024 p. 7). En las medidas del largo de los pelos no se incluyen las células epidérmicas modificadas en caso de presentarse.

Para las descripciones de la arquitectura foliar y de las superficies epidérmicas de la lámina se tomaron en consideración los trabajos de Hickey (1973, 1974), Dilcher (1974), (Hickey y Wolfe (1975) y Ash et al. (1999). Para la epidermis foliar se consideraron los criterios de Gola, Negri, y Cappelletti (1965); Dilcher (1974); Cortés (1982) y Azcárraga et al. (2010). Los caracteres que se tomaron en consideración se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracteres exomorfológicos de arquitectura foliar y de la epidermis foliar.**Table 1.** Exomorphological characteristics of leaf architecture and leaf epidermis.

| Carácter | Descripción |
|--|--|
| Carácteres morfológicos y de arquitectura foliar | Tipos de hojas: simples o compuestas |
| | Simetría |
| | Forma de la lámina foliar |
| | Medidas de largo y ancho de la lámina foliar. |
| | Ápice |
| | Base |
| | Textura |
| | Margen |
| | Presencia o ausencia de glándulas |
| | Largo del pecíolo |
| Carácteres de Epidermis Foliar | Tipo de arquitectura foliar |
| | Venas de primera, segunda, tercera y cuarta categoría. |
| | Tipos de tricomas: glandulares, eglandulares |
| | Largo de los tricomas |
| | Base de tricomas: con o sin base radial de células epidérmicas |
| | Densidad de los tricomas por mm ² |
| | Forma de células epidérmicas (superficie adaxial y abaxial) |
| Carácteres de Epidermis Foliar | Tipos de paredes (contorno): rectas, onduladas |
| | Tipos de estomas. |
| | Tamaño de los estomas longitud y ancho |
| | Densidad estomática |

Para estas descripciones se tomaron como base los trabajos de Dilcher (1974); Ash et al. (1999); Johnston (1971); Wendt (1983); Fernández-Nava (1993). El dato de la textura de la lámina foliar se tomó de las descripciones de las especies y en algunas etiquetas de herbario se cita esta información, además, al realizar la diafanización de las láminas foliares de consistencia membranácea tardan menor tiempo en transparentarse con el hipoclorito de sodio al 30%, en algunas solo basta incluirlas en el reactivo para que se aclaren en seguida. Las hojas coriáceas o subcoriáceas tardan algunos minutos en transparentarse, así que el tiempo es variable y la técnica indica que una vez que se aclaren las láminas foliares, hay que sacarlas y colocarlas en agua sin especificar un tiempo determinado. Para las observaciones de la arquitectura foliar se examinaron bajo el microscopio estereoscópico American Optical y las superficies epidérmicas en el microscopio óptico binocular Zeiss. La toma de fotomicrografías se llevó a cabo con una cámara digital Samsung Hmx-e10 con 8 megapixeles.

Se elaboró una base de datos en Excel para obtener la matriz de los caracteres de las especies para realizar el análisis de agrupamiento por el método UPGMA, utilizando el índice de similitud de Jaccard a través del programa estadístico Past 4.3 (Hammer et al., 2001) y el posterior dendograma. Se colocaron en las filas las especies y en las columnas los caracteres.

RESULTADOS

Se describió la arquitectura foliar y las superficies epidérmicas de nueve especies de *Colubrina* que se organizaron en orden alfabético de las especies.

1.- *Colubrina arborescens* (Mill.) Sarg. (Lámina 1).

Hojas simples, simétricas, ovado-oblongas a oblango-ovado u oblango de 4 a 15 cm de largo a 2 a 9 cm de ancho, ápice agudo a corto acuminado, base acuminada a redondeada o cordiforme, lámina membranácea a subcoriácea, margen entero (Fig. 1A, 1B), glándulas circulares u ovadas, oscuras distribuidas en la superficie abaxial (Figs. 1E, 1F). Pecíolo de 5 a 30 mm de largo y 1 a 2 mm de diámetro (Fig. 1A). Vena primaria pinnada de curso recto (Figs. 1A, 1B) las de segunda

categoría craspedódromas con 3 a 4 venas libres de cada lado y con el par de venas inferiores no ramificadas (Figs. 1A, 1B), las terciarias opuestas percurrentes (Fig. 1C) y las de cuarta categoría reticuladas sin venas libres incluidas (Figs. 1C, 1D).

Epidermis en vista superficial. Células epidérmicas adaxiales y abaxiales isodiamétricas de forma pentagonal con paredes de contorno recto (1H, 1I), con glóbulos de lípidos que se detectaron con sudán IV que es un colorante que pone de manifiesto la presencia de grasas (Fig. 1H). Estomas anomocíticos, en la superficie de la epidermis adaxial de 29 a 24 μm de largo y ancho respectivamente, densidad estomática de 26 estomas/ mm^2 en promedio, los estomas en la superficie abaxial de 26.1 a 17.3 μm de largo y ancho, densidad estomática en promedio de 26 estomas/ mm^2 (Fig. 1I). Tricomas unicelulares eglandulares, en promedio de 25.3 μm de largo, base radial de células epidérmicas modificadas (Fig. 1G) distribuidos en toda la superficie, aunque predominan en la vena central, la densidad promedio fue de 21 tricomas/ mm^2

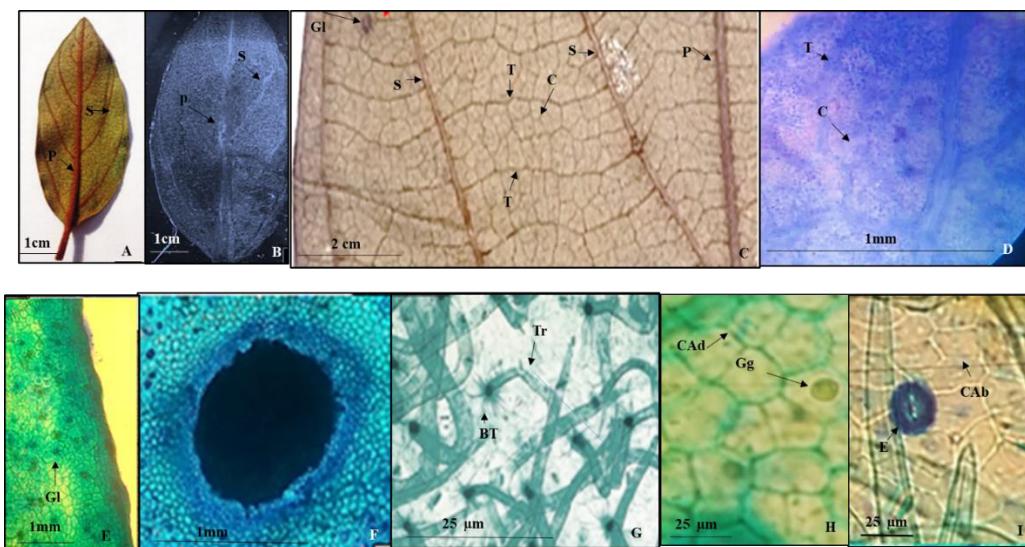


Lámina 1. *Colubrina arborescens*. A.- Lámina foliar del herbario. B.- Lámina foliar diafanizada con vena de primera y las de segunda categoría. C.- Vena de primera, segunda, tercera y cuarta categoría. D.- Detalle de venas reticuladas de tercera y cuarta jerarquía. E.- Glándulas en la superficie abaxial de la lámina foliar. F.- Detalle de una glándula. G.- Tricomas con base radial de células epidérmicas modificadas. H.- Células de la superficie adaxial isodiamétricas con paredes rectas con gotas de lípidos comprobado con Sudan IV (Gg). I.- Células epidérmicas de la superficie abaxial isodiamétricas con paredes rectas y estomas anomocíticos. Referencias: P vena de primera categoría. S venas de segunda categoría. T venas de tercera categoría. C venas de cuarta categoría. Tr tricoma. BT base del tricoma. Gl glándula. Gg glóbulo de grasa. CAd células epidérmicas de la superficie adaxial. CAB células epidérmicas de la superficie abaxial. E estoma

Plate 1. *Colubrina arborescens*. A. Leaf lamina taken from herbarium specimens. B. Diaphanized leaf lamina showing first-order and second-order veins. C. - First, second, third and fourth category vein. D. Detail of reticulated third-order and fourth-order veins. E. Glands on the surface of the leaf lamina. F. Detail of a gland abaxial. G. Trichomes trichomes with radial base of modified epidermal cells. H. Adaxial surface cells with straight isodiametric walls and lipid droplets confirmed with Sudan IV (Gg). I. Epidermal cells of the abaxial surface with straight isodiametric walls and anomocytic stomata. References: P first-order veins. S second-order veins. T third-order veins. C fourth-order veins. Tr trichome. BT trichome base. Gl gland. Gg: lipid globule. CAd adaxial surface cells. CAB abaxial surface cells. E stoma.

2.- *Colubrina californica* I. M. Johnston (Lámina 2).

Hojas simples, simétricas, oblongas a obovadas a veces ovado-oblongas, de 1.2 a 3 cm de largo y 0.5 a 1.5 cm de ancho, ápice redondeado a emarginado, base redondeada a anchamente cuneada, con textura membranácea a subcoriácea, margen entero o con 2 a 6 pequeños dientes a cada lado distribuidos de la mitad de la lámina foliar hacia el ápice, sin glándulas en la lámina foliar (Figs. 2A, 2B). Pecíolo de 1 a 5 mm de largo y 1 a 2 mm de diámetro (Fig. 2A). Vena de primera categoría pinnada de curso recto, las de segunda categoría, broquidódroma formando 3 a 4 arcos en ambos lados de la superficie foliar, que no llegan al margen de la hoja (Figs. 2B, 2C), el par basal se ramifica (Fig. 2B) y el par de venas superiores apicales se enrollan formando dos arcos (Fig. 2B, 2D), las de tercera jeganquía alternas percurrentes (Fig. 2E), las de cuarta reticuladas, sin venas libres incluidas (Fig. 2E).

Epidermis en vista superficial. Células epidérmicas de la superficie adaxial y abaxial isodiamétricas, de forma pentagonal con paredes de contorno recto (Fig. 2F, 2G). Estomas anomocíticos, en la superficie de la epidermis adaxial de $28.4 \times 21.1 \mu\text{m}$ de largo y ancho, con densidad estomática de 15 estomas/ mm^2 y en la abaxial de $28.4 \times 21.1 \mu\text{m}$, con densidad estomática de 25 estomas/ mm^2 (Fig. 2I). Tricomas adaxiales unicelulares eglandulares, con base radial de células epidérmicas modificadas, en promedio de $29.8 \mu\text{m}$ de largo, densidad promedio de 129 tricomas/ mm^2 , los abaxiales densos de $32 \mu\text{m}$ de largo con 314 tricomas/ mm^2 , (Figs. 2F, 2H).

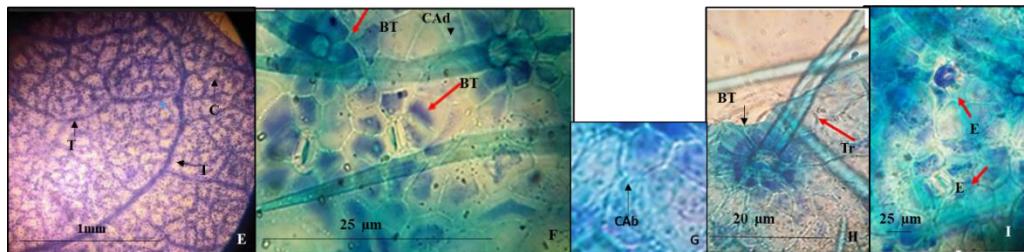
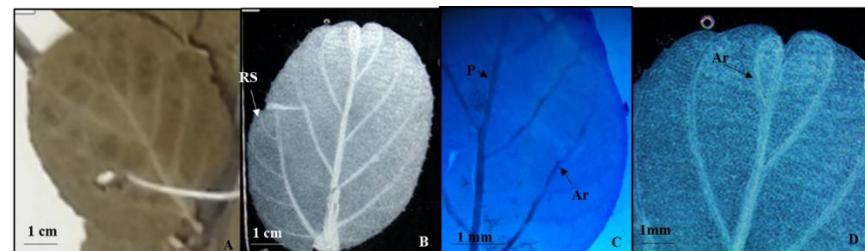


Lámina 2. *Colubrina californica*. A.- Lámina foliar del ejemplar de herbario. B.- Lámina foliar diafanizada mostrando las vena de primera categoría pinnada y el par inferior de venas secundarias con ramificaciones libres. C.- Arco de venas secundarias. D.- Arcos apicales. E.- Venas de tercera categoría opuestas percurrentes, las de cuarta categoría reticuladas sin venas libres incluidas. F.- Tricomas con base radial de células epidérmicas modificadas y células de la superficie adaxial. G.- Detalle de las células epidérmicas abaxiales (CAB). H.- Base de un tricoma con células epidérmicas modificadas. I.- Estomas anomocíticos. Referencias: P vena de primera categoría. S vena de segunda categoría. T vena de tercera categoría. C vena de cuarta categoría. Arcos (Ar). RS ramificación de venas de segunda categoría. Tr tricoma. BT base del tricoma. CAd células de la superficie adaxial. CAB células de la superficie abaxial. E estoma.

Plate 2. *Colubrina californica*. A. - Leaf blade from the herbarium specimen. B. - Cleared leaf blade showing the pinnate first category veins and the lower pair of secondary veins with free branching. C. - Arch of secondary veins. D. - Apical arches. E. - Opposite percurrent third-category veins, those of the fourth category reticulated without free veins included. F. - Trichomes radial base of modified epidermal cells and cells of the adaxial surface (BT). G. - Detail of the abaxial epidermal cells (CAB). H. - Trichome with radial base of modified epidermal cells (BT). I. - Anomocytic stomata. References: P first-category vein. S second-category vein. T third-category vein. C fourth-category vein. Arces (Ar). RS branching of second-category veins. Tr trichome. BT base of the trichome. CAd cells of the adaxial surface. CAB cells of the abaxial surface. E stoma.

3.- *Colubrina celtidifolia* (Cham. & Schlecht.) Schlecht. (Lámina 3).

Hojas simples, simétricas, anchas a estrechamente ovadas a lanceoladas de 7 a 14 cm de largo y 3 a 8 cm de ancho, ápice corto acuminado, base redondeada a veces levemente cordada, textura membranácea (Figs. 3A, 3B), margen de la lámina foliar con 60 a 80 dientes diminutos sin glándulas (Fig. 3D). Peciolo de 7 a 15 mm de largo y 1 a 2 mm de diámetro. Venas de primera categoría acródroma basal imperfecta, con tres venas (Fig. 3B), las dos nervaduras externas se ramifican formando arcos (Figs. 3B, 3C) y en el margen se diferencia una vena que alimenta a cada diente (Fig. 3D) las de segunda categoría cruzan entre las venas primarias anastomosándose (3C) y las de tercera poligonales reticuladas, con o sin venas libres ramificadas (Fig. 3E, 3F).

Epidermis en vista superficial. Células epidérmicas adaxiales isodiamétricas de forma pentagonal con paredes de contorno recto (Fig. 3G), las abaxiales isodiamétricas, poligonales irregulares con paredes de contorno recto (Fig. 3I). Estomas en la superficie adaxial ausentes, los abaxiales anomocíticos de 21.1 a 18 μm de largo y ancho respectivamente (Fig. 3I), densidad estomática de 28/mm². Tricomas adaxiales y abaxiales unicelulares eglandulares con la base radiada de células epidérmicas modificadas de 14.7 μm de largo, con densidad de 4/mm², los abaxiales de 16.8 μm de largo con densidad de 18/mm² en ambos casos distribuidos en toda la superficie (Fig. 3H).

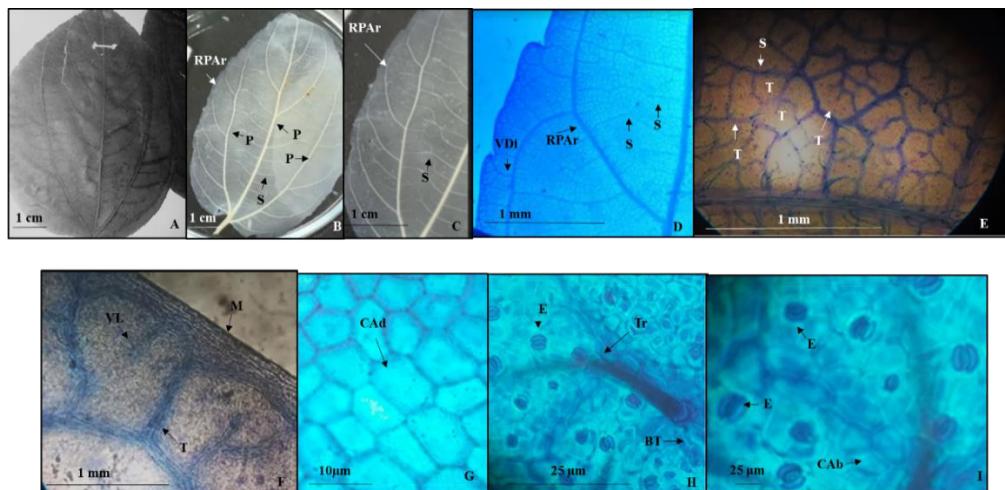


Lámina 3. *Colubrina celtidifolia*. A.- Lámina foliar del ejemplar de herbario. B.- Lámina foliar diafanizada mostrando las tres venas de primera categoría, las dos externas formando arcos. C.- Detalles de las ramificaciones formando arcos. D.- Arco de la ramificación de la vena primaria de donde deriva una vena libre que penetra al pequeño diente marginal. E.- Venas de segunda y tercera categoría, estas últimas sin venas o con venas libres ramificadas. F.- Venas de tercera jerarquía que llegan al margen con una o dos venas libres. G.- Células epidérmicas adaxiales isodiamétricas. H.- Tricoma con base radial de células epidérmicas modificadas y estomas. I.- Estomas anomocíticos con células oclusivas engrosadas y células epidérmicas abaxiales (E). Referencias: P vena de primera categoría. S vena de segunda categoría. T vena de tercera categoría. RPAr ramificación del par de venas primarias externas que forman arcos. VDi vena libre del diente. VL vena libre. M. margen. Tr tricoma. BT base del tricoma. CAD células de la superficie adaxial. CAB células de la superficie abaxial. E estoma.

Plate 3. *Colubrina celtidifolia*. A. - Leaf blade from the herbarium specimen. B. - Diaphanous leaf blade showing the three first category veins, the two external primary ones forming arches. C. - Details of the branches forming arches. D. - Arch of the branching of the primary vein from which a free vein derives that penetrates the small marginal tooth. E. - Second and third category veins, the latter without veins or with branched free veins. F. - Tertiary veins that reach the margin with one or two free veins. G. - Isodiametric adaxial epidermal cells. H. - Trichome with radial base of modified epidermal cells and stomata. I. - Anomocytic stomata with thickened guard cells and abaxial epidermal cells (E). References: P first category vein. S second category vein. T third category vein. RPAr branching of the pair of external primary veins that form arches. VDi free vein of the tooth. VL free vein. M. margin. Tr trichome. BT base of the trichome. CAD cells of the adaxial surface. CAB cells of the abaxial surface. E Stoma.

4.- *Colubrina ehrenbergii* Schlechth. (Lámina 4).

Hojas simples, simétricas ovadas a elíptico-ovadas de 3 a 8 cm de largo y 1.6 a 4 cm de ancho, ápice agudo a acuminado, base redondeada, textura coriácea a subcoriácea, margen dentado con 5 a 8 dientes por cada lado de la lámina foliar (4A, 4B) en el ápice de cada diente se aprecia una glándula circular de 1 a 2 mm de diámetro donde penetra una vena de segunda categoría (4D, 4E). Pecíolo de 4 a 15 mm de largo y 1.5 a 2 mm de diámetro. Venas de primera categoría acródroma basal imperfecta con tres venas que se ramifican (Fig. 4B), las de segunda recorren trayectos predominantemente paralelos entre las venas primarias y sus ramificaciones, las de tercera categoría libres ramificadas (4C).

Epidermis en vista superficial. Células epidérmicas adaxiales y abaxiales isodiamétricas pentagonales con paredes de contorno recto, las primeras con cristales circulares (Figs. 4G, 4H). Estomas anomocíticos en la superficie adaxial de 21.1 y 16.8 μm de largo y ancho, densidad estomática promedio de 26 estomas/ mm^2 , en la abaxial de 31.2 x 27 μm de largo y ancho, con densidad de 39 estomas/ mm^2 . Tricomas adaxiales unicelulares eglandulares, sin células epidérmicas modificadas (Fig. 4F) de 25.3 μm de largo con 28 tricomas/ mm^2 , se distribuyen en toda la superficie predominando en la vena primaria, tricomas abaxiales del mismo tipo de 25.3 μm de largo con densidad de 35 tricomas/ mm^2 , predominan en todas las venas.

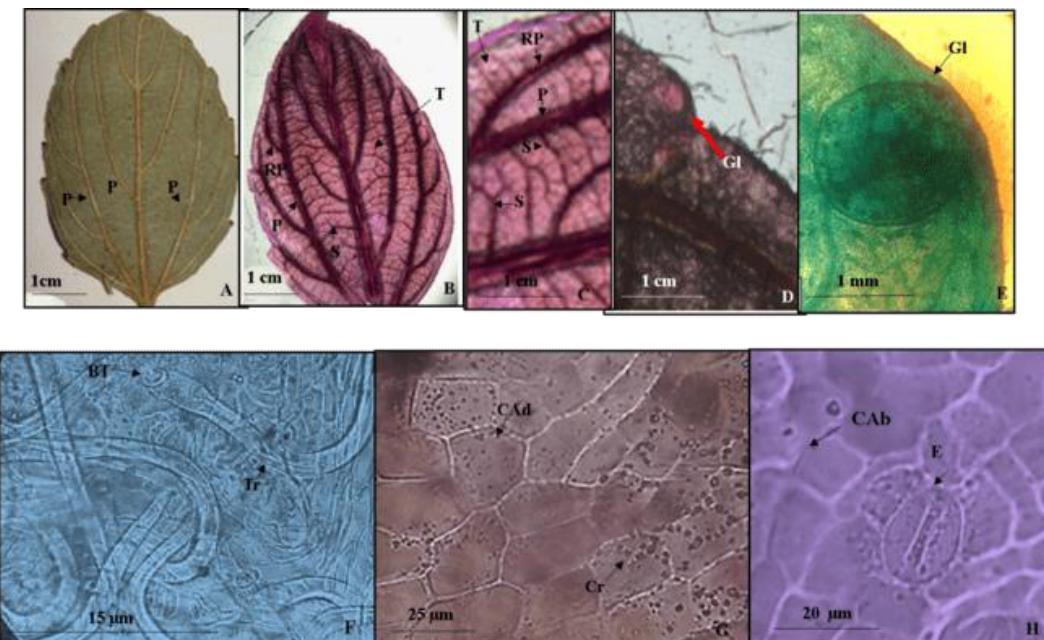


Lámina 4. *Colubrina ehrenbergii*. A.- Lámina foliar del ejemplar de herbario. B.- Material diafanizado mostrando tres venas de primera categoría ramificadas, las de segunda recorren trayectos predominantemente paralelos entre las venas de primarias y sus ramificaciones, las de tercera categoría libres ramificadas. C.- Detalle de venas de primera, segunda y tercera categoría, estas últimas ramificadas. D.- Diente con glándula marginal esférica. E.- Acercamiento de una glándula marginal. F.- Tricomas sin base de células epidérmicas modificadas. G.- Células adaxiales isodiamétricas con cristales circulares. H.- Células abaxiales isométricas y estoma anomocítico. Referencias: P: vena de primera categoría. S: vena de segunda categoría. T: vena de tercera categoría. RP: ramificaciones de venas primarias. Gl.: glándulas. BT: base del tricoma. Tr: tricoma. Cad: células de la superficie adaxial. CAB: células de la superficie abaxial. E: estoma.

Plate 4. *Colubrina ehrenbergii*. A. - Leaf blade of herbarium specimen. B. - Clear material showing three branched first category veins, the second ones run predominantly parallel paths between the primary veins and their branches, the third category veins are free and branched. C. - Detail of first, second and third category veins and the latter branched. D. - Tooth with spherical marginal gland. E. - Close-up of a marginal gland. F. - Trichomes without a base of modified epidermal cells. G. - Isodiametric adaxial cells with circular crystals. H. - Isometric abaxial cells and anomocytic stoma. References: P. - first-order vein. S. - second order veins. T. - third-order veins. RP. - branches of primary veins. Gl. - glands. BT. - trichome base. Tr. - trichome. Cad. - adaxial surface cells. CAB. - abaxial surfacecells. E: stoma.

5.- *Colubrina elliptica* (Sw.) Brizicky & W.L. Stern. (Lámina 5).

Hojas simples, simétricas, ovado-elíptica a veces ovadas y raras veces obovadas de 2.5 a 12 cm de largo y 1.5 a 5.3 cm de ancho, ápice agudo a acuminado, base redondeada a ampliamente cuneada, raramente redondeada (Figs. 5A, 5B) con dos glándulas que se presentan en la base de la lámina y en el margen (Figs. 5A, 5B), textura membranácea, margen entero. Pecíolo de 5 a 25 mm de largo y de 0.5 a 1 mm de diámetro (Figs. 5A, 5B). Vena de primera categoría pinnada, las de segunda categoría broquidódroma, con 3 a 4 arcos que no llegan al margen, sin ramificarse (Fig. 5C), las de tercera categoría alternas percurrentes, las de cuarta con o sin venas ramificadas (Figs. 5D, 5E).

Epidermis en vista superficial. Células de la epidermis isodiamétricas adaxiales y abaxiales pentagonales y abaxiales cuadrangulares ambas paredes de contorno recto (Figs. 5G, 5H). Estomas de la superficie abaxial anfíciclocíticos de 32.1 a 32.7 μm de largo y ancho con densidad estomática de 32 estomas/ mm^2 . Tricomas ausentes en la superficie adaxial, en la abaxial unicelulares eglandulares sin células epidérmicas modificadas de 11.3 μm de largo y densidad de 32 tricomas/ mm^2 , en toda la superficie aunque predominan en la vena central.

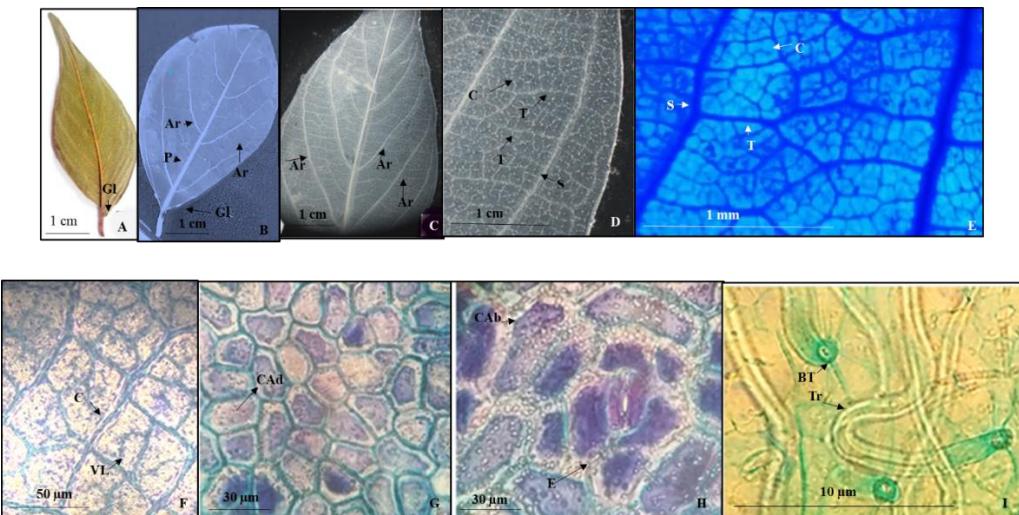


Lámina 5. *Colubrina elliptica*. A.- Lámina foliar del ejemplar de herbario. B.- Material diafanizado mostrando los arcos. C.- Detalle de los arcos que forman las venas secundarias. D.- Nervaduras de segunda, tercera y cuarta categoría. E.- Detalle de venaciones de segundo, tercero y cuarto nivel, las últimas con venas libres ramificadas o no. F.- Acercamiento de nervaduras de cuarta categoría con venas libres ramificadas y no. G.- Células epidérmicas adaxiales poligonales con paredes rectas. H.- Células epidérmicas poligonales abaxiales con paredes rectas y estoma anfíciclocítico. I.- Tricomas unicelulares sin células epidérmicas modificadas. Referencias: P vena de primera categoría. S vena de segunda categoría. T vena de tercera categoría. Ar arcos de las venas secundarias. VL venas libres. Gl glándulas. Tr tricoma. BT base del tricoma. CAd células de la superficie adaxial. CAb células de la superficie abaxial. E estoma.

Plate 5. *Colubrina elliptica*. A. - Leaf blade from the herbarium specimen. B. - Clear material showing the arches. C. - Detail of the arches that form the secondary veins. D. - Second, third and fourth category veins. E. - Detail of second, third and fourth level venations, the last ones with or without branched free veins. F. - Close-up of fourth category veins with or without branched free veins. G. - Polygonal adaxial epidermal cells with straight walls. H. - Abaxial polygonal epidermal cells with straight walls and amphicytic stoma. I. - Trichomes without modified epidermal cells. References: P first category vein. S second category vein. T third category vein. Ar arches of secondary veins. VL free veins. Gl glands. Tr trichome. BT base of trichome. CAd cells of the adaxial surface. CAb cells of the abaxial surface. E stoma.

6.- *Colubrina heteroneura* (Griseb.) Standley (Lámina 6).

Hojas simples, simétricas, obovadas a veces ovadas de 2.5 a 8.5 cm de largo y 1.7 a 6 cm de ancho, ápice agudo, levemente emarginado a redondeado, base redondeada a anchamente

cuneada (Figs. 6A, 6B), textura membranácea, margen entero con escasas glándulas marginales presentes cercanas a la base de la lámina foliar, poco evidentes en los ejemplares de herbario de 1 a 1.5 mm de largo por 0.4 a 0.5 mm de ancho (Fig. 6F). Peciolo de 3 a 18 mm de largo y de 1.5 a 2 mm de diámetro (Fig. 6A). Vena de primera categoría pinnada (Figs. 6A, 6B) las de segundas broquidódromas formando cinco a seis arcos que no terminan en el margen (Figs. 6A, 6B, 6C) las de tercera alternas percurrentes y las de cuarta categoría reticuladas sin venas libres incluidas y con cristales (Figs. 6D, 6E).

Epidermis en vista superficial. Células de la epidermis adaxial con paredes de contorno ondulado (Fig. 6G), las abaxiales pentagonales isodiamétricas con paredes de contorno recto (Fig. 6H). Estomas en la superficie adaxial anisocíticos y paracíticos (Fig. 6G) de 21.1 a 16.8 μm de largo y ancho con densidad estomática de 23 estomas/ mm^2 , en la abaxial anisocíticos y anomotetracíticos (Fig. 6H), de 25.3 a 21.7 μm de largo y ancho, con densidad de 31 estomas/ mm^2 . Tricomas ausentes en ambas superficies de la lámina foliar.

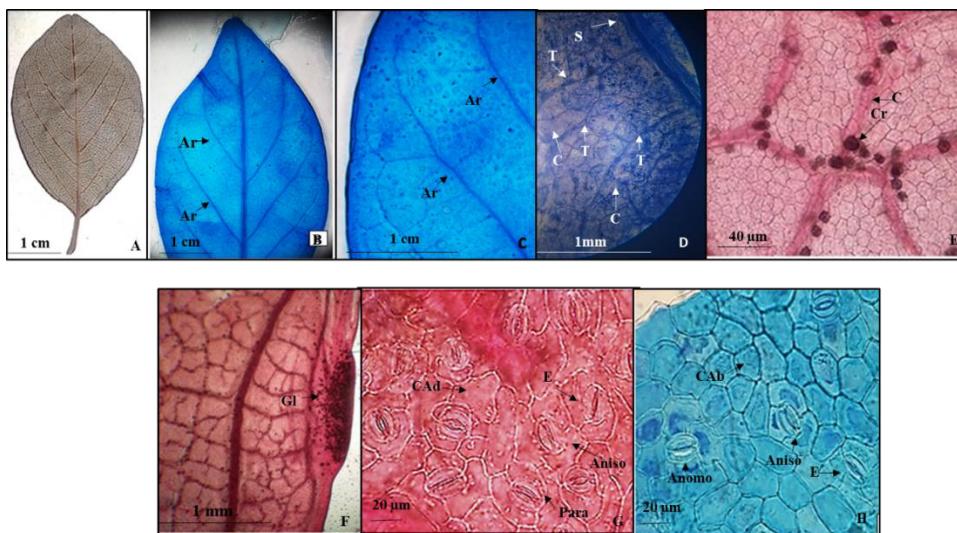


Lámina 6. *Colubrina heteroneura*. A.- Lámina foliar del ejemplar de herbario. B.- Lámina foliar diafanizada mostrando los arcos de las venas de segunda categoría. C.- Acercamiento de los arcos. D.- Detalle de las nervaduras de segunda, tercera y cuarta categoría, estas últimas sin venas incluidas. E.- Detalle de venas de cuarta categoría y cristales prismáticos. F.- Detalle de una glándula marginal. G.- Células epidérmicas adaxiales con paredes onduladas y estomas paracíticos y anisocítico H.- Células epidérmicas abaxiales isodiamétricas con paredes rectas y estomas anomocíticos y anisocíticos. Referencias: P vena de primera categoría. S vena de segunda categoría. T vena de tercera categoría. C vena de cuarta categoría. Ar arcos de las venas secundarias. Gl glándula. CAd células de la superficie adaxial. CAB células de la superficie abaxial. E estoma Aniso anisocítico. Para paracítico. Anomo anomocítico.

Plate 6. *Colubrina heteroneura*. A. - Leaf blade from the herbarium specimen. B. - Clear leaf blade showing the arches of second-category veins. C. - Close-up of the arches. D. - Detail of second, third and fourth-category veins, the latter without veins included. E. - Detail of fourth-category veins and prismatic crystals. F. - Detail of a marginal gland. G. - Adaxial epidermal cells with undulated walls, paracytic and anisocytic stomata. H. - Isodiametric abaxial epidermal cells with straight walls, anomocytic and anisocytic stomata. References: P first-category vein. S second-category vein. T third-category vein. C fourth-category vein. Ar arches of secondary veins. Gl gland. CAd cells of the adaxial surface. CAB cells of the abaxial surface. E stoma Aniso anisocytic. Para paracytic. Anomo anomocytic.

7. - *Colubrina johnstonii* T.Wendt (Lámina 7).

Hojas simples, simétricas, obovadas u obovado-lanceoladas de 4 a 15 cm de largo y 2 a 3.4 cm de ancho, ápice acuminado a redondeado, base cuneada a aguda, textura membranácea, margen entero con un par de glándulas cerca de la base de la lámina foliar poco visibles en los ejemplares de herbario de 0.2 a 0.3 mm (Figs. 9A, 9B). Peciolo de 4-17 mm de largo y 1 a 2 mm de ancho (Fig. 7A). Vena de primera categoría pinnada de curso recto (Figs. 7A, 7B), las de segunda categoría broquidódroma formando de 6 a 7 arcos de cada lado que no llegan hasta el margen

(Figs. 7A, 7B) y en la base de la lámina foliar (ver círculo de la figura 7B) con glándulas poco visibles a simple vista y que se aprecian con la diafanización (Fig. 7C), venas de tercera categoría alternas percurrentes (Fig. 7D, 7E), las de cuarta reticuladas con una o varias venas libres incluidas (Fig. 7E).

Epidermis en vista superficial. Células de la epidermis adaxial isodiamétricas de forma pentagonal con paredes de contorno recto (Fig. 7F), las abaxiales con células epidérmicas pentagonales con paredes de contorno ondulado (Fig. 7H). Estomas ausentes en la superficie adaxial, en la abaxial anisocíticos de 21.1 a 12.6 μm de longitud y ancho, densidad estomática de 12/mm². Tricomas ausentes en la superficie adaxial, en la abaxial muy escasos, unicelulares eglandulares, sin base radial de células epidérmicas modificadas de 18.4 a 23.21 μm de largo (Fig. 7G), densidad promedio de 1/mm².

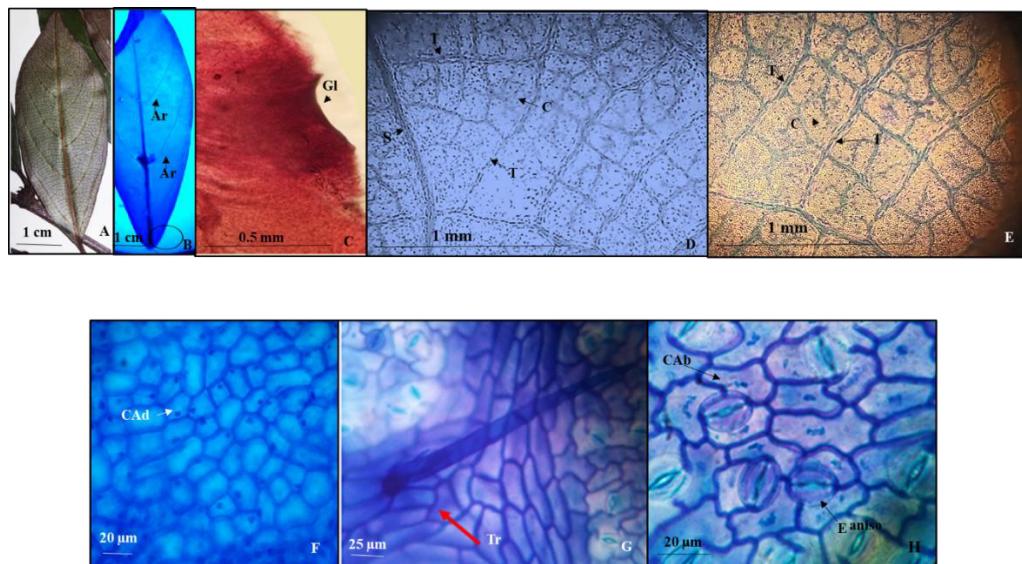


Lámina 7. *Colubrina johnstonii*. A.- Lámina foliar del ejemplar de herbario. B.- Lámina foliar diafanizada mostrando las tenues venas de segunda categoría formando arcos y el círculo que está en la base de la fotografía es el lugar donde se encuentra un par de pequeñas glándulas basales. C.- Detalle de una glándula basal. D.- Venas de segunda tercera y cuarta categoría. E.- Acercamiento de venas de tercera y cuarta categoría, estas últimas con venas libres o ramificadas. F.- Células adaxiales pentagonales con paredes rectas. G.- tricoma sin base radial de células epidérmicas modificadas. H.- Células abaxiales con paredes onduladas y estomas anomocíticos. Referencias: P vena de primera categoría. S vena de segunda categoría. T vena de tercera categoría. C vena de cuarta categoría. Ar arcos de las venas secundarias. Gl glándula. CAd células de la superficie adaxial. CAB células de la superficie abaxial. E estoma.

Plate 7. *Colubrina johnstonii*. A. - Leaf blade from the herbarium specimen. B. - Diaphanous leaf blade showing the faint second-category veins forming arches and the circle at the base of the photograph is the location of a pair of small basal glands. C. - Detail of a basal gland. D. - Second, third and fourth category veins. E. - Close-up of third and fourth category veins, the latter with free or branched veins. F. - Pentagonal adaxial cells with straight walls. G. - trichome without radial base of modified epidermal cells. H. - Abaxial cells with undulated walls and anomocytic stomata. References: P first-category vein. S second-category vein. T third-category vein. C fourth-category vein. Ar arches of secondary veins. Gl gland. CAd cells of the adaxial surface. CAB cells of the abaxial. E stomata.

8. - *Colubrina triflora* Brongn. (Lámina 8)

Hojas simples, simétricas, ovadas a lanceolado-ovadas de 3 a 14 cm de largo y 1.0 a 6.5 cm de ancho, ápice acuminado, base redondeada, textura de la lámina foliar membranácea, margen dentado de 3 a 10 dientes de cada lado, distantes (Figs. 8A) y con una glándula de 1 a 2 mm de diámetro de diámetro (Fig. 8B, 8C, 8D, 8E). Venación acródroma basal imperfecta con tres venas primarias (Fig. 8A), el par inferior externo de las venas de primera categoría se ramifican cerca del margen formando arcos marginales de donde deriva una vena que penetra a la glándula que

se encuentra en el diente (Figs. 8C, 8D), en la parte apical de la lámina foliar, en el margen no se forman arcos y las glándulas del diente son alimentadas por una vena de segunda categoría (Fig. 8B), en el resto de la lámina, las venas de segunda categoría cruzan entre las venas de primera categoría y sus ramificaciones, se anastomosan (Fig. 8B) y las de tercera con venas libres ramificadas (Fig. 8F).

Epidermis en vista superficial. Células epidérmicas adaxiales isodiamétricas con arreglo pentagonal (Fig. 8G), las abaxiales isodiamétricas con arreglo poligonal irregular (Fig. 8H), ambas superficies con paredes de contorno recto. Estomas de ambas superficies de la lámina foliar anomocíticos, los adaxiales de 18.9 a 14.7 µm de longitud y ancho, con densidad estomática de 24/mm², los abaxiales de 19.4 µm y 18.9 µm, con densidad estomática de 34/mm² (Fig. 8H). Hojas glabras.

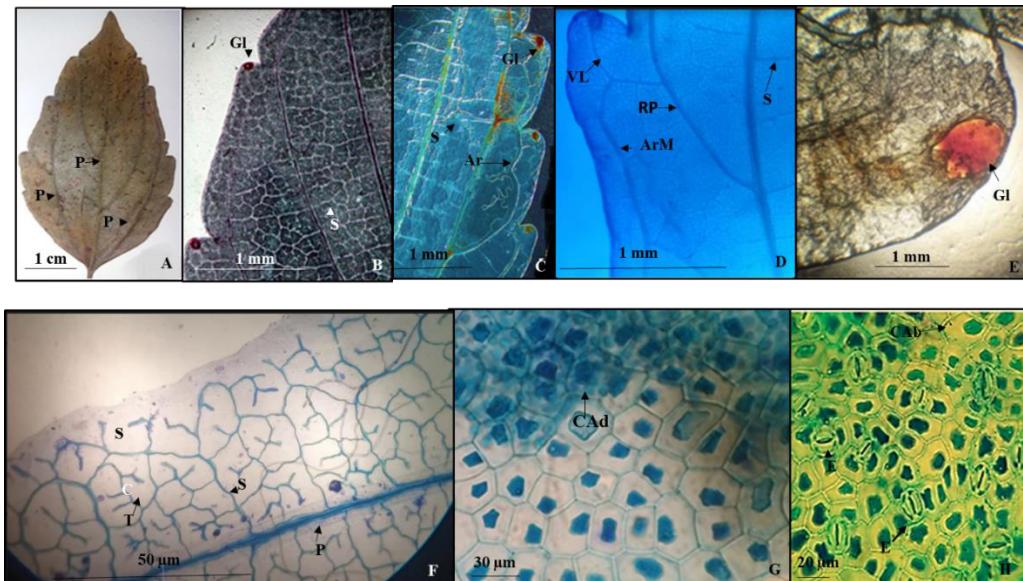


Lámina 8. *Colubrina triflora*. A.- Lámina foliar de ejemplare de herbario. B.- Detalle de parte de una hoja mostrando venas de segunda y tercera categoría penetrando la glándula del diente. C.- Parte de una hoja diafanizada mostrando las ramificaciones de las venas primarias formando arcos marginales y la vena que se dirige a la glándula. D.- Arco marginal que se forma de una ramificación de una vena primaria, de donde deriva una vena que penetra a la glándula. E.- Glándula. F.- Venas de primera, segunda y tercera categoría, estas últimas con venas libre ramificadas. G.- Células adaxiales pentagonales con paredes rectas. H.- Células abaxiales pentagonales con paredes rectas y estomas anomocíticos. Referencias: P venas primera categoría. S vena segunda categoría. T vena de tercera categoría. RP ramificación de una vena de primera categoría. ArM arco marginal. VL vena libre. CAD células de la superficie epidérmica adaxiales. CAB células de la superficie epidérmica abaxial. E estomas.

Plate 8. *Colubrina triflora*. A. - Leaf blade of a herbarium specimen. B. - Detail of part of a leaf showing second and third category veins feeding the tooth gland. C. Part of a diaphanous leaf showing the branches of the primary veins forming marginal arches and the vein that feeds the gland. D. - Marginal arch formed by a branch of a primary vein, from which a vein that feeds the gland derives. E. - Gland. F. - First, second and third category veins, the latter with free branching veins. G. - Pentagonal adaxial cells with straight walls. H. - Pentagonal abaxial cells with straight walls and anomocytic stomata. References: P first category veins. S second category vein. T third category vein. RP branching of a first category vein. ArM marginal arch. VL free vein. CAD adaxial epidermal surface cells. CAB cells of the abaxial epidermal surface. E stomata.

9.- *Colubrina viridis* (M. E. Jones) M. C. Johnston (Lámina 9)

Hojas simples, simétricas, obovadas a veces elípticas a ovadas de 0.6 a 4.2 cm de largo y 0.3 a 2 cm de ancho, ápice redondeado o agudo a veces retuso, base redonda a cuneada (Fig. 9A), textura membranácea, margen entero, glándulas presentes de 0.1 a 0.2 mm de diámetro, redondas poco evidentes debido a que son de un color muy semejante al de la lámina foliar (Figs. 9A, 9B). Pecíolo de 1 a 16 mm de largo y 1 mm de diámetro (Fig. 9A). Vena de primera categoría pinnada

con curso recto (Figs. 9A, 9B). Venas de segunda tenues broquidódromas (Fig. 9B) formando 3 a 4 arcos por cada lado sin ramificaciones, venas de tercera categoría alternas percurrentes (Figs. 9C, 9D), las de cuarta reticuladas con venas varias veces ramificadas (Figs. 9C, 9D).

Epidermis en vista superficial. Células epidérmicas adaxiales con paredes de contorno recto y con cristales prismáticos (Fig. 9E) y las abaxiales con paredes de contorno ondulado (Fig. 9F). Estomas anomotetracíticos en ambas superficies (Figs. 9F, 9G), en la adaxial los estomas de 42.2 y 21.1 μm de longitud y ancho con densidad estomática promedio de 21/mm², la abaxial de 24.3 y 28.7 μm de longitud y ancho con densidad estomática de 28 /mm². Tricomas ausentes.

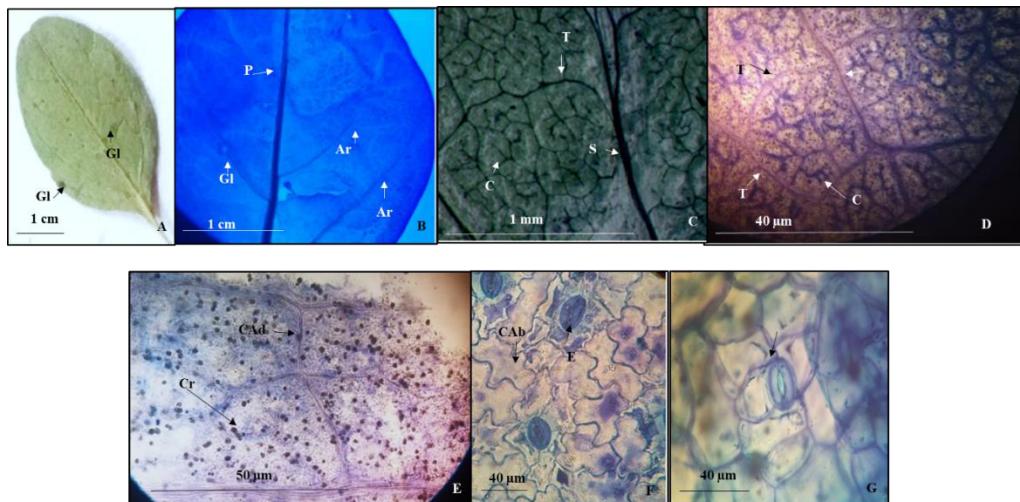


Lámina 9. *Colubrina viridis*. A.- Lámina foliar del ejemplar de herbario mostrando las glándulas en la superficie abaxial. B.- Lámina foliar diafanizada mostrando parte de los arcos de las venas secundarias y una glándula. C. Venas de segunda, tercera y cuarta categoría. D. Detalle de las venas de tercera y cuarta categoría, estas últimas con venas libres ramificadas. E.- Células epidérmicas adaxiales con paredes recta y con cristales prismático. F.- Células epidérmicas abaxiales con paredes onduladas y estomas anomotetracíticos. G.- Detalle de un estoma. Referencias: P vena primera categoría. S segunda categoría. T vena de tercera categoría. C vena cuarta categoría. Ar arcos que forman las venas secundarias. Cr cristales. CAd células de la superficie epidérmica adaxial. CAB células de la superficie epidérmica abaxial. E estomas.

Plate 9. A. - Leaf blade of the herbarium specimen showing the glands on the abaxial surface. B. - Diaphanous leaf blade showing part of the arches of the secondary veins and a gland. C. Second, third and fourth category veins. D. Detail of the third and fourth category veins, the latter with free branched veins. E. - Adaxial epidermal cells with straight walls and prismatic crystals. F. - Epidermal cells with wavy walls and anomotetracytic stomata. G. - Detail of a stoma. References: P first category vein. S second category. T third category vein. C fourth category vein. Ar arches forming the secondary veins. Cr crystals. CAd cells of the adaxial epidermal surface. CAB cells of the abaxial epidermal surface. E stomata.

En el trabajo de Fernández-Nava *et al.* (2004) y en esta investigación se han documentado las peculiaridades de la arquitectura foliar y de la morfología epidérmica de las láminas foliares, de los diferentes subgéneros y secciones del género *Colubrina* presentes en México.

En la Tabla 2 se presenta el resumen de las características de los subgéneros según Johnston (1971) y las respectivas secciones, así como la distribución geográfica de las mismas. Dicha clasificación fue la base de este trabajo para la discusión y permanencia de algunos subgéneros y secciones, así como la posible reedición de estas categorías taxonómicas.

Tabla 2. Características y distribución de los Subgéneros y Secciones de *Colubrina* presentes en México (Johnston, 1971).**Table 2.** Characteristics and Distribution of *Colubrina* Subgenera and Sections present in Mexico (Johnston, 1971).

| SUBGÉNERO COLUBRINA | | |
|--|---|--|
| Láminas foliares con margen entero, crenado o aserrado, los dientes pueden o no presentar glándulas marginales, de encontrarse estas últimas, entonces el número de dientes es menor de diez por lado. | | |
| I. Sección Colubrina Láminas foliares con margen entero u onduladas-crenadas, con glándulas longitudinales entre la nervadura central y los márgenes, a menudo las dos más cercanas a la base de la lámina foliar son más grandes que el resto. Se distribuye en Hawái con una especie y cuatro taxones en los trópicos americanos. | II. Sección Cowania Láminas foliares con al menos dos glándulas marginales, una a cada lado, a menudo cerca de la base de la lámina foliar, margen entero. Ramas de la inflorescencia comúnmente con espinas. Distribución América tropical | III. Sección Barcena Lámina con el margen de la hoja con 3 a 10 dientes de cada lado, cada uno asociado a una glándula marginal. Distribución México y América Central |
| Especie presente en México: <i>C. arborescens</i> | Especies presentes en México: <i>C. elliptica</i> <i>C. heteroneura</i> <i>C. johnstonii</i> <i>C. viridis</i> <i>C. spinosa</i> var. <i>mexicana</i> * (Nayarit) | Especies presentes en México: <i>C. ehrenbergii</i> <i>C. triflora</i> |
| SUBGÉNERO SERRATARIA | | |
| Láminas foliares con márgenes aserrados, más de diez dientes en cada lado y cada uno asociado con una glándula marginal. Distribución América y Asia. | | |
| Se incluyeron las siguientes especies: <i>C. californica</i> , <i>C. celtidifolia</i> , <i>C. texensis</i> ¹ (sin. <i>C. texensis</i> var. <i>texensis</i>), <i>C. stricta</i> ¹ (sin. <i>C. texensis</i> var. <i>pedunculata</i>), <i>C. angustior</i> ¹ (sin. <i>C. greggii</i> var. <i>angustior</i>), <i>C. greggii</i> ¹ (sin. <i>C. greggii</i> var. <i>greggii</i>), <i>C. yucatanensis</i> ¹ (sin. <i>C. greggii</i> var. <i>yucatanensis</i>), <i>C. macrocarpa</i> ² (sin. <i>C. macrocarpa</i> var. <i>macrocarpa</i>) y <i>C. lanulosa</i> ² (sin. <i>C. macrocarpa</i> var. <i>lanulosa</i>). <i>C. sordida</i> * (Guerrero) <i>C. macrocarpa</i> var. <i>macrocarpoides</i> * (Querétaro). | | |

Las especies que incluyeron* correspondieron aquellas que se citan para México y solo se cuenta con el ejemplar tipo y no se han vuelto a recolectar, estos taxones no fueron considerados para este estudio. Algunos nombres de las especies se han tenido que actualizar o darles la categoría taxonómica de especies. Los superíndices 1 corresponde al trabajo de Nesom (2013) y el 2 al de Fernández-Nava *et al.* (2024).

Una vez que se obtuvieron los datos de la arquitectura foliar y superficies epidérmicas de las nueve especies estudiadas y con el propósito de establecer las características de los 16 taxones presentes en México, se elaboró la tabla 3 que se encuentra después de la bibliografía, donde se sintetizaron las descripciones de las nueve especies aquí estudiadas más las siete que están incluidas en Fernández-Nava *et al.* (2024) y con base en estos resultados se realizó la clave dicotómica para la separación de los taxones así como el análisis UPGMA, índice de similitud de Jaccard y el respectivo dendrograma. Las actividades anteriores permitieron separar y agrupar las 16 especies a partir estudios morfológicos y anatómicos y relacionarlos con los trabajos taxonómicos de *Colubrina*.

**CLAVE DICOTÓMICA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE ESPECIES DE *Colubrina*
CON BASE EN LA ARQUITECTURA FOLIAR Y SUPERFICIES EPIDERMICAS
INCORPORANDO DATOS DE FERNÁNDEZ-NAVA *et al.* (2024).**

**DICHOTOMOUS KEY FOR THE IDENTIFICATION OF *Colubrina* SPECIES BASED
ON LEAF ARCHITECTURE AND EPIDERMAL SURFACES INCORPORATING
DATA FROM FERNÁNDEZ-NAVA *et al.* (2024).**

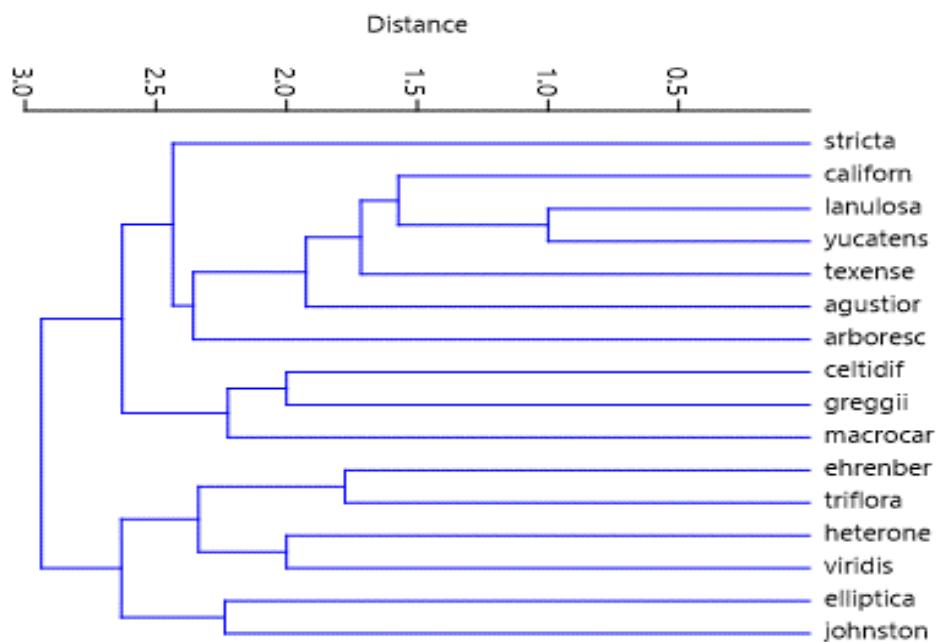
- 1.- Venas de primera categoría pinnada (vena central evidente)
2.- Venas de segunda categoría craspedódromas (venas secundarias terminan en el margen)
3.- Glándulas distribuidas en ambas superficies foliares, lámina foliar con 3 a 4 pares de venas a cada lado de la lámina foliar.....*C. arborescens*
3.- Glándulas ausentes en la superficie, margen o base de las láminas foliares
4.- Par inferior de las venas de segunda categoría no ramificadas. Lámina foliar con 5 a 6 pares de venas de cada lado.....*C. stricta*
4.- Par inferior de las venas de segunda categoría ramificadas
5.- Tricomas sin la base de células epidérmicas modificadas con 6 a 7 pares de venas en ambos lados de la lámina foliar.....*C. angustior*
5.- Tricomas con base radial de células epidérmicas modificadas
6.- Venas de cuarta categoría sin venas libres incluidas, o de tenerlas solo una. Lámina foliar con 6 a 8 pares de nervaduras de segunda categoría de cada lado
7.- Células epidérmicas adaxiales y abaxiales con paredes de contorno recto, estomas anomocíticos y anomotetracíticos. Lámina foliar con 7 a 8 pares de venas secundarias de cada lado.....*C. lanulosa*
7.- Células epidérmicas adaxiales y abaxiales con paredes de contorno recto u ondulado respectivamente, estomas anomocíticos. Lámina foliar con 6 a 7 pares de venas secundarias de cada lado.....*C. yucatensis*
6.- Venas de cuarta categoría con varias venas libres ramificadas. Lámina foliar con de 3 a 4 pares de nervaduras secundarias de cada lado.....*C. texensis*
2.- Venas de segunda categoría broquidódromas (venas secundarias unidas en una serie de arcos)
8.- Láminas foliares sin glándulas, par inferior de arcos que forman las venas de segunda categoría ramificadas y las nervaduras apicales enrolladas.....*C. californica*
8.- Láminas foliares con glándulas basales o en toda la superficie
9.- Láminas foliares con glándulas en toda la superficie, tricomas ausentes*C. viridis*
9.- Láminas foliares con glándulas basales marginales, tricomas presentes o ausentes
10.- Tricomas ausentes, venas de segunda categoría forman 5 a 6 arcos de cada lado.....*C. heteroneura*
10.- Tricomas presentes
11.- Venas de segunda categoría forman de 3 a 4 arcos a cada lado de la lámina foliar*C. elliptica*
11.- Venas de segunda categoría forman de 6 a 7 arcos a cada lado de la lámina foliar,*C. johnstonii*
1.- Venas de primera categoría acródromas basal imperfecta (tres o más venas primarias divergiendo desde un solo punto)
12.- Glándulas presentes en cada diente del margen de la lámina foliar, tricomas ausentes o presentes
13.- Tricomas sin base radial de células epidérmicas modificadas, ramificaciones de las tres venas primarias libres, margen dentado y en cada diente se encuentra una glándula*C. ehrenbergii*
13.- Tricomas ausentes, las ramificaciones del par basal externo de las venas primarias forman arcos de donde deriva una vena que penetra en cada diente donde se encuentra una glándula*C. triflora*
12.- Glándulas ausentes, lámina foliar con tricomas

- 14.- Tricomas sin células radiales epidérmicas modificadas, nervaduras de tercera categoría sin venas libres.....*C. greggii*
- 14.- Tricomas con base radial de células epidérmicas modificadas
- 15.- Venas de primera categoría externas con ramificaciones libres y los dientes del margen son alimentados por venas de segunda o tercera categoría.....*C. macrocarpa*
- 15.- Venas de primera categoría externas se ramifican y forman arcos y de ellas deriva una nervadura que alimenta los dientes marginales.....*C. celtidifolia*

Al analizar los caracteres de las 16 especies de *Colubrina*, con base en los tipos de arquitectura foliar, craspedódroma, broquidódromas, acródroma basal imperfecta; presencia o ausencia de glándulas; con o sin tricomas y en caso de presentarse con o sin base radial de células epidérmicas modificadas; ramificaciones del primer par de venas primarias y secundarias ramificadas o no; venas de tercera categoría con venas libres incluidas o no; venas de cuarta categoría con venas libres o no; tipos de tricomas anisocíticos, anomocíticos, paracíticos, anfícílicos, anomotetracíticos, pericíticos. Para validar los caracteres de relevancia utilizados en la identificación de especies se realizó el análisis UPGMA y se obtuvo del índice de similitud de Jaccard, con base en la relación presencia-ausencia entre los taxones (Tabla 4) y el respectivo dendrograma (Fig. 10).

Tabla 4. Índice de similitud de Jaccard entre las 16 especies de *Colubrina*.**Table 4.** Jaccard similarity index between the 16 species of *Colubrina*.

| | agustior | arboresc | californ | celtidif | ehrenber | elliptica | greggi | heteron | johnston | lanulosa | macrocar | stricta | texense | triflora | viridis | yucate |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|--------|---------|----------|----------|----------|-----------|---------|----------|---------|--------|
| agustior | 0 | 2.645751 | 2.236068 | 2.6458 | 2.236068 | 3.4641 | 2.236 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2.6457513 | 1.73205 | 2.902 | 3.317 | 1.732 |
| arboresc | 2.64575 | 0 | 2.44949 | 2.4495 | 2.44949 | 2.6458 | 2.449 | 2.4495 | 2.828423 | 2.2361 | 2.828427 | 2.4494897 | 2.44949 | 2.294 | 2.449 | 2 |
| californ | 2.23607 | 2.44949 | 0 | 2.4495 | 2.828427 | 3 | 2.449 | 2.8284 | 3.16228 | 1.7321 | 2.828427 | 2.8284271 | 2 | 3.078 | 2.828 | 1.414 |
| celtidif | 2.64575 | 2.44949 | 2.44949 | 0 | 2.44949 | 3 | 2 | 2.8284 | 3.16228 | 2.6458 | 2 | 2.4494897 | 2.44949 | 2.294 | 3.162 | 2.449 |
| ehrenber | 2.23607 | 2.44949 | 2.828427 | 2.4495 | 0 | 3 | 2 | 2.4495 | 2.44949 | 3 | 2.828427 | 3.1622777 | 2.82843 | 1.777 | 2.828 | 2.828 |
| elliptica | 3.4641 | 2.645751 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3.317 | 2.6458 | 2.23607 | 3.4641 | 3 | 2.6457513 | 3 | 2.902 | 2.646 | 3.317 |
| greggi | 2.23607 | 2.44949 | 2.44949 | 2 | 2 | 3.3166 | 0 | 2.8284 | 2.82843 | 2.6458 | 2.44949 | 2.8284271 | 2.82843 | 2.294 | 2.828 | 2.449 |
| heteron | 3 | 2.44949 | 2.828427 | 2.8284 | 2.44949 | 2.6458 | 2.828 | 0 | 2.44949 | 3.3166 | 3.162278 | 3.1622777 | 3.16228 | 1.777 | 2 | 3.162 |
| johnstor | 3 | 2.828427 | 3.162278 | 3.1623 | 2.44949 | 2.2361 | 2.828 | 2.4495 | 0 | 3.6056 | 2.828427 | 2.8284271 | 3.16228 | 2.513 | 2.449 | 3.464 |
| lanulosa | 2 | 2.236068 | 1.732051 | 2.6458 | 3 | 3.4641 | 2.646 | 3.3166 | 3.60555 | 0 | 3 | 2.236068 | 1.73205 | 3.244 | 3 | 1 |
| macrocar | 3 | 2.828427 | 2.828427 | 2 | 2.828427 | 3 | 2.449 | 3.1623 | 2.82843 | 3 | 0 | 2.4494897 | 2.82843 | 2.513 | 3.162 | 2.828 |
| stricta | 2.64575 | 2.44949 | 2.828427 | 2.4495 | 3.162278 | 2.6458 | 2.828 | 3.1623 | 2.82843 | 2.2361 | 2.44949 | 0 | 2 | 3.078 | 2.828 | 2.449 |
| texense | 1.73205 | 2.44949 | 2 | 2.4495 | 2.828427 | 3 | 2.828 | 3.1623 | 3.16228 | 1.7321 | 2.828427 | 2 | 0 | 3.078 | 3.464 | 1.414 |
| triflora | 2.90191 | 2.294157 | 3.077935 | 2.2942 | 1.777047 | 2.9019 | 2.294 | 1.777 | 2.51312 | 3.2444 | 2.513123 | 3.0779351 | 3.07794 | 0 | 2.294 | 3.078 |
| viridis | 3.31662 | 2.44949 | 2.828427 | 3.1623 | 2.828427 | 2.6458 | 2.828 | 2 | 2.44949 | 3 | 3.162278 | 2.8284271 | 3.4641 | 2.294 | 0 | 3.162 |
| yucaten | 1.73205 | 2 | 1.414214 | 2.4495 | 2.828427 | 3.3166 | 2.449 | 3.1623 | 3.4641 | 1 | 2.828427 | 2.4494897 | 1.41421 | 3.078 | 3.162 | 0 |

**Figura 10.** Dendrograma mostrando las relaciones de afinidad entre las diferentes especies de *Colubrina*.**Figure 10.** Dendrogram showing the affinity relationships between the different *Colubrina* species.

Al observar el dendrograma se aprecian dos grandes grupos, el primero incluye a *Colubrina ehrenbergii*, *C. triflora*, *C. heteroneura*, *C. elliptica*, *C. johnstonii* y *C. viridis* que se separan por la presencia de glándulas generalmente en el margen y en la última especie en la superficie de la lámina. En el segundo conjunto se diferencian aquellas especies que no presentan glándulas como *C. celtidifolia*, *C. greggii*, *C. macrocarpa*, *C. angustior*, *C. texensis*, *C. yucatanensis*, *C. lanulosa*, *C. californica*, *C. stricta* y *C. arborens* que las presentan en toda la superficie de la lámina, son oscuras y evidentes. De este último conjunto de diez especies se separan a su vez en dos agrupamiento, uno incluye a los tres primeros taxones con arquitectura foliar acródroma basal imperfecta y el segundo al resto de las especies con arquitectura foliar craspedódroma y broquidódroma.

DISCUSIÓN

Después de describir la arquitectura foliar y las superficies epidérmicas de las especies de *Colubrina* que se distribuyen en México se encontraron caracteres para separar cada uno de los taxones, como la arquitectura foliar; número de pares de venas secundarias en la superficie foliar; ramificación del par basal de venas secundarias o no, y si la ramificación es libre o formaban arcos; la presencia de glándulas y su ubicación; el tipo de tricomas que se presentan con base radial de células epidérmicas modificadas o si carecen de ellas, o bien la ausencia de tricomas. El contorno de las paredes celulares de las células epidérmicas (rectas u onduladas) y los tipos de estomas no fueron relevantes para la separación de los taxones.

Tomando en consideración el trabajo de Johnston (1971, pág. 8), quien dividió a las especies de *Colubrina* en varios subgéneros y secciones, las especies de México se incluyen en los subgéneros *Colubrina* con las secciones *Colubrina*, *Cowanía* y *Barcena* y el subgénero *Serrataria* no presenta secciones (Tabla 2).

El subgénero *Colubrina* (Johnston 1971, pág. 9) incluye a especies con los siguientes caracteres: láminas foliares con margen entero, crenado o aserrado, los dientes no asociados con glándulas marginales o de encontrarse en el margen, entonces con menos de diez dientes por cada lado. Se incluye a siete especies, que cumplen estas condiciones según las observaciones del trabajo arriba citado: *C. arborescens*, *C. ehrenbergii*, *C. elliptica*, *C. heteroneura*, *C. johnstonii*, *C. triflora* y *C. viridis*, (Tabla 2).

La subdivisión del subgénero *Colubrina* en secciones propuesta por (Johnston 1971, pág. 9) incluyen los caracteres que se mencionan:

Subgénero *Colubrina* sección *Colubrina* con láminas foliares con margen entero u onduladas-crenadas, con glándulas longitudinales entre la nervadura central y los márgenes, a menudo las dos glándulas más cercanas a la base son más grandes que el resto. En México se encuentra *A. arborescens*, en este trabajo se corrobora la presencia de glándulas en la superficie foliar, más visibles en la superficie abaxial de la lámina foliar, pero no son longitudinales (Figs. 1E, 1F).

Subgénero *Colubrina* sección *Cowanía* con láminas foliares con al menos dos glándulas marginales una a cada lado, a menudo cerca de la base de la hoja. Los ejemplares de *C. elliptica* presentaron un par de glándulas más o menos visibles en los ejemplares de herbario y en hojas diafanizadas que se observaron en el microscopio estereoscópico (Fig. 5A, 5B). En *C. heteroneura* (Fig. 6F) y *C. johnstonii* (Fig. 7C) también con un par de glándulas basales, poco visibles en ejemplares de herbario y es necesario diafanizar las hojas y realizar cortes para observarlas en microscopio óptico. En *C. viridis* las glándulas se aprecian en la superficie de la lámina foliar y son de color claro (Figs. 9A, 9B).

Subgénero *Colubrina* sección *Barcena* presenta el margen de la hoja con 3 a 10 dientes de cada lado, asociados a una glándula marginal que se observan muy bien. En este trabajo se constató la presencia de glándulas en los dientes del material diafanizado de *C. ehrenbergii* (Figs. 4D, 4E) y *C. triflora* (Figs. 8B, 8C, 8E).

El subgénero *Serrataria* según Johnston (1971, pág. 10) las láminas foliares presentan márgenes aserrados, más de diez dientes en cada lado y cada uno asociado con una glándula marginal donde se incluyen a *C. californica*, *C. celtidifolia*, *C. texensis*, *C. stricta*, *C. angustior*, *C. greggii*, *C. yucatanensis*, *C. macrocarpa* y *C. lanulosa*, sin embargo, en los resultados de este trabajo y en el de (Fernández-Nava et al., 2024) ninguna de estas especies presenta glándulas en los dientes. Lo que se apreció en las especies de ejemplares herborizados fue una pequeña protuberancia en los dientes, sin embargo no son glándulas y este abultamiento se debe a que los dientes están alimentados por una vena de segunda o tercera categoría como sucede en *C. angustior* (Fernández-Nava et al. 2024 p. 16 Fig. 3D), *C. californica* (Figs. 2B, 2D), *C. celtidifolia* (Fig. 3D), *C. greggii* (Fernández-Nava et al. 2024 p. 14 3D), *C. lanulosa* (Fernández-Nava et al. 2024 p. 19, Figs. 6C, 6D), *C. macrocarpa* (Fernández-Nava et al. 2024 p. 18, 5D), *C. stricta* (Fernández-Nava et al., 2024 p. 10, Fig. 7C), *C. texensis* (Fernández-Nava et al. 2024 p. 21, Fig. 8D y *C. yucatanensis* (Fernández-Nava et al. 2024 p. 17, Fig. 4D). Lo anterior lleva a reconsiderar las características del subgénero *Serrataria* según (1971, págs. 9-10).

En el trabajo de Johnston (1971, pág. 10) se describen las características de las especies del subgénero *Colubrina* sección *Capuronía*, con hojas enteras o con pequeños dientes, en uno o ambos lados o irregularmente crenulado dentado, no asociados con glándulas marginales. Estas

características son las que se encontraron en los taxones estudiados para México del subgénero Serrataria, sin embargo, el autor citado da un peso importante a la distribución de las especies y la sección Capuronia que incluye a cuatro taxones son de Madagascar y además hay características en el fruto que no se presentan en las especies de Serrataria, así que más bien las especies de este subgénero tendrán que redescribirse considerando la ausencia de glándulas y la penetración en los dientes marginales a través de venas de tercera o cuarta categoría.

Con base en los datos de arquitectura foliar y superficies epidérmicas que se observaron en este trabajo, fue posible encontrar patrones en común con las especies citadas por (Johnston 1971, pág. 9), en el subgénero Colubrina sección Cowania con *C. elliptica* (Fig 5A, 5B) *C. heteroneura* (Fig. 6A), *C. johnstonii* (Figs. 7A, 7B) y *C. viridis* (9A) que presentan en común además de la presencia de glándulas, las venas de segunda categoría broquidódromas y los arcos inferiores no se ramifican.

Así también con los datos de arquitectura foliar y superficies epidérmicas, fue posible encontrar aspectos en común con las especies citadas por (Johnston 1971, pág. 9) para el subgénero Colubrina sección Barcena con *C. ehrenbergii* y *C. triflora*, con la presencia de las glándulas en cada diente del margen se encontró que el patrón de venación fue acródroma basal imperfecta, con tres o más venas primarias divergiendo desde un solo punto.

El subgénero Serrataria que está representado en México con nueve especies (Johnston, 1971, pág. 10) se encontraron tres tipos de arquitectura foliar, la craspedódroma presente en *C. angustior*, *C. lanulosa*, *C. stricta*, *C. yucatensis* y *C. texensis*. La acródroma basal imperfecta en *C. greggii*, *C. macrocarpa* y *C. celtidifolia*, el patrón broquidódromo en *C. californica*.

En relación a los tricomas para el subgénero Serrataria se presentaron tres variables en los taxones: con base radial de células epidérmicas modificadas, los que no tienen estas células epidérmicas modificadas y las especies que no presentan tricomas.

Las especies con venación craspedódroma como *C. angustior*, los tricomas no tienen base radial de células epidérmicas modificadas y *C. lanulosa*, *C. stricta*, *C. texensis* y *C. yucatensis*, si los presentan.

En los taxones con arquitectura foliar acródroma basal imperfecta, en *C. greggii* los tricomas no presentan la base radial de células epidérmicas modificadas; *C. celtidifolia* y *C. macrocarpa* los pelos tienen la base radial de células epidérmicas modificadas. En el patrón de venación broquidódromo, *C. californica* presenta tricomas con la base radial de células epidérmicas modificadas. Por lo anterior, entre las especies del subgénero Serrataria variaron los patrones de la arquitectura foliar y de los tricomas así que el carácter común del subgénero fue la ausencia de glándulas en los dientes marginales.

El trabajo de Wendt (1983, p. 87) incluye una clave para separar las cinco especies de la sección *Cowania* a nivel mundial y la base de la separación incluye las glándulas y como se mencionó en el presente trabajo, en especímenes de herbario son poco visibles, sin embargo, las especies que prosperan en México tienen un carácter en común que es presentar el tipo de venación broquidódroma y el par basal de estos arcos no ramificados y como una segunda opción de separación las glándulas y así por ejemplo, *C. elliptica* presenta de 3 a 4 pares de arcos en la lámina foliar, tricomas con base radiada de células epidérmicas modificadas; *C. johnstonii* con 6 a 7 pares de arcos en la lámina foliar y tricomas sin base radial de células epidérmica modificadas; *C. heteroneura* con 5 a 6 arcos en la lámina foliar, sin tricomas y las nervaduras de cuarta categoría sin venas libres incluidas o con solo una y *C. viridis* con 3 a 4 arcos, sin tricomas y venas de cuarta categoría libres ramificadas; estos caracteres podrían apoyar la separación de las especies de la sección *Cowania*.

Al realizar el análisis UPGMA, el índice de similitud de Jaccard y el respectivo dendrograma (Fig. 10) se aprecian dos grandes grupos, uno que incluye a *Colubrina ehrenbergii*, *C. triflora*, *C. heteroneura*, *C. viridis*, *C. elliptica* y *C. johnstonii*. Las dos primeras especies pertenecientes al subgénero Colubrina sección Barcena y los cuatro últimos taxones son del subgénero Colubrina sección Cowiana (Johnston, 1971 p. 9-10).

Esta separación se complementa con el presente estudio debido a que *Colubrina ehrenbergii*, *C. triflora* pertenecen a la sección Barcena con arquitectura foliar acródroma basal imperfecta y presentan glándulas en los dientes del margen. La sección Cowania con *C. elliptica*, *C. heteroneura*, *C. johnstonii* y *C. viridis* con arquitectura foliar broquidódroma, con el par de arcos

inferiores no ramificados y la presencia de dos glándulas generalmente en el margen y base la hoja o bien distribuidas en la superficie de la lámina foliar.

El segundo grupo del dendrograma incluye al Subgénero *Colubrina* sección *Colubrina* y todas las especies del subgénero *Serrataria*. En el primer subgénero y sección se encuentra *C. arborescens* que se separa por presentar arquitectura foliar craspedódroma y glándulas distribuidas en toda la superficie, aunque no como las describe (Johnston, 1971, p. 12), este autor cita la presencia de glándulas longitudinales entre la nervadura central y los márgenes de la lámina foliar, también refiere que hay dos razas en el área de distribución de la especie, la que se localizan en las Antillas y otra de la Península de Yucatán, Chiapas y Guatemala (Johnston, 1971, mapa p. 13). Los ejemplares examinados en el presente trabajo pertenecen a los estados de Campeche, Quintana Roo y Chiapas y podrían tratarse de otra especie debido a que las glándulas no son longitudinales son circulares a ovadas, oscuras y se distribuyen en toda la lámina foliar (Figs. 1C, 1E).

En el subgénero *Serrataria* excluyendo a *C. arborescens* por las razones arriba citadas, se separan dos conjuntos, uno de ellos que incluye a *Colubrina celtidifolia*, *C. greggiyi*, *C. macrocarpa* con taxones con arquitectura foliar acródroma basal imperfecta y un segundo grupo con *C. angustior*, *C. lanulosa*, *C. stricta*, *C. texensis* y *C. yucatensis* con venación craspedódroma y a *C. californica* con venación broquidódroma con los arcos inferiores ramificados.

Este último taxón presentó tres caracteres diferentes al resto de las especies de esta sección, la primera la arquitectura foliar broquidódroma presente más bien en la sección *Cowanía*, sin embargo, difiere de ella por la ausencia de glándulas y los arcos inferiores están ramificados y la tercera es que las venas secundarias superiores se enrollan sobre su propio eje (Figs. 2B, 2D).

Con base en las características anteriores el subgénero *Serrataria* tendría en común la ausencia de glándulas en los dientes marginales y la subdivisión en secciones podría darse con base en la arquitectura foliar.

Nesom (2023a, p. 1, 5) menciona que estudios de Rhamnaceae han reconocido que *Colubrina celtidifolia* es nativa del sur de México y Guatemala y es similar al árbol asiático *Hovenia dulcis*. Las similitudes se confirman por la presencia de los pedúnculos carnosos e hinchados de la inflorescencia, razón por la cual este autor transfirió *C. celtidifolia* al género *Hovenia* como *H. celtidifolia* (Cham. & Schlecht.) Nesom. Así también, Pool (2014, p. 60-61) indica que hay “una sola especie de *Colubrina* con las ramas de la inflorescencia hinchadas después de la antesis” carácter genérico de *Hovenia* y “un engrosamiento similar se ha visto algunas veces en *C. macrocarpa* (Cav.) G. Don del centro de México pero este engrosamiento es en los ovarios, los cuales son aparentemente infectados por insectos y desarrollan agallas”. La autora menciona que las láminas foliares tienen de 3 a 5 nervaduras laterales y la ausencia de glándulas y reconoce la presencia en Mesoamérica de *Colubrina celtidifolia*.

En la descripción de Nesom (2023b, p.5) cita para *Hovenia celtidifolia* el tipo de venación broquidódroma con tres venas primarias laterales y con una glándula en cada diente. Al leer la descripción del género *Hovenia* en la Flora de China (Chen y Schirarend, 2007) se menciona la venación trinervadas desde la base, vena primaria con 4 a 8 pares de venas secundarias y no se cita la presencia de glándulas en la lámina foliar.

En lo que respecta a la arquitectura foliar de *C. celtidifolia* en este trabajo se encontraron tres venas primarias que parten de la base (acródroma basal imperfecta según Dilcher, 1974, p. 33 o también conocida como actinódroma Ash *et al.*, 1999, p. 29) y las ramificaciones de las venas de primera categoría son las que forman los arcos, no es una venación broquidódroma ya que esto implica que se presente una vena de primera categoría pinnada y los arcos se formen de las venas secundarias (Dilcher, 1974, p. 30). La presencia de glándulas en *C. celtidifolia* solo se mencionan por Nesom (2023b, p. 5.), no se apreciaron por Pool (2014, p. 60) ni se observaron en este trabajo. Debido a que la arquitectura foliar y la ausencia de glándulas coincide con varias especies conocidas de *Colubrina* de la sección *Serrataria* y además, la presencia de tricomas de base radial con células epidérmicas modificadas, hasta ahora descritos dentro de las Rhamnaceae para el género *Colubrina* y al no contar con datos de arquitectura foliar y superficies epidérmicas de *Hovenia* se decidió seguir utilizando el nombre de *C. celtidifolia*.

En el trabajo de Nesom (2023b) se describen cinco especies nuevas de *Colubrina* de las cuales sería interesante en un futuro poder contar con algunas hojas para poder corroborar las diferencias entre especies cercanas que el mismo autor cita, por ejemplo: *Colubrina lanceolata* Nesom (sp. nov.) es parecida a *C. triflora* difiere en el grosor de la hoja, glauca, se encuentra en BT deciduo

y *C. triflora* en matorral, la nueva especie prospera solo en Aguascalientes. *Colubrina mezquitalensis* Nesom (sp. nov.) similar a *Colubrina macrocarpa* en sus hojas bicoloras, densamente lanosas abaxialmente, márgenes foliares con pequeños dientes. *Colubrina neoviridis* Nesom (sp. nov.) similar a *Colubrina viridis* en su hábito arbustivo, ramificado con brotes cortos, hojas pequeñas y apretadas con márgenes enteros y pecíolos filiformes. *Colubrina subsessilis* Nesom (sp. nov.) similar a *Colubrina triflora* por sus márgenes fuertemente trinervados y poco dentados-aserrados, hojas escasamente pubescentes con ápice agudo-acuminado, hojas consistentemente más pequeñas, ovadas con base subcordada y pecíolos tomentosos de 2 a 5 mm de largo. *Colubrina tequila* Nesom (sp. nov.) similar a *Colubrina ehrenbergii* por las hojas gruesas y ovaladas con relativamente pocos dientes con puntas glandulares, así también es similar a *C. triflora* en la forma de las hojas y textura, tricomas persistente, conocida solo de la localidad tipo y *C. villarrealii* Nesom que parece estar ligada con *Colubrina texensis* var. *pedunculata* M.C. Johnston.

Así también, en el trabajo de Nesom (2023b, p. 2) se cita a *Colubrina asiatica* (L.) Brongn. que no fue considerada en este trabajo por ser es una planta introducida.

CONCLUSIONES

Se logró separar las diecisésis especies de *Colubrina* presentes en México. Es necesario revisar el subgénero *Serrataria*, debido a que la característica principal es la presencia de glándulas en los dientes del margen de las hojas; sin embargo, ninguna de las especies las presentó. El dendrograma muestra claramente las relaciones de afinidad entre las especies de *Colubrina*, destacando la separación entre las secciones *Cowaiana* y *Barcena* del subgénero *Colubrina*, así como la distinción del subgénero *Serrataria*. Dentro de este último subgénero, se evidencian dos agrupamientos entre las especies incluidas. Finalmente consideramos que es crucial revisar *Colubrina arborescens* y determinar si los ejemplares recolectados en el sureste de México y en Guatemala son taxones distintos a los de las Antillas.

LITERATURA CITADA

- Aguirre Claverán, R., & Arreguín Sánchez, M. (1988). Claves de familias, géneros, especies y variedades de Pteridofitas de Nuevo León. *An. Esc. Nac. Cienc. Biól.*(29), 29-41.
- Ash, , A., Ellis, , B., Hickey, , L. J., Johnson,, K. R., Wilf, P., & Wing, , S. L. (1999). Manual of Leaf Architecture - morphological description and categorization of dicotyledonous and net-veined monocotyledonous angiosperms by Leaf Architecture Working Group. 65 p.
- Azcárraga, Rosette, M., Bonfil Campos, A., Jácquez Ríos, M., & Sandoval Zapotitla, E. (2010). Atlas de Anatomía Vegetal. (F. d. Cuautitlán, Ed.) Ciudad de México, México: U.N.A.M. Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial.
- Chen, Y., & Schirarend, C. (2007). *Rhamnaceae* 12: 115-355. Obtenido de http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=10763
- Colares, M. N., & Arambarri, A. M. (2008). *Ziziphus mistol* (Rhamnaceae): Morfoanatomía y Arquitectura Foliar. *Lat. Am. J. Pharm.*, 27(4), 568-577.
- Cortés, F. (1982). Cuadernos de Histología Vegetal. Ed. Marban. Madrid, España.
- Dilcher, D. L. (1974). Approaches to the Identification of Angiosperm Leaf Remains. *Bot. Rev.*, 40(1), 1-157.
- Fernández N., R. (1993). La familia Rhamnaceae en México. Tesis de doctorado. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Instituto Politécnico Nacional.
- Fernández N., R. (1996). Rhamnaceae. Flora del Bajío y de Regiones adyacentes (Fascículo 43), 1-69.
- Fernandez N., R. (2010). Nombres comunes, etnobotánica y distribución geográfica del género *Colubrina* (Rhamnaceae) en México. *Revista Científica UDO Agrícola*, 10(1), 7-22.
- Fernández-Nava, R., Arreguin Sánchez, M. L., & Jorge Cruz, C. Y. (2024). Características taxonómicas de las especies de *Colubrina* (Rhamnaceae) en México, basadas en la

Recibido:
25/agosto/2024

Aceptado:
20/diciembre/2024

- arquitectura y superficies epidérmicas. *Polibotánica*(57), 1-22.
doi:10.18387/polibotanica.57.1
- Gola, G., Negri, G., & Cappelletti, C. (1965). Tratado de Botánica. Segunda edición. Ed. Labor, S. A. México.
- Hammer, O., Harper, D. T., & Ryan, P. D. (2001). Past. Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontología Electronica*, 4(1), 9. Obtenido de <https://past4.software.informer.com/4.3/>
- Hernández P., K., Fernández N., R., & Arreguin S., M. (2021). Arquitectura foliar y anatomía epidérmica de las especies mexicanas del género *Gouania* (Rhamnaceae). *Polibotánica*(52), 151-176.
- Hickey, L. J. (1973). Classification of the Architecture of Dicotyledonous Leaves. *Amer. J. Bot.*, 60(1), 17-33.
- Hickey, L. J. (1974). Clasificación de la arquitectura de las hojas de dicotiledoneas. *Bol. Soc. Argent. Bot.*, 16(1-2), 1-26.
- Hickey, L. J., & Wolfe, J. A. (1975). The Bases of Angiosperms Phylogeny: Vegetative Morphology. *Ann. Mo. Bot. Gard.*(62), 538-589.
- Johnston, M. (1963). Novelties in *Colubrina* including *Cormonema* and *Hybosperma*. *Wrightia*(3), 91-96.
- Johnston, M. (1971). Revision of *Colubrina* (Rhamnaceae). *Brittonia*(23), 2-53.
- Johnston, M. C. (1969). *Colubrina stricta* Engelmann ex M. C. Johnston (Rhamnaceae), new species from Texas, Nuevo Leon and Coahuila. *The Southwestern Naturalist*, 14(2), 257. doi:<https://doi.org/10.2307/3668886>
- 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.
- Meyer, R., & Meola, S. (1978). Morphological characteristics of leaves and stems of selected Texas Woody plants. *U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin*(1564), 1-200.
- Nesom, G. (2013). Taxonomic notes *Colubrina* (Rhamnaceae). *Phytoneuron*(4), 1-21.
- Nesom, G. L. (2023a). The American *Colubrina celtidifolia* (Rhamnaceae) is a member of the Asian genus *Hovenia*. *Phytoneuron*(18), 1-75.
- Nesom, G. L. (2023b). Taxonomic synopsis of *Colubrina* (Rhamnaceae) in Mexico. *Phytoneuron*(19), 1-123.
- Pool, A. (2015). Rhamnaceae. En: Flora Mesoamericana Ulloa U., C., G. Davidse, M. Sousa S., S. Knapp, and F. Chiang (eds.). Universidad Nacional Autónoma de México, Missouri Botanical Garden y The Natural History Museum. Vol. 2, part 3. Pp. 55-88.
- Schirarend, C. (1991). The Systematic Wood anatomy of the Rhamnaceae Juss. (Rhamnales). I. Tribu Zizipheae. *Iawa Bull. n.s.*, 12(4), 359-388.
- Shisode, S. B., & Patil, D. A. (2011). Petiolar anatomy in some Rhamnaceae. *Current Botany*, 2(9), 22-25.
- Standley, P. C. (1923). Rhamnaceae. Trees and Shrubs of Mexico. Contr. U.S. Nat. Herb. 23(6), 710-727.
- Wendt, T. (1983). Plantae Uxpanapae l. *Colubrina johnstonii* sp. nov. (Rhamnaceae). *Bol. Soc. Bot. Mex.*(44), 81-90.
- 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.

Tabla 3. Comparación de la arquitectura foliar y las superficies epidérmicas de las especies estudiadas del género *Colubrina*
Table 3. Comparison of leaf architecture and epidermal surfaces of the studied species of the genus *Colubrina*

| Especie | Primera categoría | Segunda categoría | Par de venas secundarias inferiores ramificadas/ no | Tercera categoría | Cuarta categoría | Alimentación diente | Con o sin glándulas posición | Células adaxiales | Células Abaxiales | Tipos de estomas | Base de los tricomas |
|----------------------------|---|---|---|---|------------------|---|--|--|--|-----------------------------------|---|
| 1.- <i>C. angustior</i> | Pinnada | Craspedódromas, con 6-7 pares de venas secundarias de cada lado | primer par basal ramificado | Reticuladas opuestas percurrentes, en el margen alimentan a los dientes | Reticuladas | Venas tercera categoría alimentan los dientes del margen, pueden o no formar arcos | Sin glándulas | Hexagonales, paredes rectas | Paredes onduladas | Anomo-cíticos Adaxial ausentes | Sin base radial de células epidémicas modificadas |
| 2.- <i>C. arborescens</i> | Pinnada | Craspedodroma 3-4 pares de venas secundarias de cada lado | Par inferior no ramificado | Reticuladas opuestas percurrentes | Reticuladas | Margen entero | Distribuidas en la superficie de la hoja | Pentagonales con paredes rectas | Rectangulares con paredes rectas | Anomo-cíticos ambas superficies | Base radial de células epidémicas modificadas |
| 3.- <i>C. californica</i> | Pinnada | Broquidódromas 3-4 arcos | Par inferior ramifica-do, arcos superiores enrollados | Reticuladas alternas percurrentes | Reticuladas | Margen entero | Sin glándulas | Pentagonales con paredes rectas | Pentagonal es con paredes rectas | Anomocíticos en ambas superficies | Base radial de células epidémicas modificadas |
| Especie | Primera categoría | Segunda categoría | Par de venas secundarias inferiores ramificadas/ o no | Tercera categoría | Cuarta categoría | Alimentación diente | Con o sin glándulas posición | Células adaxiales | Células Abaxiales | Tipos de estomas | Base de los tricomas |
| 4.- <i>C. celtidifolia</i> | Acródroma basal imperfecta con tres venas, las dos externas se ramifican hacia el | Cruzan entre las venas primarias anastomos ándose | | Polygonales reticuladas con o sin venas libres ramifica-das | | Las ramificaciones de las venas de primera categoría forman arcos y de ahí deriva una | Sin glándulas | Células hexagonales con paredes rectas | Células hexagonales con paredes rectas | Anomocíticos, abaxiales | Base radiada de células epidémicas modificadas |

| Especie | Primera categoría | Segunda categoría | Par de venas secundarias inferiores ramificadas/ no | Tercera categoría | Cuarta categoría | Alimentación diente | Con o sin glándulas posición | Células adaxiales | Células Abaxiales | Tipos de estomas | Base de los tricomas |
|---------------------------|---|--|---|-----------------------------------|--|--|--|---|----------------------------------|---|---|
| | margen formando arcos y de ellos sale una vena que entra al diente | | | | | vena que alimenta al diente | | | | | |
| 5.- <i>C. ehrenbergii</i> | Acródroma basal imperfecta con tres venas con ramificaciones libres | Recorren trayectos paralelos entre las venas primarias y sus ramificaciones libres | | Libres ramificadas | | | Glándulas en cada diente donde entra una vena de segunda categoría | Pentagonales con paredes rectas | Rectangulares con paredes rectas | Anomocíticos ambas superficies | Sin base radial de células epidémicas modificadas |
| 6.- <i>C. elliptica</i> | Pinnada | Broquidódroma con 3-4 arcos | No ramificados | Reticuladas alternas percurrentes | Reticuladas con o sin venas libres | Margen entero | Con dos glándulas basales | Pentagonal-hexagonales con paredes rectas | Rectangulares con paredes rectas | Anfíclolicíticos abaxial | Sin base radial de células epidémicas modificadas |
| 7.- <i>C. greggii</i> | Acródroma basal imperfecta con las tres venas primarias ramificadas | reticuladas | | Reticuladas alteñas percurrentes | | Ramificaciones de venas primarias forman arcos y una vena va al diente | Sin glándulas | Hexagonales paredes rectas | Hexagonales paredes rectas | Anomocíticos | Sin base radial de células epidémicas modificadas |
| 8.- <i>C. heteroneura</i> | Pinnada | Broquidódroma con 5-6 arcos | No ramificada | Reticulada alternas percurrentes | Reticuladas sin venas libres incluidas | Margen entero | Marginales basales | Arreglo irregular con paredes onduladas | Pentagonales con paredes rectas | Adaxial anisocítico y paracítico, abaxial | Sin tricomas |

| Especie | Primera categoría | Segunda categoría | Par de venas secundarias inferiores ramificadas/ no | Tercera categoría | Cuarta categoría | Alimentación diente | Con o sin glándulas posición | Células adaxiales | Células Abaxiales | Tipos de estomas | Base de los tricomas |
|---------------------------|---|--|---|------------------------------------|--|---|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|---|
| | | | | | | | | | | aniso-cíticos y anomotetracíticos | |
| 9.- <i>C. johnstonii</i> | Pinnada | Broquidódroma con 6-7 arcos | No se ramifica | Reticuladas alternas percurrentes | Reticuladas con una o varias venas ramificadas | Margen entero | Un par basales marginales | Pentagonal paredes rectas | Irregulares paredes ondula-das | Aniso-cítico abaxial | Sin base radial de células epidémicas modificadas |
| 10.- <i>C. lanulosa</i> | Pinnada | Craspedódromas, par inferior lateral ramificadas con 5-8 pares de venas secundarias de cada lado | Con ramificaciones | Reticuladas, alternas percurrentes | Reticuladas sin venas incluidas o de tenerlas solo una | Venas de segunda y tercera categoría alimentan los dientes del margen | Sin glándulas | Forma irregular paredes rectas | Forma irregular paredes rectas | Anomo-cíticos y anomotetracíticos abaxial | Base radial con células epidémicas modificadas |
| 11.- <i>C. macrocarpa</i> | Acródroma basal imperfecta con las tres venas primarias ramificadas | Reticuladas | | Reticuladas, incluyen venas libres | | Venas de segunda y tercera categoría alimentan los dientes del margen | Sin glándulas | Rectangulares paredes rectas | Forma irregular paredes rectas | Aniso-cíticos y pericítico abaxial | Base radial con células epidémicas modificadas |
| 12.- <i>C. stricta</i> | Pinnada | Craspedódromas con 5-6 pares de venas | primer par basal no ramificado | Reticuladas, alternas percurrentes | Reticuladas con 1 vena no ramificada | Venas de tercera categoría alimentan | Sin glándulas | Hexagonales paredes rectas | Hexagonales paredes rectas | Anomo-tetra-cíticos Abaxial | Base radial con células epidérmicas |

| Especie | Primera categoría | Segunda categoría | Par de venas secundarias inferiores ramificadas/ no | Tercera categoría | Cuarta categoría | Alimentación diente | Con o sin glándulas posición | Células adaxiales | Células Abaxiales | Tipos de estomas | Base de los tricomas |
|---------------------------|---|---|---|-----------------------------------|---|--|--|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | | secundarias de cada lado | | | | los dientes del margen | | | | | cas modificadas |
| 13.- <i>C. texensis</i> | Pinnada | Craspedódromas con 3-4 venas | Primer par basal ramificado | Reticuladas alternas percurrentes | Reticuladas con venas 2 o más ramificadas | Venas de segunda categoría y muy pocas de tercera alimentan los dientes del margen | Sin glándulas | Con paredes onduladas | Con paredes onduladas | Anomocítico Abaxial | Base radial con células epidérmicas modificadas |
| 14.- <i>C. triflora</i> | Acródroma basal imperfecta con tres venas | Recorren entre las venas de primera categoría y sus ramificaciones, reticuladas | Ramificadas | Reticuladas con venas libres | | Ramificaciones de venas primarias forman arcos y una vena de segunda categoría entra al diente | Presentes en cada diente | Pentagonales con paredes rectas | Pentagonales con paredes rectas | Anomocíticos en ambas superficies | Sin tricomas |
| 15.- <i>C. viridis</i> | Pinnada | Broquidódroma con 3 a 4 arcos | No ramificada | Reticuladas alternas percurrentes | Reticuladas con venas ramificadas | Margen entero | Glándulares esparcidas en la lámina foliar | Rectangulares paredes rectas | Forma irregular paredes onduladas | Anomotracítico en ambas superficies | Sin tricomas |
| 16.- <i>C. yucatensis</i> | Pinnada | Craspedódromas, con 6 a 7 pares de venas secundarias de cada lado | primer par basal ramificado | Reticuladas opuestas percurrentes | Reticuladas sin venas libres incluidas | Venas tercera categoría alimentan los dientes del margen a veces forman arcos | Sin glándulas | Poligonales, paredes rectas | Forma irregular, paredes onduladas | Anomocítico Abaxial | Base radial con células epidémicas modificadas |

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

DIVERSIDAD FLORÍSTICA Y ATRIBUTO SOCIOECONÓMICO DE LOS HUERTOS FAMILIARES DE SANTA MARÍA TEMAXCALAPA, VILLA ALTA, OAXACA, MÉXICO

FLORISTIC DIVERSITY AND SOCIOECONOMIC ATTRIBUTE OF FAMILY GARDENS IN SANTA MARIA TEMAXCALAPA, VILLA ALTA, OAXACA, MEXICO

Aquino Vásquez, C.; C. Vásquez Santiago y J. Martínez López

DIVERSIDAD FLORÍSTICA Y ATRIBUTO SOCIOECONÓMICO DE LOS HUERTOS
FAMILIARES DE SANTA MARÍA TEMAXCALAPA, VILLA ALTA, OAXACA,
MÉXICO

FLORISTIC DIVERSITY AND SOCIOECONOMIC ATTRIBUTE OF FAMILY
GARDENS IN SANTA MARIA TEMAXCALAPA, VILLA ALTA, OAXACA, MEXICO



Diversidad florística y atributo socioeconómico de los huertos familiares de Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca, México

Floristic diversity and socioeconomic attribute of family gardens in Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca, Mexico

Ciro Aquino Vásquez;
Cecilia Vásquez Santiago
y Joel Martínez López

**DIVERSIDAD FLORISTICA
Y ATRIBUTO
SOCIOECONÓMICO DE
LOS HUERTOS
FAMILIARES DE
SANTA MARÍA
TEMAXCALAPA, VILLA
ALTA, OAXACA, MÉXICO**

**FLORISTIC DIVERSITY
AND SOCIOECONOMIC
ATTRIBUTE OF FAMILY
GARDENS IN SANTA
MARIA TEMAXCALAPA,
VILLA ALTA, OAXACA,
MEXICO**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 43-61. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polbotanica.59.1](https://doi.org/10.18387/polbotanica.59.1)

Ciro Aquino Vásquez. Autor de correspondencia: avciro@unsij.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-2106-2721>

*Universidad de la Sierra Juárez. Sistema de Universidades del Estado de Oaxaca
Avenida Universidad S/N, Ixtlán de Juárez, C.P. 68725, Oaxaca, México*

Cecilia Vásquez Santiago <https://orcid.org/0009-0005-1346-4175>

*Taller Jacobo & María Ángeles. Gerencia de campo
Libres 5, Col. Centro, San Martín Tilcajete, C.P. 71506, Oaxaca, México*

Joel Martínez López <https://orcid.org/0000-0002-8957-6916>

*Universidad de la Sierra Juárez. Sistema de Universidades del Estado de Oaxaca
Avenida Universidad S/N, Ixtlán de Juárez, C.P. 68725, Oaxaca, México*

RESUMEN: Los huertos familiares constituyen un elemento esencial de la economía campesina de las comunidades rurales, aprovechando las oportunidades que les provee los recursos naturales donde viven. El objetivo de la investigación fue identificar la diversidad florística y mostrar el atributo socioeconómico de los huertos familiares de la comunidad de Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca. Se obtuvo una muestra de 28 parcelas para la diversidad florística en sitios de 400 m², se aplicó el índice de diversidad de Margalef y el coeficiente de similitud de Jaccard; para el atributo socioeconómico se aplicó una encuesta al igual número de productoras y productores (28) para obtener la relación costo/beneficio del café. Los resultados obtenidos para el índice de diversidad de Margalef (Índice Mg) en dos gradientes altitudinales: bajo (832 a 1,021 msnm) y medio (1,022 a 1,211 msnm), 25 huertos presentaron una diversidad florística media; mientras que en el gradiente altitudinal alto (1,212 a 1,400 msnm), solo 3 huertos presentaron un índice menor a dos, lo que indica zonas de diversidad baja. El coeficiente de similitud de los huertos fue de 65.3% al considerar el rango altitudinal bajo y medio, mientras que de 23.4% para el gradiente bajo y alto, y 23.9% para medio y alto; la diversidad está integrada por 45 familias, 65 géneros y 76 especies; en la relación beneficio/costo se obtuvo un valor de 0.55, lo que indica que no existe rentabilidad del café debido al problema de la roya causado por el hongo *Hemileia vastatrix* B. & Br. En conclusión, la riqueza de especies está relacionado a las características físico-ambientales que posee cada gradiente altitudinal del área de estudio, las categorías de uso de las plantas están definidas por el conocimiento que poseen las personas de dichas especies, y la producción de café es el que aporta un sustento económico a las unidades de producción familiar.

Palabras clave: diversidad florística, huerto familiar, unidad de producción.

ABSTRACT: Home gardens constitute an essential element of the peasant economy in rural communities, taking advantage of the opportunities provided by the natural resources where they live. The objective of the research was to identify the floristic diversity and show the socioeconomic attribute of the family gardens of the community of Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca. A sample of 28 plots was obtained for floristic diversity in 400 m² sites, using the Margalef's diversity index and the Jaccard's

similarity coefficient; for the socioeconomic attribute, a survey was applied to the same number of producers (28) to obtain the cost/benefit relationship of coffee. The results obtained for the Margalef diversity index (Mg Index) in two altitudinal gradients: low (832 to 1,021 meters above sea level) and medium (1,022 to 1,211 meters above sea level), 25 orchards presented a medium floristic diversity; while in the high altitudinal gradient (1,212 to 1,400 meters above sea level), only three orchards presented an index lower than two, indicating areas of low diversity. The similarity coefficient of the orchards was 65.3% when considering the low and medium altitudinal range, while 23.4% for the low and high gradient, and 23.9% for medium and high; the diversity is integrated by 45 families, 65 genera and 76 species; in the benefit/cost ratio a value of 0.55 was obtained, which indicates that coffee is not profitable due to the rust problem (*roya*) caused by the fungus *Hemileia vastatrix*. In conclusion, the species richness is related to the physical-environmental characteristics that each altitudinal gradient of the study area has, the categories of plant use are defined by the knowledge that people have of said species, and coffee production it's one that provides economic support to family production units.

Key words: floristic diversity, home garden, production unit.

INTRODUCCIÓN

Los huertos familiares (HF) son diseños de los sistemas agroforestales que sustentan el uso combinado de la tierra «con árboles y arbustos multipropósito en asociación con cultivos agrícolas anuales y perennes, e incluso animales, se desarrollan alrededor de las viviendas manejados con mano de obra familiar» (Huai & Hamilton, 2009; Torquebiau, 1992). Los HF son sistemas tradicionales alternativos a la agricultura extensiva y monocultivo; son espacios divididos por zonas, a veces eficientemente aprovechadas y de diferente composición florística (Méndez *et al.*, 2001).

Las plantas cultivadas y colectadas en estos sistemas de producción tradicional constituyen la base alimentaria que satisface —parte— de las necesidades directas de las familias campesinas (Tina *et al.*, 2009). Los tipos de sistemas agroforestales proveen múltiples productos a lo largo del año, principalmente alimentos, plantas medicinales, ornamental, cercos vivos y forraje (Méndez, 2020; Rendón & Casas, 2021), así como otros productos: leña, madera y flores, entre otros. En México, las plantas derivadas de los HF son utilizadas para una diversidad de propósitos, entre los que se incluyen: usos medicinales, comestibles, colorantes, aromatizantes, maderables, combustibles, artesanales, forrajes, adhesivos y otros usos diversos (Caballero *et al.*, 1998).

La funcionalidad de un HF se debe a que este crea una interdependencia biológica, ejemplo de ello son las leguminosas que sustituyen a los fertilizantes como abonos verdes, ahorrando recursos económicos y evitando el uso de grandes cantidades de contaminantes tanto al suelo como al agua (Gutiérrez & Fierro, 2006). En la función socioeconómica, los HF contribuyen a proporcionar fuentes de trabajo e ingresos económicos para las unidades de producción familiar (Tina *et al.*, 2009).

Ante la presión a la que están sometidos los recursos naturales, la pérdida de especies, conocimientos y saberes acerca de las plantas se necesitan alternativas para la conservación de ecosistemas. En este caso se refiere a los huertos familiares, que a través de la intervención del hombre en algunos lugares (bosque tropical de la Península de Yucatán) se ha logrado mantener una mayor diversidad de especies arbóreas útiles (Rico & García, 1991). Por lo que, es importante conocer el atributo económico, como es la relación beneficio-costo generado en su producción. Los huertos familiares ubicados en comunidades campesinas y originarias son poseedores de una riqueza enorme de diversidad cultural y biológica, resultado del esfuerzo domesticador del campesino. En este sentido, algunos estudios de caso muestran que grupos indígenas poseen una diversidad de prácticas locales o tradicionales para la gestión de los ecosistemas (Berkes *et al.*, 2000), en este caso una de las estrategias son los HF, dada la rotación de recursos que realizan. En el sureste mexicano, diversos estudios señalan la importancia de los huertos familiares como espacio de conservación para la biodiversidad, agrobiodiversidad y el conocimiento tradicional (Mariaca, 2012; Philip *et al.*, 2014; Solarte *et al.*, 2022). Los huertos familiares se han abordado desde distintas perspectivas, a través del estudio de solares o traspatios (Millat-e-Mustafa, 1996;

Montagnini, 2006; Vásquez & Lope-Alzina, 2012; Vogl *et al.*, 2004). La literatura al respecto —aunque en México son insuficientes— coinciden en resaltar su importancia como escenario de procesos de domesticación, diversificación y producción en las zonas rurales del mundo, que funcionan como una fuente permanente de productos con valor de uso y de cambio que complementan la dieta e ingresos de las familias campesinas (González, 2012; Lope-Alzina, 2012; Mariaca, 2012; Vásquez & Lope-Alzina, 2012; Vogl *et al.*, 2004).

Los huertos constituyen una de las actividades implementadas en el sector agropecuario y forestal, por lo regular se encuentra uno en cada casa-habitación rural, aunque en menor medida y con diferentes características en hogares urbanos y suburbanos (Mariaca, 2012; Vogl *et al.*, 2004). En México, algunos resultados obtenidos de la diversidad florística de huertos familiares, en el caso de la región de la Chontalpa del estado de Tabasco, encontraron 330 especies vegetales en los tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo (Chablé *et al.*, 2015); en la comunidad totonaca de Caxhuacan, Puebla, se identificaron 357 especies pertenecientes a 263 géneros y 102 familias botánicas (Castañeda *et al.*, 2020); mientras que en la comunidad de San Juan Atzingo, Estado de México se registraron 287 especies perennes de plantas, principalmente de uso ornamental (58%), medicinal (21%) y alimentario (19%) (Cano *et al.*, 2012), y finalmente, en dos comunidades mayas yucatecas, Tixpeual y Tixcacaltuyub, Yucatán, México, registraron 135 y 133 especies, respectivamente, de árboles y arbustos (Rico & García, 1991).

En Oaxaca, se han realizado diversos trabajos sobre huertos familiares, algunas investigaciones se encuentran en la región de Tuxtepec (Martínez, 1970); en el Istmo, en San Mateo del Mar con los huaves (Zizumbo & Colunga, 1982); en huertos familiares en la región Costa se encontraron 106 especies vegetales pertenecientes a 47 familias botánicas (Méndez, 2020); estudios sobre plantas medicinales en el distrito de Ocotlán (Servín & Gutiérrez, 1990); estudio etnobotánico y ecológico en San Andrés Paxtlán, Miahuatlán, Oaxaca (Zurita *et al.*, 2020); los huertos familiares y seguridad alimentaria en Cuilápam de Guerrero, Oaxaca, donde se encontraron 120 especies (De la Rosa *et al.*, 2014). En la Sierra Norte de Oaxaca se han hecho algunos trabajos sobre sistemas agroforestales, uno de estos, es un estudio socioeconómico, cultural, de uso y biológico, encontrándose 121 especies vegetales en los huertos familiares zapotecos en San Miguel Talea de Castro (Manzanero *et al.*, 2009); la importancia de las plantas medicinales del estado de Oaxaca (Rosales *et al.*, 2023); campesinidad y socialización en las huertas familiares de las mujeres zapotecas de la Sierra Norte de Oaxaca (Vásquez & Manzanero, 2015); recursos forestales no maderables en dos comunidades zapotecas de la Sierra Juárez de Oaxaca (Martínez *et al.*, 2016); variación estacional en la diversidad de floración de orquídeas en Santa Catarina Lachatao, Oaxaca, México (Muñoz *et al.*, 2020); y, conocimiento tradicional y valor de uso de plantas de agroecosistemas en la Sierra Norte de Oaxaca (Pascual *et al.*, 2020).

El objetivo de la presente investigación fue identificar la diversidad florística de los huertos familiares y el atributo socioeconómico asociado a la producción de café, dado que este último contribuye con ingresos económicos para el sustento familiar, por ello, se aplicó la relación beneficio/costo a información proporcionada por la Organización de Cafetaleros Cerro Alto S.P.R. de R.L., de Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Santa María Temaxcalapa es una comunidad agraria y a la vez municipio perteneciente al distrito de Villa Alta que se localiza al noreste de la capital del estado de Oaxaca en la región Sierra Norte (Figura 1), en las coordenadas 17°22'51.5" latitud y 96°09'44.3" longitud, a una altitud promedio de 1,102 msnm (Pérez & Ramón, 2020). La población pertenece a la etnia zapoteca, el 96% de la población de 5 años y más, habla su lengua nativa. En 2020, la población en Santa María Temaxcalapa fue de 903 habitantes, de los cuales 461 son mujeres y 442 son hombres. De acuerdo con datos de INEGI (2020), con respecto al 2010, la población de Temaxcalapa decreció un -6.71%.

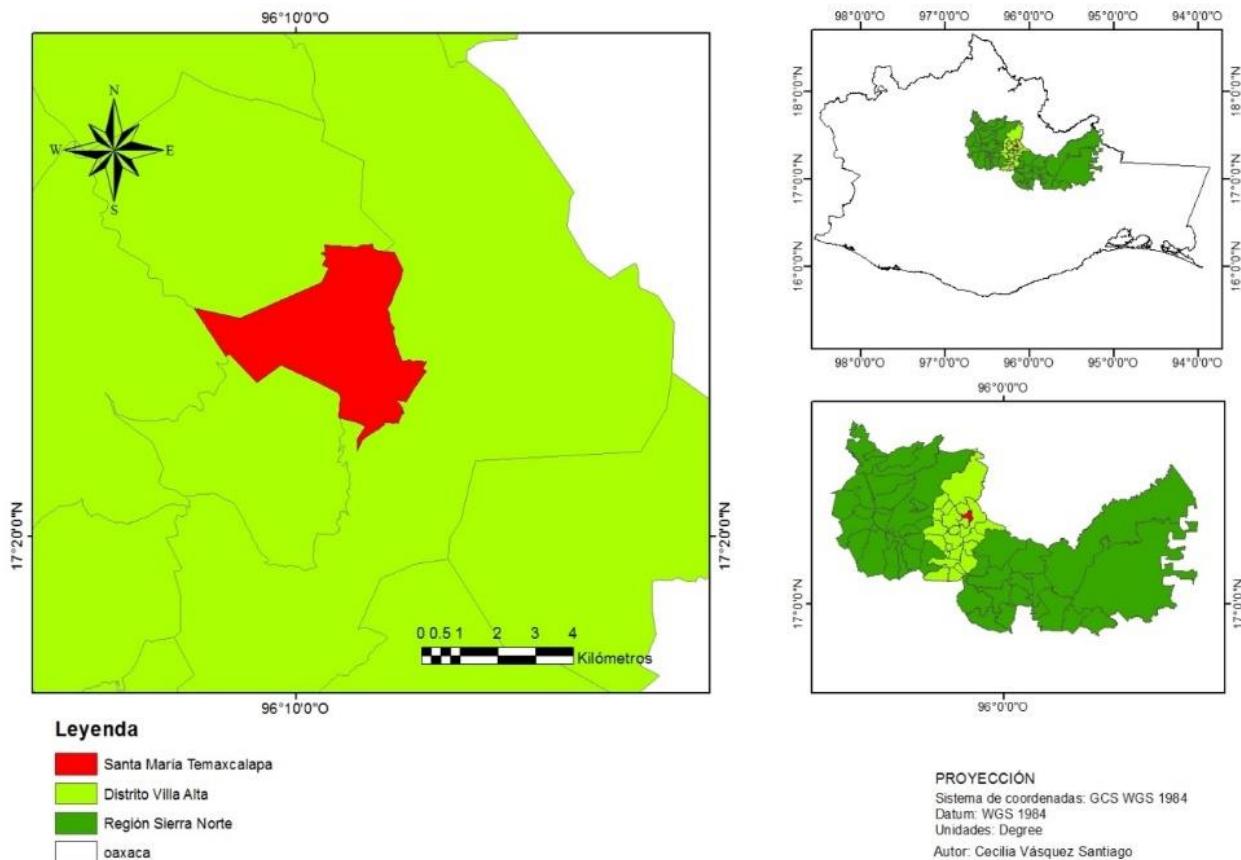


Figure 1. Geographic location of the municipality of Santa María Temaxcalapa, Oaxaca, Mexico.

Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Santa María Temaxcalapa, Oaxaca, México.

El clima se caracteriza por ser cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (84.12%) y semicálido húmedo con abundantes lluvias en invierno (15.88%).

Cuenta con una vegetación en la parte alta de bosque de pino-encino, mientras que en el bosque mesófilo de montaña (BMM) predomina *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar) y *Pinus chiapensis* (Pennington & Sarukhán, 2005); en partes bajas se encuentra el bosque tropical perennifolio compuesto por: *Bursera simaruba* (palo mulato), *Lysiloma divaricatum* (tepeguaje), *Enterolobium cyclocarpum* (huanacaxtle), *Cedrela odorata* (cedro rojo) e *Inga edulis*; y algunos árboles frutales de café, plátano, mamey y cítricos.

Muestreo para la diversidad florística y atributo socioeconómico

La investigación se desarrolló en huertos familiares de la localidad Santa María Temaxcalapa. Dado que una de las actividades productivas es la producción de café (en varios casos, asociados a otras plantas de interés para la población) se decidió realizar esta investigación en esta localidad. El tamaño de muestra se obtuvo empleando la fórmula de varianza máxima obteniendo un valor de 28 huertos familiares (Abdoellah *et al.*, 2020), de un total de 78 HF pertenecientes a la Organización de Cafetaleros Cerro Alto S.P.R. de R.L. y de un total de 170 productoras y productores constituidos en unidades de producción en todo el municipio.

$$n = \frac{NZ^2 P(1-P)}{Nd^2 + Z^2 p(1-p)}$$

Dónde: n = número de muestras; N = número de viviendas con huertos en la zona de estudio (78); Z = valor de una distribución normal $Z\alpha/2$ (1.96) para un nivel de confianza de 95%; p = probabilidad de éxito (0.5); y d = error de muestreo (15%).

Para el trabajo en campo se trazaron sitios cuadrados de 400 m² en el centro de cada huerto donde se realizó el inventario para registrar las especies vegetales presentes (Lope-Alzina, 2012; Mariaca, 2012); la superficie promedio de los huertos va de los 500 a 2500 m², además de cuantificar el número de individuos de cada especie (arbóreo y herbáceo) para el cálculo del índice de Margalef y el coeficiente de similitud de Jaccard.

La colecta de muestras para la identificación botánica se realizó en los meses de febrero a octubre del año 2020 y se colectó de tres a cuatro ejemplares por sitio. Los materiales que se llevaron a las parcelas para la colecta de muestras fueron: prensa botánica, periódicos, cuerdas y libreta de campo; enseguida se procedió el acomodo para su traslado al herbario de la Universidad de la Sierra Juárez. En el laboratorio se realizó el secado correspondiente de tres a cinco días, posteriormente se realizó la identificación.

Determinación taxonómica de las especies

En la identificación taxonómica se utilizó una caja Petri, agujas de disección, bisturí y un microscopio estereoscópico. Para la determinación a nivel familia se utilizó la clave taxonómica (www.abatax.abaco2.org/clavesTax_lista_ver.php9). Se consultaron artículos y libros (Fragoso, 2022; García *et al.*, 2021; Nee, 1986; Standley & Standley, 1920; Universidad Nacional Autónoma de México, 1993). Con la finalidad de corroborar las especies se consultaron sitios web especializadas para la verificación de las especies como Trópicos (www.tropicos.org) y The plant list (www.theplantlist.org), así como el portal de Datos Abiertos UNAM Colecciones Universitarias (en línea), disponible en: <https://datosabiertos.unam.mx/biodiversidad>; aunado a ello se validó información de algunas especies con los listados florísticos (Martínez, 1970; Meave *et al.*, 2017; Reko, 1949; Romero *et al.*, 2000; Rzedowski, 1996; Villaseñor, 2004).

Categorías de uso

El registro de las plantas se realizó de acuerdo con las categorías de uso considerando algunas mencionadas por Caballero *et al.*, 1998; Cárdenas, 2002; Martínez *et al.*, 2012; Martínez *et al.*, 2016; Martínez *et al.*, 2022; Padilla, 2008; Sánchez *et al.*, 2001). Las categorías de uso y sus descripciones son las siguientes (Tabla 1):

Table 1. Categories of plant use in home gardens.
Tabla 1. Categorías de uso de plantas en huertos familiares.

| Categorías de uso | Característica | Autor(es) |
|-------------------|--|--|
| Comestibles | Plantas o partes que se consumen crudas o cocidas (como alimento principal o condimento), o bebidas | (Cárdenas, 2002) |
| Medicinales | Especies empleadas para prevenir, aliviar o curar cualquier enfermedad o malestar físico, fisiológico, emocional o espiritual | (Cárdenas, 2002) |
| Ornamental | Especies con uso actual o potencial en la decoración de espacios en casas y jardines | (Cárdenas, 2002) |
| Combustibles | Especies arbórea o arbustivas cuyos tallos y ramas son utilizadas como leña o para elaborar carbón | (Martínez <i>et al.</i> , 2012) |
| Maderable | Son especies de las que se obtiene madera para usos no tradicionales como la madera en rollo terciada | (Padilla, 2008) |
| Uso doméstico | Especies que se emplean para la elaboración de utensilios, fibras o que proveen materiales de uso común en la casa, tanto para la cocina, aseo en general como aquellas que producen jabones y con las que se fabrican escobas | (Padilla, 2008) |
| Rituales | Especies o partes de plantas que son usadas como adorno en iglesias, atrios, calles, fiestas, celebraciones tradicionales y actos de valor espiritual-religioso | (Martínez <i>et al.</i> , 2016) (Martínez <i>et al.</i> , 2022) |

| | | |
|-------------------------|---|---------------------------------|
| Construcción | Las especies que sirven para la edificación de viviendas, cobertizos o cercas, como horcones, vigas, postes, techos, “amarres”, entre otros | (Martínez <i>et al.</i> , 2012) |
| Cerco vivo y protección | Plantas que son usadas como cerco vivo o que sus ramas sirven para la protección de algunas zonas | (Padilla, 2008) |
| Sombra | Plantas empleadas para recreación y sombra fresca | (Sánchez <i>et al.</i> , 2001) |

Todas las plantas registradas en la presente investigación se graficaron de acuerdo con la categoría de uso más representativa, incluyen los nombres científicos y comunes, de la misma forma se representaron las familias botánicas.

Análisis de los datos

Índice de diversidad de Margalef

En el análisis de la riqueza florística de los HF se utilizó el índice de diversidad de Margalef, la cual es una medida utilizada en ecología para estimar la biodiversidad de una comunidad con base en la distribución numérica de los individuos de las diferentes especies en función del número de individuos existentes en la muestra analizada (Flos, 2005). Para su cálculo se empleó la siguiente formula:

$$DMg = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Donde:

S = número de especies presentes.

N = número total de individuos (pertenecientes a todas las especies).

Ln = logaritmo natural.

Valores inferiores a dos son considerados zonas de baja biodiversidad y valores superiores a cinco son indicativos de alta biodiversidad. En Santa María Temaxcalapa se midió la riqueza de especies por tres gradientes altitudinales: bajo (832 a 1,021 msnm), medio (1,022 a 1,211) y alto (1,212 a 1,400) con la finalidad de conocer la diversidad de los huertos con relación en la altitud. Este tomó como base el estudio realizado en Guerrero, México para identificar patrones de riqueza y diversidad de especies vegetales en un gradiente altitudinal (Ávila *et al.*, 2018), y menciona que una forma de comparar la diversidad es por gradiente altitudinal con el objetivo de determinar tanto patrones de riqueza como diversidad de especies vegetales.

Coeficiente de similitud de Jaccard

Se calculó el Coeficiente de similitud de Jaccard en tres gradientes altitudinales: bajo, medio y alto. El coeficiente expresa el grado en que dos muestras son semejantes por las especies presentes en ellas, se refiere al cambio de especies entre dos sitios (Magurran, 2003). El intervalo de valores para el índice de Jaccard va de 0, cuando no hay especies compartidas entre ambos sitios; hasta 1, cuando dos sitios tienen la misma composición de especies. Este coeficiente se obtuvo según la siguiente expresión:

$$I_J = \frac{C}{(A + B) - C}$$

Donde:

A = número de especies presentes en el sitio A

B = número de especies presentes en el sitio B

C = número de especies presentes en ambos sitios A y B.

En la estimación del coeficiente de similitud fueron consideradas las especies encontradas dentro de los sitios de 400 m² de los HF muestreados. El interés particular está enfocado en determinar el grado de asociación entre huertos.

Atributo económico

Por cuestiones de información disponible por parte de las productoras y productores de café, únicamente se aplicó el indicador de rentabilidad de la relación beneficio-costo para la producción de café, a través de la siguiente fórmula (Ramírez *et al.*, 2008):

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{i=0}^n \frac{I}{(1+i)^n}}{\sum_{i=0}^n \frac{C}{(1+i)^n}},$$

Donde los escenarios a considerar son: a) $B/C > 1$, se recuperan los costos con un margen de ganancia; b) $B/C = 1$, sólo se recuperan los costos, pero no se obtiene ganancia ni pérdida, y c) $B/C < 1$, hay pérdidas, es decir, ni siquiera se recuperan los costos. Las variables consideradas en los costos de producción del manejo de café son: producción de plántula, siembra, control de maleza, control de plagas, podas, aplicación de abonos orgánicos y cosecha. Al resto de las especies no se aplicó la relación beneficio-costo dado que su consumo solo es familiar.

RESULTADOS**Diversidad florística**

De los tres componentes biológicos incluidos en la investigación: árboles, arbustos y herbáceas, se encontró que las especies de cultivo están dispersas, es decir, no existe un arreglo espacial definido en los huertos familiares.

Se registraron 6,762 individuos, que pertenecen a 45 familias y 76 especies. Las familias más representativas fueron Fabaceae con 7 especies, Solanaceae con 6, Rutaceae con 5, Asteraceae con 4, Commelinaceae con 3 y Rosaceae con 2 especies.

Otras familias presentes en los huertos, pero en menor proporción, son las mostradas en la Tabla 2. Una de las razones por las que se encontró una menor cantidad de especies de estas familias se refiere a que en la fecha (febrero-julio) en que se tomaron los datos de campo, se realizan actividades de “chaporro” en las parcelas.

Tabla 2. Botanical Families Present in HF of Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico
Tabla 2. Familias botánicas presentes en HF de Santa María Temaxcalapa, Oax., México

| Familias | | |
|-----------------|------------------|----------------|
| Rubiaceae | Bixaceae | Menispermaceae |
| Lamiaceae | Burseraceae | Musaceae |
| Meliaceae | Cactaceae | Orchidaceae |
| Myrtaceae | Campanulaceae | Oxalidaceae |
| Piperaceae | Cecropiaceae | Arecaceae |
| Tiliaceae | Chrysobalanaceae | Poaceae |
| Urticaceae | Crassulaceae | Polypodiaceae |
| Bromeliaceae | Cyperaceae | Proteaceae |
| Adoxaceae | Ebenaceae | Ranunculaceae |
| Anacardiaceae | Euphorbiaceae | Sapindaceae |
| Annonaceae | Fagaceae | Sapotaceae |
| Araliaceae | Hamamelidaceae | |
| Begoniaceae | Lauraceae | |

Las familias botánicas están representadas en 65 géneros, los más abundantes son: *Solanum* (6.15%), *Citrus* (6.15%), *Inga* (4.62%), *Coffea*, *Helicarpus* y *Piper* con el 3.08%, respectivamente.

En función del uso que los integrantes de las UPF realizan de las plantas identificadas se generó un listado de especies, de acuerdo con los siguientes componentes: arbóreo, arbustivo y herbáceo. De las principales especies arbóreas que funcionan como fijadoras de nitrógeno, se encontraron un total de 6. La especie con mayor abundancia fue: yatolito (*Inga vera* Will.) con 247 individuos y cuajinicuil (*Inga jinicuil* Schltdl. & Cham.) con 11 individuos (Tabla 3).

Table 3. Nitrogen-fixing plant species present in HF of Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico**Tabla 3.** Especies de plantas fijadoras de nitrógeno presentes en HF de Santa María Temaxcalapa, Oax., México

| Núm. | Familia | Nombre común | Nombre científico | Abundancia |
|------|----------|------------------|---|------------|
| 1 | Fabaceae | Yatolito | <i>Inga vera</i> Willd. | 247 |
| 2 | Fabaceae | Cuajinicuil | <i>Inga jinicuil</i> Schltdl. & Cham. | 11 |
| 3 | Fabaceae | Tepeguaje | <i>Lysiloma acapulcensis</i> (Kunth) Benth. | 6 |
| 4 | Fabaceae | Guachipilín | <i>Diphysa americana</i> Benth. | 5 |
| 5 | Fabaceae | Guanacastle | <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb. | 4 |
| 6 | Fabaceae | Yatolito de toro | <i>Inga oerstediana</i> Benth. | 1 |

Las especies utilizadas para sombra en café y cítricos se encontraron un total de 16 que están presentes en los huertos, estas son: plátano (*Musa acuminata* Colla) con 295 individuos, yatolito (*Inga vera* Willd.) con 247 individuos, siempre verde (*Trichilia havanensis* Jacq.) con 43 individuos, tejonote (*Helicocarpus appendiculatus* Turcz.) con 25 individuos, cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) con 16 individuos, cuajinicuil (*Inga jinicuil* Schltdl. & Cham.) con 11 individuos, y otros que se mencionan en la Tabla 4.

Table 4. Shade species present in HF of Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico**Tabla 4.** Especies de sombra presentes en HF de Santa María Temaxcalapa, Oax., México

| Núm. | Familia | Nombre común | Nombre científico | Abundancia |
|------|------------------|------------------|--|------------|
| 1 | Musaceae | Plátano | <i>Musa acuminata</i> Colla | 295 |
| 2 | Fabaceae | Yatolito | <i>Inga vera</i> Willd. | 247 |
| 3 | Meliaceae | Siempre verde | <i>Trichilia havanensis</i> Jacq. | 43 |
| 4 | Tiliaceae | Tejonote | <i>Helicocarpus appendiculatus</i> Turcz. | 25 |
| 5 | Meliaceae | Cedro rojo | <i>Cedrela odorata</i> L. | 16 |
| 6 | Fabaceae | Cuajinicuil | <i>Inga jinicuil</i> Schltdl. & Cham. | 11 |
| 7 | Chrysobalanaceae | Zapotillo | <i>Couepia polyandra</i> (Kunth) Rose. | 11 |
| 8 | Fabaceae | Tepeguaje | <i>Lysiloma acapulcensis</i> (Kunth) Benth. | 6 |
| 9 | Fabaceae | Guachipilín | <i>Diphysa americana</i> Benth. | 5 |
| 10 | Fabaceae | Guanacastle | <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb. | 4 |
| 11 | Burseraceae | Palo mulato | <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. | 4 |
| 12 | Sapindaceae | Pipe | <i>Sapindus saponaria</i> L. | 4 |
| 13 | Fabaceae | Yatolito de toro | <i>Inga oerstediana</i> Benth. | 1 |
| 14 | Araliaceae | Palo de agua | <i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Planch. et Decne. | 1 |
| 15 | Fagaceae | Encino rojo | <i>Quercus</i> sp. | 1 |
| 16 | Hamamelidaceae | Liquidámbar | <i>Liquidambar macrophylla</i> Oerst. | 1 |

Además, las plantas que aprovechan las UPF como combustible se encontraron 17 especies. La leña se genera al realizar actividades de manejo como podas y anillamientos para regular la sombra del café, las especies que presentaron mayor abundancia fueron *Coffea arabica* L. con 1,783 individuos, café mejorado entre las que se encuentran las variedades: café Oro Azteca, Marellesa, Garnica, Caturra y Sarchimor (*Coffea* spp.) con 1,180 individuos e *Inga vera* Willd. con 247 individuos, entre otros (Tabla 5).

Tabla 5. Species used as fuel in HF of Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico**Tabla 5.** Especies usadas como combustible en HF de Santa María Temaxcalapa, Oax., México

| Núm. | Familia | Nombre común | Nombre científico | Abundancia |
|------|------------------|------------------|---|------------|
| 1 | Rubiaceae | Café criollo | <i>Coffea arabica</i> L. | 1,783 |
| 2 | Rubiaceae | Café mejorado | <i>Coffea</i> spp. | 1,180 |
| 3 | Fabaceae | Yatolito | <i>Inga vera</i> Willd. | 247 |
| 4 | Meliaceae | Siempre verde | <i>Trichilia havanensis</i> Jacq. | 43 |
| 5 | Tiliaceae | Tejonote | <i>Heliocarpus appendiculatus</i> Turcz. | 25 |
| 6 | Meliaceae | Cedro rojo | <i>Cedrela odorata</i> L. | 16 |
| 7 | Fabaceae | Cuajinicuil | <i>Inga jinicuil</i> Schltdl. & Cham. | 11 |
| 8 | Chrysobalanaceae | Zapotillo | <i>Couepia polyandra</i> (Kunth) Rose. | 11 |
| 9 | Fabaceae | Tepeguaje | <i>Lysiloma acapulcensis</i> (Kunth) Benth. | 6 |
| 10 | Fabaceae | Guachipilín | <i>Diphysa americana</i> Benth. | 5 |
| 11 | Fabaceae | Guanacastle | <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb. | 4 |
| 12 | Burseraceae | Palo mulato | <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg. | 4 |
| 13 | Sapindaceae | Pipe | <i>Sapindus saponaria</i> L. | 4 |
| 14 | Fabaceae | Yatolito de toro | <i>Inga oerstediana</i> G. Bentham ex B.C. Seemann. | 1 |
| 15 | Araliaceae | Palo de agua | <i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Planch. et Decne. | 1 |
| 16 | Fagaceae | Encino rojo | <i>Quercus</i> sp. | 1 |
| 17 | Hamamelidaceae | Liquidámbar | <i>Liquidambar macrophylla</i> Oerst. | 1 |

Las especies comestibles o de consumo en los huertos muestreados se encontraron 23, además lógicamente del café (*Coffea arabica* L.) con 1,783 individuos, y café mejorado entre las que se encuentran las variedades: café Oro Azteca, Marellesa, Garnica, Caturra y Sarchimor (*Coffea* spp.) con 1,180 individuos de todos los sitios muestreados; se encontraron especies de frutales como el plátano (*Musa acuminata* Colla) con 295 individuos, además, huele de noche (*Cestrum nocturnum*) con 130 individuos, que es utilizado como quelite, y las especies que se encuentran en la Tabla 6. El destino de los productos es principalmente para consumo familiar.

Tabla 6. Species for food use present in HF of Santa María Temaxcalapa, Oax., México.**Tabla 6.** Especies de uso alimenticio presentes en HF de Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico.

| Núm. | Familia | Nombre común | Nombre científico | Abundancia |
|------|--------------|----------------|---|------------|
| 1 | Musaceae | Plátano | <i>Musa acuminata</i> Colla. | 295 |
| 2 | Solanaceae | Huele de noche | <i>Cestrum nocturnum</i> L. | 130 |
| 3 | Fabaceae | Chícharo | <i>Pisum sativum</i> L. | 40 |
| 4 | Arecaceae | Tepejilote | <i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm. | 33 |
| 5 | Poaceae | Maíz | <i>Zea mays</i> L. | 30 |
| 6 | Cactaceae | Pitaya | <i>Hylocereus undatus</i> (Haw.) Britt. | 20 |
| 7 | Bromeliaceae | Piña | <i>Ananas comosus</i> L. | 19 |

| | | | | |
|----|---------------|----------------|---|----|
| 8 | Lauraceae | Aguacate | <i>Persea americana</i> Mill. | 13 |
| 9 | Solanaceae | Tomate montés | <i>Solanum lycopersicum</i> var. <i>cerasiforme</i> | 10 |
| 10 | Annonaceae | Anona | <i>Anona reticulata</i> L. | 7 |
| 11 | Myrtaceae | Guayaba | <i>Psidium guajava</i> L. | 6 |
| 12 | Piperaceae | Hierba santa | <i>Piper auritum</i> Kunth. | 6 |
| 13 | Rutaceae | Limón | <i>Citrus limon</i> Burm.F. | 5 |
| 14 | Sapotaceae | Mamey | <i>Pouteria sapota</i> (Jacq.) H.E. Moore & Stearn | 5 |
| 15 | Rutaceae | Naranja | <i>Citrus sinensis</i> Osbeck | 4 |
| 16 | Anacardiaceae | Mango | <i>Mangifera indica</i> L. | 3 |
| 17 | Rosaceae | Níspero | <i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl. | 3 |
| 18 | Proteaceae | Nuez Macadamia | <i>Macadamia integrifolia</i> Maiden & Betche | 2 |
| 19 | Rosaceae | Nanche | <i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth | 2 |
| 20 | Rutaceae | Mandarina | <i>Citrus reticulata</i> Blanco | 1 |
| 21 | Ebenaceae | Zapote | <i>Manilkara zapota</i> (L.) P.Royen | 1 |
| 22 | Rutaceae | Toronja | <i>Citrus paradise</i> Macf. | 1 |
| 23 | Myrtaceae | Pimienta | <i>Pimenta dioica</i> (L.) Merrill. | 1 |

Las plantas identificadas como medicinales se encontraron un total de 19 especies, las representativas son: plátano (*Musa acuminata* Colla) con 295 individuos, que se utiliza el líquido extraído del tallo para curar disentería; floripondio (*Brugmansia arborea*) con 112 individuos, que se usa para curar el susto y nervios; dos tipos de colirio (*Tradescantia zebrina* y *Commelina diffusa*) con 56 y 45 individuos, respectivamente, que sirven para curar los ojos y malestares por disentería; árnica (*Tithonia diversifolia*) con 33 individuos para dolor de muela y estómago; guayaba (*Psidium guajava* L.) con 6 individuos para dolor de estómago y diarrea; el resto de especies se muestran en la Tabla 7.

Table 7. Species for medicinal use (artisanal) present in HF of Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico
Tabla 7. Especies de uso medicinal (artesanal) presentes en HF de Santa María Temaxcalapa, Oax., México

| Núm. | Nombre común | Nombre científico | Abundancia | Parte usada | Usos |
|------|----------------|---|------------|-------------------|-----------------------------|
| 1 | Plátano | <i>Musa acuminata</i> Colla | 295 | Líquido del tallo | Disentería |
| 2 | Floripondio | <i>Brugmansia arborea</i> (Thunb.) Lindl. | 112 | Hojas | Susto y nervios |
| 3 | Coralillo | <i>Hamelia patens</i> Jacq. | 82 | Hojas | Control de hemorragia |
| 4 | Colirio morado | <i>Tradescantia zebrina</i> | 56 | Semillas y hojas | Vista y disentería |
| 5 | Colirio verde | <i>Commelina diffusa</i> Burman F. | 45 | Semillas y hojas | Vista |
| 6 | Enredadera | <i>Cissampelos pareira</i> | 38 | Hojas | Latido |
| 7 | Árnica | <i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) Gray. | 33 | Hojas | Dolor de muela y estómago |
| 8 | Aguacate | <i>Persea americana</i> Mill. | 13 | Hojas | Golpes |
| 9 | Siempre viva | <i>Kalanchoe pinnata</i> (Lam.) Pers. | 10 | Hojas | Fiebre y reumas |
| 10 | Hierba mora | <i>Solanum nigrum</i> Mart & Gal. | 9 | Hojas | Nervios |
| 11 | Guayaba | <i>Psidium guajava</i> L. | 6 | hojas | Dolor de estómago y diarrea |
| 12 | Sauco | <i>Sambucus nigra</i> | 5 | Hojas | Dolor de cabeza |
| 13 | Higuerilla | <i>Ricinus communis</i> | 4 | Hojas | Dolor de huesos |
| 14 | Lirio | <i>Viscum album</i> | 4 | Hojas | Dolor de huesos |

| | | | | | |
|----|-----------|---|---|---------------|-----------------------|
| 15 | Amarga | <i>Thalictrum sp.</i> | 4 | Hojas | Presión arterial alta |
| 16 | Naranja | <i>Citrus sinensis</i> | 4 | Jugo | Empacho |
| 17 | Níspero | <i>Eriobotrya japonica</i> | 3 | Hojas | Riñones |
| 18 | Guarumbo | <i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol. | 1 | Hojas | Diabetes |
| 19 | Flor rosa | <i>Begonia heracleifolia</i> Schlechl. & Cham. | 1 | Raíz tuberosa | Cáncer |

Existen algunos otros usos que las familias rurales le brindan a las especies como maderable, donde existe una sola especie como lo es el Cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) de la familia Meliaceae, con 16 individuos; otro uso que se le brinda a las especies es el ornamental, con dos especies: orquídea (*Scaphyglottis sp.*) con 17 individuos y liquidámbar (*Liquidambar macrophylla* Oerst.) con un individuo, esta última es utilizada en festividades religiosas. Y el floripondio (*Brugmansia arborea*) con 115 individuos, que se ocupa para alimento de aves de traspasio.

Índice de diversidad de Margalef

Con relación en los índices de diversidad de Margalef (Índice Mg), los 28 huertos estudiados se clasificaron en tres rangos altitudinales: alto (1,212 a 1,400 msnm), medio (1,022 a 1,211 msnm) y bajo (832 a 1,021 msnm) (Tabla 8). Del total de huertos, 25 presentaron valores mayores a 2, los cuales son considerados como sitios de diversidad media; y solo tres huertos presentaron un índice menor a 2.0, lo que indica que son áreas de diversidad baja. Ningún huerto presentó valores superiores a 5.0, mismos que son considerados como indicativos de alta biodiversidad.

Tabla 8. Margalef diversity index (Mg) and Jaccard similarity coefficient by altitudinal gradient in family gardens of Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico

Tabla 8. Índice de diversidad de Margalef (Mg) y coeficiente de similitud de Jaccard por gradiente altitudinal en huertos familiares de Santa María Temaxcalapa, Oax., México

| Altitud | Número de huertos | Índice Mg | Altitud | Número de huertos | Coeficiente similitud |
|---------|-------------------|-----------|--------------|-------------------|-----------------------|
| Bajo | 12 | 3.0713202 | Bajo y medio | 12 | 65.3 |
| Medio | 13 | 2.6194654 | Bajo y alto | 13 | 23.4 |
| Alto | 3 | 1.7527147 | Medio y alto | 3 | 23.9 |

Coeficiente de similitud de Jaccard

Con respecto al coeficiente de similitud de Jaccard, se realizaron comparaciones de los huertos muestreados de acuerdo con la clasificación de gradiente altitudinal.

La comparación entre huertos que presentaron un índice de similitud de 65.3% fueron 12 ubicados en una altitud bajo y medio, esta semejanza obedece a las especies encontradas en estas zonas. Los HF que presentaron un índice de 23.4% son 13 que se encuentran en la altitud bajo y alto; finalmente los HF que tuvieron un índice de 23.9% de similitud fueron 3 que se encuentran en la altitud medio y alto, como se muestra en la Tabla 8. Esto se debe a la diferencia de condiciones físico-ambientales del medio y especies en HF.

Atributo socioeconómico

En la integración de personas en las 28 unidades de producción familiar (UPF) muestreadas, se obtuvo lo siguiente: una UPF está conformada por 7 personas, cuatro por 5 personas, once por 4, cinco por 3, seis por 2 (madre e hijo), y solo un hogar cuenta con un integrante, quien es mujer. En el rol de responsable del hogar, el 65.2% mencionan que el padre es el jefe de familia; mientras que en el 26.1% de la UPF es la mujer; y el 8.7% recae en el hijo. La participación de la mujer

en las diversas actividades de los huertos familiares corresponde a un 48%, y en hombre a un 52%.

Categorías de uso

De acuerdo con las categorías de uso de las especies encontradas en los 28 HF, se obtuvo un total de 8 categorías de uso: comestible con 25 especies, medicinal con 19, combustible con 17, sombra con 16, fijación de nitrógeno con 6 especies, entre otros (Figura 2).

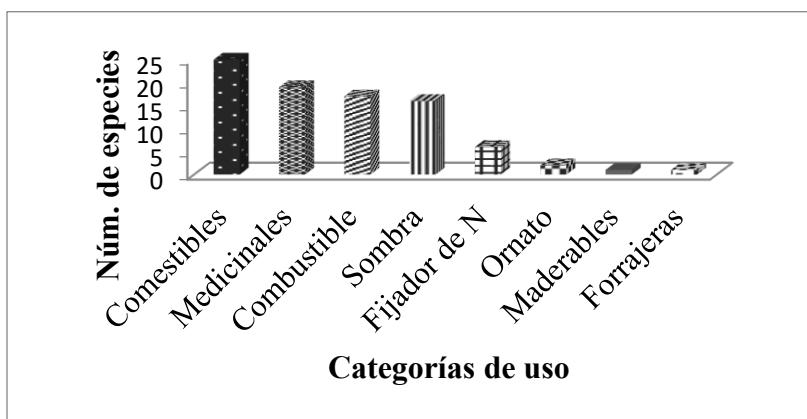


Figure 2. Categories of species by use registered for the UPF in HF of Santa María Temaxcalapa, Oax., Mexico.
Figura 2. Categorías de especies por uso registrada para las UPF en HF de Santa María Temaxcalapa, Oax., México.

Los atributos que ofrecen las especies arbóreas son: fijación de nitrógeno, que aportan nutrientes al suelo, como es el caso del género *Inga*; otros arboles maderables como: *Cedrela odorata* L., *Lysiloma acapulcensis* (Kunth) Benth., *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb., *Bursera simaruba* (L.) Sarg., entre otros, que aportan sombra. Con gran relevancia se observa que existe un mayor número de especies utilizadas para uso comestible en forma de quelites y condimentos; otras en forma medicinal, como se indica arriba que atienden padecimientos como: dolor de cabeza, ojos, disentería, cicatrices, entre otros, que afectan a los integrantes de las UPF.

En el atributo económico se consideraron todas las actividades productivas con sus respectivos costos de producción en el manejo del cultivo de café, con el propósito de conocer la eficiencia de su actividad económico-productiva.

Las variables consideradas en los costos de producción del manejo de café son: producción de plántula, siembra, control de maleza, control de plagas, podas, aplicación de abonos orgánicos y cosecha, contabilizando un costo total de \$10,212.00. Por su parte, la venta de café se realiza en el mercado local a un precio promedio de \$199.22 el kilogramo, alcanzado un ingreso promedio por 5,598.00 al año.

Por consiguiente, el resultado de la relación beneficio/costo fue de: 0.55. Bajo el criterio indicado, se encontró que: $B/C < 1$, lo que significa que existen pérdidas. El resultado se interpreta como una pérdida en centavos por cada peso invertido, lo que indica es que no se recuperan los costos realizados. La importancia de realizar este tipo de análisis permite cuantificar el rendimiento del HF, la relación de los ingresos con los productos del sistema, lo cual, puede ser visto como una medida de la eficiencia y viabilidad de la producción de café.

DISCUSIÓN

En los huertos familiares de Santa María Temaxcalapa se encontraron 76 elementos florísticos, valores que difieren de las 146 que se registraron en Santa Catarina Lachatao y San Juan Chicomezúchil, Sierra Norte de Oaxaca (Muñoz *et al.*, 2020); las 120 especies encontradas en Cuilápam de Guerrero, Oaxaca (De la Rosa *et al.*, 2014); y las 121 especies vegetales encontradas en Talea de Castro, Oaxaca (Manzanero *et al.*, 2009). De igual forma, otros resultados con registros altos en otras regiones del país como las 330 especies vegetales en los tres estratos:

arbóreo, arbustivo y herbáceo (Chablé *et al.*, 2015); en Puebla se identificaron 357 especies (Castañeda *et al.*, 2020); en el centro de México se registraron 287 especies perennes de plantas, principalmente de uso ornamental (58%), medicinal (21%) y alimentario (19%) (Cano *et al.*, 2012), y finalmente, en dos comunidades mayas yucatecas, Tixpeual y Tixcacaltuyub, Yucatán, México, registraron 135 y 133 especies, respectivamente, de árboles y arbustos (Rico & García, 1991). Sin duda, los resultados de esta investigación también obedecen a la temporalidad en que se llevaron a cabo los trabajos de campo, una menor presencia de plantas en los sitios muestreados por las actividades de las y los responsables de las UPF.

El grado de riqueza florística está determinado por el gradiente altitudinal, esto por las condiciones de los sitios. Estas transiciones altitudinales favorecen un aumento de especies desde un rango bajo-medio al encontrar índices de diversidad de Margalef mayor a 2, así como, una disminución en el número de especies e individuos de las especies vegetales en las zonas altas con índices de diversidad menores a 2. Algunos factores del medio que influyen en la diversidad son: riqueza de materia orgánica del suelo, topografía y exposición del terreno (Skov & Lawesson, 2000), como lo señalado por estos autores.

En estudios previos se encontraron que el tipo de flora está relacionada con las condiciones del medio donde estas se desarrollan (Ávila *et al.*, 2018). En esta investigación, los HF presentan variación en la abundancia, riqueza y composición de especies, según diversos factores del medio. El factor físico-ambiental está relacionado con la altitud, el clima, la precipitación y la fertilidad del suelo (Hernández *et al.*, 2013; Kehlenbeck *et al.*, 2006) como lo señalan estos autores. Las partes bajas son zonas de acumulación de corrientes de agua, humedad y sedimentos derivados de las áreas circundantes altas, que generan suministro de nutrientes al suelo (Estrada *et al.*, 2012). Estas características coinciden con lo obtenido en el coeficiente de Jaccard en la que se comprueba que existe mayor similitud entre los HF de altitud baja y media.

Los huertos familiares son reservorios de la biodiversidad, por las funciones que desempeñan como: retención de humedad, sombra, áreas de descanso o perchas, nidificación y refugio; alimento en forma de frutos, flores y polinizadores (Aguilar, 1982; Calvo & Blake, 1998; Gallina *et al.*, 1996; Moguel & Toledo, 1999; Perfecto *et al.*, 2003). En este estudio se encontró la presencia de leguminosas como el género Inga, un importante fijador de nitrógeno para el desarrollo de especies de estrato bajo como el café, pero también produce follaje (Pennington & Fernandes, 1998), lo que lo convierte en un árbol de múltiples propósitos (Cordero & Boshier, 2003), como lo sostienen estos autores.

Con relación en las categorías de uso (Camacho *et al.*, 2022; Martínez *et al.*, 2016; Padilla, 2008), señalan que las plantas de uso comestible, ornamental, medicinal, forraje, construcción y cercos vivos, han sido consideradas como las más importantes para el estado de Oaxaca. En el caso de Santa María Temaxcalapa se encontró que las especies de uso comestible y medicinal, ocupan los primeros lugares de importancia en los huertos familiares; estos resultados coinciden con los estudios realizados (Cárdenas, 2002) y (Martínez *et al.*, 2022).

Las características físicas ambientales predominantes en los ecosistemas del área de estudio influyen de manera importante en la diversidad biológica de la vegetación, las cuales son: disponibilidad de materia orgánica en el suelo, topografía y exposición del terreno (Skov & Lawesson, 2000), coincidiendo con lo señalado por estos autores.

De acuerdo con la similitud encontrada de los huertos en los gradientes altitudinales bajo y medio, se debe a que la principal influencia en que las áreas más bajas son zonas de acumulación de corrientes de agua y sedimentos derivados de las áreas circundantes altas, o estar influenciadas por una alta capa de agua, la cual puede tener un efecto considerable en el suelo y suministro de nutrientes (Estrada *et al.*, 2012).

En el ámbito social, en estudios previos se encontraron que en el manejo de huertos participan todos los miembros de la familia (Jiménez, 2007; Park *et al.*, 2019; Ortiz & Monroy, 2004). En este estudio se encontró que tanto el padre como la madre de hogar participan mayormente en las actividades de manejo de los huertos familiares. Mediante la división del trabajo, las jefas de hogar toman decisiones en cuanto a las especies herbáceas usadas como alimento, condimento o medicina (Trinh *et al.*, 2003), como los señalan estos autores.

En otros estudios se ha encontrado que las niñas y niños por lo regular son quienes riegan los huertos, los adultos mayores realizan el deshierbe (Ospina, 2003); mientras que las jefas de hogar con ayuda de los jóvenes eligen semillas, siembran, fertilizan, controlan plagas y enfermedades;

y los hombres se encargan de la remoción del suelo. En este estudio no se encontró que niñas, niños y adultos mayores realicen labores del huerto. Así, la organización familiar influye en los huertos al designar tareas y responsabilidades a cada miembro de la familia (Guerrero, 2017).

En el ámbito económico, a partir de características de producción de un huerto familiar se clasifican en: huertos de subsistencia, semi-comerciales y comerciales (Zurita *et al.*, 2020). En este estudio se encontró que los huertos pertenecen a la clasificación semi-comerciales, debido a que una parte importante de ellos son fuente de ingresos económicos, como ocurre con el café, y en algunos casos, el tepejilote.

El trabajo realizado en Talea de Castro, encontraron que los productos del huerto contribuyen de forma marginal a los ingresos de las UPF (Manzanero *et al.*, 2009). En Santa María Temaxcalapa, el mercado local y regional no les favorece, dado que no logran recuperar los costos invertidos, menos obtener ganancias, sin embargo, una ventaja que presentan los sistemas agroforestales es que en diferentes épocas del año son recolectadas algunas plantas de consumo como: quelite y frutos.

CONCLUSIONES

El huerto familiar es uno de los sistemas de manejo de las UPF de Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca. Constituye una fuente de provisión de alimentos durante diferentes épocas del año, pero también de una importancia cultural y de conservación de especies de los estratos: arbóreo, arbustos y herbáceo. Sin duda, con la problemática en el cultivo del café derivado de la alta infestación de roya, se ha encontrado una mayor población de plantas de café mejorado en las parcelas muestreadas del área de estudio.

La riqueza de especies está relacionado a las características físico-ambientales que posee cada gradiente altitudinal del área de estudio, es decir, en un gradiente más bajo, la diversidad fue mayor, mientras que, en un gradiente más alto, la diversidad fue menor; dadas las características de altitud, clima, fertilidad del suelo, tamaño y edad del HF determinan la diversidad de especies. De igual forma, los índices de similitud con resultados favorables de semejanza se encontraron en los huertos ubicados en los gradientes altitudinales bajo y medio.

Las categorías de uso de las especies de plantas están definidas por el conocimiento que poseen las personas de dichas especies, las categorías más importantes registradas en esta investigación son: comestible y combustible; le siguen medicinal, sombra, ornamental, fijadora de nitrógeno, maderable y forrajera, principalmente.

En el aspecto socioeconómico, el huerto familiar permite la integración, nexos y la participación de la familia en las labores de manejo; la participación de la mujer en el uso, manejo y conservación de los HF, y en la administración de las UPF, en algunos casos. La producción de café es la principal generadora de ingresos, lo que representa la base de la economía campesina, pero no lo suficiente como se demuestra en la relación beneficio-costo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los productores de café de la Organización de Cafetaleros Cerro Alto S.P.R. de R.L. de Santa María Temaxcalapa, Villa Alta, Oaxaca; por la información proporcionada para esta investigación. Asimismo, al programa PRODEP por el financiamiento para la realización de la investigación, a través del proyecto: "Fomento a la generación y aplicación innovadora del conocimiento". Así como también a los revisores anónimos por sus comentarios y sugerencias para la mejora del manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Abdoellah, O. S., Schneider, M., Nugraha, L. M., Suparman, Y., Voleutta, C. T., Withaningsih, S., Parikesit, Heptiyanggit, A., & Hakim, L. (2020). Homegarden commercialization:

- extent, household characteristics, and effect on food security and food sovereignty in Rural Indonesia. *Sustainability Science*, 15(3), 797–815. <https://doi.org/10.1007/s11625-020-00788-9>
- Aguilar, F. (1982). Estudio ecológico de las aves del cafetal. En E. Jiménez-Avila & A. Gómez-Pompa (eds.), *Estudios ecológicos en el sistema cafetalero* (pp. 108-123). CECSA, México.
- Ávila, P., Sánchez, A., Catalán, C., Almazán, R. C., & Jiménez, J. (2018). Patrones de riqueza y diversidad de especies vegetales en un gradiente altitudinal en Guerrero, México. *Polibotánica*, 0(45). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.8>
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2000). Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management. *Ecological Applications*, 10(5), 1251–1262. <https://doi.org/10.2307/2641280>
- Caballero, J., Casas, A., Cortés, L., & Mapes, C. (1998). Patrones en el conocimiento, uso y manejo de plantas en pueblos indígenas de México. *Estudios Atacameños*, 16, 181–195. <https://www.jstor.org/stable/25674716>
- Calvo, L., & Blake, J. (1998). Bird diversity and abundance on two different shade coffee plantations in Guatemala. *Bird Conservation International*, 8(3), 297–308. <https://doi.org/10.1017/S0959270900001945>
- Camacho, C., Lagunez, L., Aguilar, A., & Solano, R. (2022). Ethnobotany of medicinal flora in two communities of the Mixteca Alta in Oaxaca, Mexico. *Botanical Sciences*, 100(4), 912–934. <https://doi.org/10.17129/botsci.2947>
- Cano, R. M., De La Tijera, B., Casas, A., Salazar, L., & García, B. R. (2012). Migración rural y huertos familiares en una comunidad indígena del centro de México. *Botanical Sciences*, 287–304.
- Cárdenas, D. (2002). *Plantas útiles en dos comunidades del departamento de Putumayo* (D. Cárdenas López, S. (Organização: Colômbia), & I. C. para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas,” Eds.). SINCHI.
- Castañeda, G. I., Aliphat, F. M. M., Caso, B. L., Lira, S. R., & Martínez, C. D. C. (2020). Conocimiento tradicional y composición de los huertos familiares totonacas de Caxhuacan, Puebla, México. *Polibotánica*, 0(49). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.49.13>
- Chablé, P. R., Palma, L. J. D., Vázquez, N. C. J., Ruiz, R. O., Mariaca, M. R., & Ascensio, R. M. J. (2015). Estructura, Diversidad y Uso de Plantas en Huertos Familiares de la Chontalpa, Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2, 23–39. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=358636340003>
- Cordero, J., & Boshier, D. H. (2003). *Árboles de Centroamerica: un manual para extensionistas*. <https://portals.iucn.org/library/node/28394>
- De la Rosa, P. K., Vásquez, M. A., Villegas, Y., & Jerez, M. P. (2014). Los huertos familiares y la seguridad alimentaria de Cuilapam de Guerrero, Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 1(1), 40–51. <https://revistaremaeitvo.mx/index.php/remae/article/view/278>
- Estrada, E., Villarreal, J. A., Jurado, E., Cantú, C., García, M. A., Sánchez, J., Jiménez, J., & Pando, M. (2012). Clasificación, estructura y diversidad del matorral submontano adyacente a la planicie costera del Golfo Norte en el Noreste de México. *Botanical Sciences*, 90(1), 37–52. <https://doi.org/10.17129/botsci.384>
- Flos, J. (2005). El concepto de información en la ecología margalefiana. *Ecosistemas*, 14(1), 0. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54014103>
- Fragoso, I. (2022). *Peraceae / Flora de Veracruz Fascículo 192*. <https://doi.org/10.21829/fv.562.2022.192>
- Gallina, S., Mandujano, S., & González-Romero, A. (1996). Conservation of mammalian biodiversity in coffee plantations of Central Veracruz, Mexico. *Agroforestry Systems*, 33(1), 13–27. <https://doi.org/10.1007/BF00122886>
- García, J. A., Toledo, S., Lemus, H., Rodríguez, A., Morales, B., Correa, A., Álvarez, D., Pérez, A., García, D. A., & Garrido, M. (2021). Claves para la identificación de familias por grupos morfológicos seleccionados de la flora de Cuba - Keys for the identification of

- families by selected morphological groups of the Cuban flora. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, 42, 195–201. <https://www.jstor.org/stable/48672486>
- González, A. (2012). “*Del huerto a los jardines y vecindades: procesos de cambio en un agroecosistema de origen antiguo*”. En R. Mariaca (Ed.), *El huerto familiar del sureste de México* (pp. 487-520). Secretaría de Recursos Naturales y protección Ambiental del Estado de Tabasco y El Colegio de la Frontera Sur.
- Guerrero, J. de D. (2017). Perspectivas del traspasio y su importancia en la seguridad alimentaria. *Agro Productividad*, 10(7). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/1055>
- Gutiérrez, B. A., & Fierro, L. H. (2006). *Diagnóstico y diseño participativo en sistemas agroforestales*. Corpoica. <https://books.google.com.mx/books?id=BvbGLfWw90IC>
- Hernández, J., Juárez, R. A., Hernández, N., & Hernández, N. (2013). Uso antropocéntrico de especies vegetales en los solares de San Pedro Ixtlahuaca, Oaxaca, México. *Ra Ximhai*, 9(1), 99–108. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46127074009>
- Huai, H., & Hamilton, A. (2009). Characteristics and functions of traditional homegardens: A review. *Frontiers of Biology in China*, 4(2), 151–157. <https://doi.org/10.1007/s11515-008-0103-1>
- Jiménez, W. (2007). Huertos mixtos en la economía familiar en fincas del noratlántico de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, 33(1), 33–39. <https://doi.org/10.15359/rca.33-1.5>
- Kehlenbeck, K., Arifin, H., & Maass, B. (2006). Plant diversity in homegardens in a socio-economic and agro-ecological context. In *Stability of Tropical Rainforest Margins* (pp. 295–317). https://doi.org/10.1007/978-3-540-30290-2_15
- Lope-Alzina, D. G. (2012). Avances y vacíos en la investigación en huertos familiares de la Península de Yucatán. En *El Huerto Familiar del Sureste de México* (pp. 98–110). ECOSUR-SERNAPAM. <https://research.wur.nl/en/publications/avances-y-vacios-en-la-investigaci%C3%B3n-en-huertos-familiares-de-la>
- Magurran, P. of E. & E. A. E. (2003). *Measuring Biological Diversity*.
- Manzanero, G., Flores Martínez, A., & S. Hunn, E. (2009). Los Huertos Familiares Zapotecos de San Miguel Talea de Castro, Sierra Norte de Oaxaca, México. *Etnobiología*, 7(1), 9–29. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5294429>
- Mariaca, R. (2012). La complejidad del huerto familiar maya del sureste de México. En *El huerto familiar del sureste de México / Ramón Mariaca Méndez, (Editor)* (pp. 7–97). Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental del Estado de Tabasco: El Colegio de la Frontera Sur.
- Martínez, A., López, P. A., Gil, A., & Cuevas, J. A. (2012). Plantas silvestres útiles y prioritarias identificadas en la Mixteca Poblana, México. *Acta botánica mexicana*, 98, 73–98. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-71512012000100005&lng=es&nrm=iso&tlang=es
- Martínez, J., Acosta, A., Martínez, E., & Manzano, F. (2016). Recursos forestales no maderables en dos comunidades zapotecas de la Sierra Juárez de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(35), 37–52. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63448564004>
- Martínez, J., Molina, N., Rangel, S., Aquino, C., & Acosta, A. (2022). Valor cultural de los recursos forestales no maderables en comunidades zapotecas de la Sierra Juárez de Oaxaca. *Polibotánica*. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.16>
- Martínez, M. Á. (1970). *Ecología humana del ejido Benito Juárez o Sebastopol, Tuxtepec, Oaxaca*.
- Meave, J. A., Rincón, A., Ibarra, G., Gallardo, C., & Romero, M. A. (2017). Checklist of the vascular flora of a portion of the hyper-humid region of La Chinantla, Northern Oaxaca Range, Mexico. *Botanical Sciences*, 95(4), 722–759. <https://doi.org/10.17129/botsci.1812>
- Méndez, A. (2020). *Sistema agroforestal de los huertos familiares en la costa de Oaxaca, México*. 1–34. <http://repositorio.chapingo.edu.mx:8080/handle/20.500.12098/469>
- Méndez, V., Lok, R., & Somarriba, E. (2001). Interdisciplinary analysis of homegardens in Nicaragua: Micro-zonation, plant use and socioeconomic importance. *Agroforestry Systems*, 51, 85–96. <https://doi.org/10.1023/A:1010622430223>

- Millat-e-Mustafa, M. (1996). *The ecology and management of traditional homegardens in Bangladesh*. University of Wales.
- Moguel, P., & Toledo, V. (1999). Biodiversity Conservation in Traditional Coffee Systems of Mexico. *Conservation Biology*, 13, 11–21. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x>
- Montagnini, F. (2006). Homegardens of Mesoamerica: Biodiversity, food security, and nutrient management. In *Tropical Home gardens: A Time-Tested Example of Sustainable Agroforestry* (Vol. 3, pp. 61–84). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4948-4_5
- Muñoz, A. E., Castro, D. M., & Campos, Á. (2020). Seasonal variation in the diversity of flowering orchids at Santa Catarina Lachatao, Oaxaca, Mexico. *Botanical Sciences*, 98(3), 573–584. <https://doi.org/10.17129/botsci.2516>
- Nee, M. (1986). *Solanaceae I*. Flora de Veracruz. <https://doi.org/10.21829/fv.439.1986.49>
- Ortiz, C. M., & Monroy, R. (2004). Análisis preliminar de la dominancia cultural de las plantas útiles en el estado de Morelos. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 74, 77–95. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707405>
- Ospina, A. (2003). *Agroforestería: aporte conceptuales, metodológicos y prácticos para el estudio agroforestal*. Asociación Colombiana de agroecología del suroccidente colombiano.
- Padilla, E. (2008). *Estudio ecológico y etnobotánico de la vegetación del municipio de San Pablo Etla, Oaxaca*. <http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/126>
- Park, J. H., Woo, S. Y., Kwak, M. J., Lee, J. K., Leti, S., & Soni, T. (2019). Assessment of the diverse roles of home gardens and their sustainable management for livelihood improvement in West Java, Indonesia. *Forests*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/f10110970>
- Pascual, S., Manzanero, G. I., Saynes, A., & Vásquez, M. A. (2020). Agroforestry systems of a Zapotec community in the Northern Sierra of Oaxaca, Mexico. *Botanical Sciences*, 98(1), 128–144. <https://doi.org/10.17129/botsci.2423>
- Pennington, T. D., & Fernandes, E. C. M. (1998). *The genus inga: utilization*. Royal Botanic Gardens.
- Pennington, T. D., & Sarukhán, J. (2005). *Arboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies*. UNAM.
- Pérez, J., & Ramón, P. (2020). Benhe wlhash: Los ancestros zapotecos de la Sierra norte de Oaxaca. Bioarqueología de la comunidad como enfoque descolonizador en la antropología de la Sierra Juárez de Oaxaca. *Anales de Antropología*, 54, 133–144. <https://doi.org/10.22201/ia.24486221e.2020.1.68722>
- Perfecto, I., Mas, A., Dietrich, T., & Vandermeer, J. (2003). Conservation of biodiversity in coffee agroecosystems: a tri-taxon comparison in southern Mexico. In *Biodiversity and Conservation* (Vol. 12). Kluwer Academic Publishers.
- Philip, G., Gross, L., Hamilton, K., Landis, A., Schmidt, M., Snapp, S., & Swinton, M. (2014). Farming for ecosystem services: An ecological approach to production agriculture. *BioScience*, 64(5), 404–415. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu037>
- Ramírez, O., González, F. J., Matus, J., Omaña, J., & Kido, A. (2008). Situación económica de la producción de limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Swingle) en los estados de Oaxaca y Guerrero, México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, XII, 570–580.
- Reko, B. P. (1949). Nombres botánicos chinantecos. *Botanical Sciences*, 8, 9–20. <https://doi.org/10.17129/botsci.951>
- Rendón, J., & Casas, A. (2021). *Agriculturas campesinas que mantienen la biodiversidad de la selva seca mexicana*.
- Rico, G. V., & García, F. J. G. (1991). The Maya and vegetation of the Yucatan Peninsula. *J. Ethnobiol*, 11(1), 135–142.
- Romero, M. A., Castillo, S., Meave, J., & Wal, H. (2000). Análisis florístico de la vegetación secundaria derivada de la selva húmeda de montaña de Santa Cruz Tepetotutla (Oaxaca) México. *Botanical Sciences*, 67, 89–106. <https://doi.org/10.17129/botsci.1627>
- Rosales, D. J., Campos-Ángeles, G. V., & Ortiz, G. R. (2023). Situación de las plantas medicinales en el estado de Oaxaca. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 10, 46. <https://revistaremaetvo.mx/index.php/remae/article/view/92>

Recibido:
6/marzo/2024

Aceptado:
29/noviembre/2024

- Rzedowski, J. (1996). Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botanica mexicana*, 35, 25–44. <https://doi.org/10.21829/abm35.1996.955>
- Sánchez, M., Duque, A., & Mirana, P. (2001). Valorizacion del uso no comercial del bosque: Métodos en etnobotánica cuantitativa. *Fluid Phase Equilibria*, 179–224.
- Servín, L. C., & Gutiérrez, J. V. (1990). Plantas medicinales del Distrito de Ocotlán, Oaxaca. *Anales del Instituto de Biología serie Botánica*, 60(001). <https://www.revistas.unam.mx/index.php/bot/article/view/1819>
- Skov, F., & Lawesson, J. E. (2000). Estimation of plant species richness from systematically placed plots in a managed forest ecosystem. *Nordic Journal of Botany*, 20(4), 477–483. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1756-1051.2000.tb01592.x>
- Solarte, J. G., Ballesteros Possú, W., & Calvache Muñoz, D. A. (2022). Análisis florístico de los sistemas agroforestales tradicionales de cacao (*Theobroma cacao* L) en Nariño. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1). <https://doi.org/10.22490/21456453.5648>
- Standley, P. C., & Standley, P. C. (1920). *Trees and shrubs of Mexico*. Govt. Print. Off. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.15726>
- Tina, L., Ramón, M., Benito, S.I., González Jácome, A., & Elizabeth, W. (2009). *Aporte de alimentos del huerto familiar a la economía campesina Ch'ol, Suclumpá, Chiapas, México*.
- Torquebiau, E. (1992). Are tropical agroforestry home gardens sustainable? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 41(2), 189–207. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90109-O](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90109-O)
- Trinh, L. N., Watson, J. W., Hue, N. N., De, N. N., Minh, N. V., Chu, P., Sthapit, B. R., & Eyzaguirre, P. B. (2003). Agrobiodiversity conservation and development in Vietnamese home gardens. *Agriculture*, 97, 317–344. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00228-1](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00228-1)
- Universidad Nacional Autónoma de México. (1993). *Flora del valle de Tehuacán-Cuicatlán*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología.
- Vásquez, M. A., & Lope-Alzina, D. (2012). *Manejo y conservación de la agrodiversidad y biodiversidad en huertos familiares en comunidades indígenas de Oaxaca, México: un enfoque biocultural*. https://www.academia.edu/33428851/V%C3%81SQUEZ_D%C3%81VILA_and_LOPE_ALZINA_2012_Conservaci%C3%B3n_de_la_agrodiversidad_en_huertos_familiares
- Vásquez, M. A., & Manzanero, G. (2015). Campesinad y socialización en huertas familiares zapotecas de Oaxaca, México. *Negocios & Desarrollo*, 2, 92–117.
- 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://www.redalyc.org/articulo.ox?id=57707506>
- Vogl, C. R., Vogl-Lukasser, B., & Puri, R. K. (2004). Tools and Methods for Data Collection in Ethnobotanical Studies of Homegardens. *Field Methods*, 16(3), 285–306. <https://doi.org/10.1177/1525822X04266844>
- Zizumbo, D., & Colunga, P. (1982). *Los huaves: la apropiación de los recursos naturales/ D. Zizumbo Villarreal, P. Colunga García-Marín*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4819.2481>
- Zurita, G., Moreno, G. I., Vásquez, M. A., & Lustre, H. (2020). Mujer, huerta familiar zapoteca y seguridad alimentaria en San Andrés Paxtlán, Sierra Sur de Oaxaca, México. In A. I. Moreno, M. L. Soto, M. M. Cariño, J. M. Palma, S. Moctezuma, J. J. Rosales, P. I. Montañez, V. Sosa, & V. Ruenes (Eds.), *Los Sistemas Agroforestales de México: Avances, experiencias, acciones y temas emergentes* (1st ed., Vol. 1, pp. 209-223). UNAM y Red Temática de Sistemas Agroforestales de México de CONACYT.

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD DE ARVENSES EN PARCELAS DE MAÍZ DE TEMPORAL EN LA MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO

COMMUNITY STRUCTURE OF WEEDS IN RAINFED MAIZE FIELDS IN THE MONTAÑA REGION OF GUERRERO, MEXICO

Silva-Aparicio, M., E. Pacheco-Cantú y C. Pacheco-Flores

ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD DE ARVENSES EN PARCELAS DE MAÍZ DE TEMPORAL EN LA MONTAÑA DE GUERRERO, MÉXICO

COMMUNITY STRUCTURE OF WEEDS IN RAINFED MAIZE FIELDS IN THE MONTAÑA REGION OF GUERRERO, MEXICO



Estructura de la comunidad de arvenses en parcelas de maíz de temporal en la Montaña de Guerrero, México**Community structure of weeds in rainfed maize fields in the Montaña region of Guerrero, Mexico**

Marisa Silva Aparicio,
Eugenia Pacheco Cantú y
Cutberto Pacheco Flores

ESTRUCTURA DE LA
COMUNIDAD DE
ARVENSES EN PARCELAS
DE MAÍZ DE TEMPORAL
EN LA MONTAÑA DE
GUERRERO, MÉXICO

COMMUNITY STRUCTURE
OF WEEDS IN RAINFED
MAIZE FIELDS IN THE
MONTAÑA REGION OF
GUERRERO, MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 63-79. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polibotanica.59.4](https://doi.org/10.18387/polibotanica.59.4)

Marisa Silva-Aparicio. Autora de correspondencia: marucha21048@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-5362-3488>

Laboratorio de plantas del Programa Académico de Ciencias y Medio Ambiente.
Universidad Intercultural del Estado de Guerrero. Km. 54 Carr. Tlapa-
Marquelia, La Ciénega, Malinaltepec, Guerrero. C.P. 41500

Eugenia Pacheco-Cantú <https://orcid.org/0000-0003-0137-658X>
Laboratorio de hongos del Programa Académico de Ciencias y Medio Ambiente.
Universidad Intercultural del Estado de Guerrero.
Km. 54 Carr. Tlapa- Marquelia, La Ciénega, Malinaltepec, Guerrero. C.P. 41500

Cutberto Pacheco-Flores <https://orcid.org/0000-0002-3101-7732>
Laboratorio de insectos del Programa Académico de Ciencias y Medio Ambiente.
Universidad Intercultural del Estado de Guerrero. Km. 54 Carr. Tlapa-
Marquelia, La Ciénega, Malinaltepec, Guerrero. C.P. 41500

RESUMEN: El objetivo de esta investigación fue analizar la estructura de la comunidad de arvenses en cultivos de maíz de temporal en la región Montaña de Guerrero. Durante el ciclo agrícola 2022 se muestrearon nueve parcelas en tres localidades: La Ciénega, El Aserradero e Ixcateopan. En cada parcela se registró el número de individuos por unidad de superficie (densidad en m²) y cobertura de las arvenses utilizando cuadros de 1 m². Se estimó el esfuerzo de muestreo, la abundancia, diversidad alfa (Shannon-Wiener -H'-, Simpson y el número efectivo de especies -riqueza = N0, especies abundantes = N1 y especies muy abundantes = N2) y la beta (Whittaker y Jaccard), además del Índice de Valor de Importancia (IVI). Se registraron 127 especies correspondientes a 95 géneros y 32 familias; de estas últimas, las que presentaron mayor riqueza son la Asteraceae (32 spp.), Poaceae (16 spp.) y Fabaceae (13 spp.); asimismo el 87.40% son nativas (11.82% endémicas) y 12.50% introducidas; además, el 80.31% son Eudicotiledóneas, 18.11% Monocotiledóneas y 1.58 Pteridophytas. La forma de vida prevaleciente es la herbácea anual (53.50%), seguida de las herbáceas perennes (25.98%), arbustivas (18.9%) y arbóreas (1.57%). La diversidad registrada (H' = 3.8) es mayor comparada con lo reportado en otras regiones. Las especies con mayor IVI fueron *Stevia tomentosa* Kunth (IVI = 4.16) y *Persicaria nepalensis* (Meins) Miyabe (IVI = 3.74). La similitud florística es baja entre localidades con valores de 0.02 a 0.06.

Palabras clave: Densidad; Diversidad; Especies nativas, Manejo, Similitud, *Stevia tomentosa* Kunth.

ABSTRACT: The objective of this research was to analyze the structure of the weed community in rainfed maize crops in the Montaña region of Guerrero. During the 2022 agricultural cycle, nine plots were sampled in three locations: La Ciénega, El Aserradero, and Ixcateopan. In each plot, the number of individuals per unit area (density in m²) and weed coverage were recorded using 1 m² quadrats. Sampling effort, abundance, alpha diversity (Shannon-Wiener -H'-, Simpson, and the effective number of species: richness = N0, abundant species = N1, and highly abundant species = N2), and beta diversity (Whittaker and Jaccard) were estimated, along with the Importance Value Index (IVI). A total of 127 species were recorded, corresponding to 95 genera and 32 families. Among these, the families with the

greatest species richness were Asteraceae (32 spp.), Poaceae (16 spp.), and Fabaceae (13 spp.). Of the total species, 87.40 % are native (of which 11.82% are endemic) and 12.50% introduced; additionally, 80.31% are Eudicots, 18.11 % Monocots, and 1.58% Pteridophytes. The prevailing life form is annual herbaceous plants (53.50%), followed by perennial herbaceous plants (25.98%), shrubs (18.9 %), and trees (1.57%). The recorded diversity ($H' = 3.8$) is higher compared to reports from other regions. The species with the highest IVI were *Stevia tomentosa* Kunth (IVI = 4.16) and *Persicaria nepalensis* (Meins) Miyabe (IVI = 3.74). Floristic similarity between locations was low, with values ranging from 0.02 to 0.06.

Key words: Density, Diversity, Native species, Management, Similarity, *Stevia tomentosa* Kunth.

INTRODUCCIÓN

En México, donde el maíz es un cultivo de gran importancia cultural, económica y alimentaria, la presencia de arvenses es una preocupación constante para los agricultores, especialmente en las regiones de temporal, donde las condiciones de cultivo son más vulnerables a la variabilidad climática (García-Barrios *et al.*, 2009).

A pesar de esto, algunos autores (Baker, 1974; Lorenzi, 2000) señalan que su impacto en el cultivo puede ser tanto positivo como negativo, ya que cumplen un importante papel ecológico. Las arvenses contribuyen a la protección del suelo, al reciclaje de nutrientes y al mantenimiento de la fertilidad edáfica (Blanco y Leyva, 2007; Vibrans, 2023). Su presencia dentro del cultivo puede reducir la incidencia de enfermedades, plagas y sequías (Altieri *et al.*, 2012; Valdes, 2016), beneficia a los polinizadores, ya que proporcionan néctar y polen (Vibrans, 2016). Estas plantas también son consumidas por los humanos para complementar la alimentación de diversos pueblos rurales y se conocen como “quelites” (Bye, 1981; Balcazar-Quiñones *et al.*, 2020), además son usadas como remedios en la medicina tradicional, ornamentales (Caballero y Mapes, 1985; Vibrans, 2016) y forraje para alimentar a los animales domésticos (Ayala-Enriquez *et al.*, 2019),

Por otro lado, también compiten por recursos como la cobertura del suelo, nutrientes, luz, agua y espacio, lo que puede impedir el desarrollo óptimo de las plantas cultivadas y reducir el rendimiento (Roschewitz *et al.*, 2005).

Conocer la diversidad, abundancia y distribución de las especies de arvenses permite identificar patrones de competencia y coexistencia con las plantas cultivadas, lo que es clave para gestionar de manera eficiente los recursos del suelo, como los nutrientes, el agua y la luz, así como para mitigar los efectos negativos que pueden tener las arvenses cuando su densidad y distribución no son controladas (Cepeda *et al.*, 2020; Vibrans, 2023).

En la Montaña de Guerrero el cultivo de maíz es de gran relevancia y abarca aproximadamente 49 316 mil hectáreas, con un rendimiento promedio de 1.29 toneladas por hectárea. En comunidades específicas como Ixcateopan, El Aserradero y La Ciénega se reportan rendimientos de 2.2, 1.0 y 1.1 toneladas por hectárea respectivamente (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera - SIAP -, 2020). Estas variaciones se deben principalmente a las diferencias en las condiciones ambientales y en las prácticas de manejo agrícola en cada comunidad. Ante este particular escenario, el objetivo de este trabajo fue determinar la estructura de la comunidad de las arvenses en parcelas de maíz de temporal en tres localidades situadas en diferentes municipios de la Región Montaña de Guerrero, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio incluyó las comunidades de La Ciénega - (LC), Ixcateopan (IX) y El Aserradero (EA) ubicadas en los municipios de Malinaltepec, Alpoyeca e Ixtapan, respectivamente, pertenecientes a la región Montaña de Guerrero (Figura 1, Tabla 1).

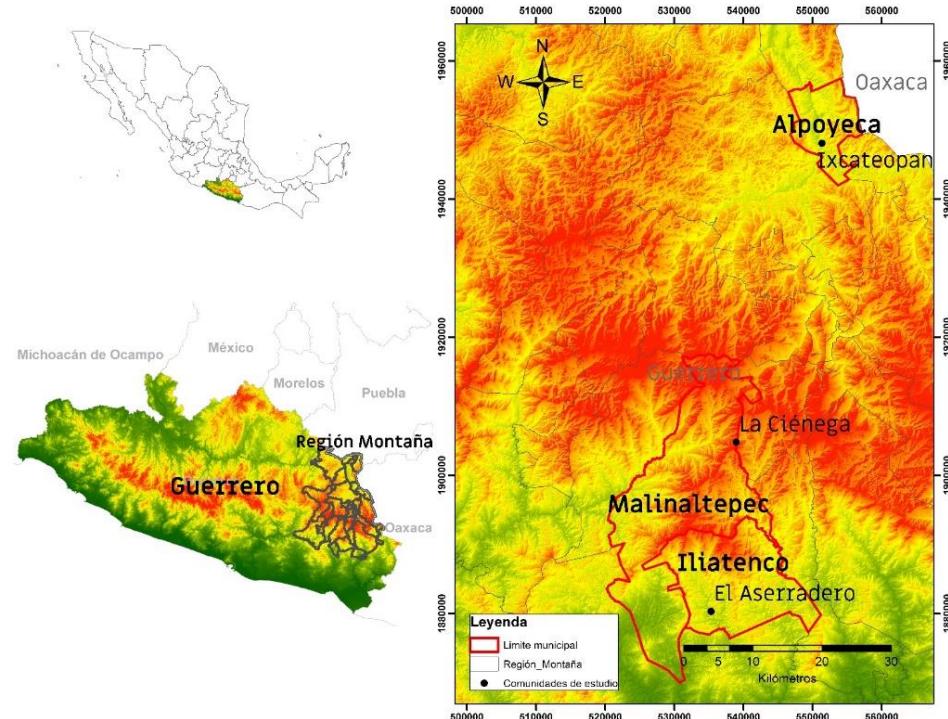


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo en los diferentes municipios de la región Montaña de Guerrero en México.

Figure 1. Location of the study sites in the different municipalities of the Guerrero Mountain, Mexico.

Tabla 1. Características de suelo, clima y vegetación de las comunidades de estudio.

Table 1. Soil, Climate, and Vegetation Characteristics of the Study Communities

| | Localidad y municipio | | |
|-----------------------------|--|--|--|
| Ubicación geográfica | La Ciénega, Malinaltepec | Ixcateopan, Alpoyeca | El Aserradero, Ilatenco |
| | 98° 38' 01".425 W 17° 13' 41".221 N | 98° 30' 57".855 W 17° 37' 07".428 N | 98° 40' 04".759 W 17° 00' 26".225 N |
| Altitud (m s.n.m.) | 2 061 | 985 | 906 |
| Tipo de suelo | Regosol (R) | Cambisol (B) | Regosol (R) |
| Clima | Templado húmedo | Semiseco muy cálido | Cálido subhúmedo |
| Vegetación | Bosque de Encino-Pino | Selva baja caducifolia | Bosque de Pino-Encino |

Se realizaron recorridos de reconocimiento en cada localidad, para identificar la ubicación de las parcelas cultivadas con maíz de temporal y a sus propietarios. Se trabajó con aquellos que accedieron a la realización de los muestreos, por lo que se establecieron tres parcelas en cada una de ellas; esta decisión condicionó la ubicación y las características de parcela, las cuales se detallan en la Tabla 2. Es importante destacar que en las tres localidades estudiadas se emplean herbicidas para el control de vegetación; sin embargo, su uso es menos frecuente en La Ciénega y El Aserradero.

Tabla 2. Características de las parcelas muestreadas.**Table 2.** Characteristics of the sampled plots.

| Ubicación | Parcela | Altitud | Pendiente | Coordenadas (UTM) | | Exposición | Superficie (m ²) |
|----------------------|---------|---------|-----------|----------------------|---------|------------|---------------------------------|
| | | | | X | Y | | |
| La Ciénega | 1 | 1959 | 33 | 538640 | 1905133 | Oeste | 1 224.25 |
| | 2 | 1856 | 36 | 538272 | 1905165 | Oeste | 3 801.69 |
| | 3 | 1803 | 28 | 538138 | 1905228 | Oeste | 4 876.21 |
| Ixcateopan | 1 | 990 | 10 | 550586 | 1949101 | Oeste | 2 897.50 |
| | 2 | 989 | 12 | 550532 | 1948807 | Oeste | 3 643.50 |
| | 3 | 965 | 5 | 550455 | 1950378 | Noreste | 5 094.00 |
| El Aserradero | 1 | 989 | 30 | 534173 | 1881441 | Noreste | 2 897.50 |
| | 2 | 932 | 40 | 534967 | 1880140 | Oeste | 3 643.50 |
| | 3 | 1,002 | 51 | 535641 | 1880069 | Este | 5 094.00 |

Muestreo y recolecta de arvenses

Con el fin de identificar el mayor número de especies representativas por predio y aumentar el rango de confiabilidad en el muestreo se realizaron en dos fases del desarrollo del maíz: el primero, aproximadamente 20 días después de la siembra, al inicio del cultivo; y la segunda, alrededor de los 70 días después de la siembra, cuando las plantas ya habían desarrollado la inflorescencia masculina (espiga). El registro del número de individuos y la cobertura de las arvenses se realizó teniendo en cuenta las características de las parcelas, como el tamaño y la pendiente. Para ello, se establecieron cinco cuadros de 1 m² distribuidos en cada parcela. Según varios autores (Mueller-Dombois y Ellenberg, 1974; Kent y Coker, 1992; Nkoa, 2015), el uso de esta unidad de muestreo ofrece una buena combinación de representatividad y facilidad de manejo en estudios ecológicos sobre arvenses.

La recolección de los ejemplares de arvenses se llevó a cabo siguiendo el método sugerido por Lot y Chiang (1986) en las mismas fechas de los muestreos, tanto en los cuadros como en toda la parcela, además de en áreas adyacentes y otros espacios cercanos (como caminos y veredas), con el objetivo de recolectar el mayor número posible de ejemplares con estructuras reproductivas (flores o frutos) para facilitar su identificación taxonómica.

Identificación taxonómica

Se consultaron la Flora de Guerrero, la Flora del Bajío y la Flora de Veracruz, así como diversas plataformas y bases de datos de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, como el Herbario Virtual de CONABIO y Malezas de México. La revisión de la nomenclatura se realizó utilizando la base de datos The World Flora Online (WFO, 2024), la cual sigue el sistema de clasificación del APG IV (Angiosperm Phylogeny Group, cuarta versión). Los ejemplares herborizados se depositaron en el herbario del Laboratorio de Plantas de la Universidad Intercultural del Estado de Guerrero. Tras la identificación se revisaron las fuentes de información mencionadas anteriormente para determinar el origen (nativas o introducidas), su estatus (endémicas), y la forma biológica de las arvenses registradas; además se revisó la NOM-059-SEMARNAT-2010 para verificar si algunas de las especies estaban catalogadas en alguna categoría de riesgo. En la lista de arvenses se incluyó a especies arbustivas y arbóreas, ya que como crecen dentro de las parcelas los propietarios las consideran plantas indeseables y la mayoría de ellos fueron individuos juveniles.

Análisis de datos

Para determinar la representatividad del muestreo, se elaboraron curvas de acumulación de especies utilizando el estimador no paramétrico Chao 2 con el programa Estimates v.9.1 (Colwell *et al.*, 2014). La diversidad alfa se estimó mediante el índice de Shannon-Wiener (H'), la dominancia de Simpson (λ) y el número efectivo de especies, que incluye N_0 (número total de especies, S), N_1 (número de especies abundantes, $e^{H'}$), y N_2 (número de especies muy abundantes, $1/\lambda$) según Moreno *et al.* (2011). Para evaluar diferencias en la diversidad entre comunidades, se aplicó la prueba *t* de Hutchenson al índice de Shannon y Wiener y la diversidad beta se calculó con el índice de Whitaker ($\beta = S/(\alpha - 1)$) (Moreno, 2001) y se

realizó un análisis de similitud florística entre las comunidades empleando el método de agrupamiento UPGMA (unweighted pair-group method with arithmetic averaging) y el coeficiente de similitud de Jaccard ($J = \frac{C}{A+B-C}$) (Magurran, 1988). Todos los análisis se realizaron con el programa Past v.4.03 (Hammer *et al.*, 2001).

Para comprender mejor la estructura de la comunidad de arvenses se calculó el Índice de valor de importancia que se define como (Mueller-Dombois y Ellenberg, 1974):

$$IVI = \frac{1}{3}(AR + DR + FR) \times 100$$

Donde:

Abundancia relativa (AR):

$$AR = \left(\frac{\text{Número de individuos de la especie } i}{\text{Número de individuos de todas las especies}} \right) \times 100$$

Dominancia relativa (DR):

$$DR = \left(\frac{\text{Dominancia (cobertura) de la especie } i}{\text{Dominancia (cobertura) de todas las especies}} \right) \times 100$$

Frecuencia relativa (FR):

$$FR = \left(\frac{\text{Frecuencia de la especie } i}{\text{Frecuencia de todas las especies}} \right) \times 100$$

RESULTADOS

Riqueza de especies y estructura

Entre la riqueza observada -127 spp.- en las parcelas muestreadas y la esperada -185 spp.- (Figura 2a) hubo una diferencia de 58 especies; es decir, que el esfuerzo de muestreo realizado para las tres comunidades alcanzó el 68.6 % del posible número de arvenses presentes en las parcelas de maíz. La representatividad a nivel local fue mayor en La Ciénega que registró el 81.6% (49 de 60) especies esperadas (Figura 2c), 78.94 % en Ixcateopan (30 de 38) (Figura 2b) y en El Aserradero el 75.94% (60 de las 79) (Figura 2d), por lo que se esperaría el registro de nuevas especies a nivel local y regional.

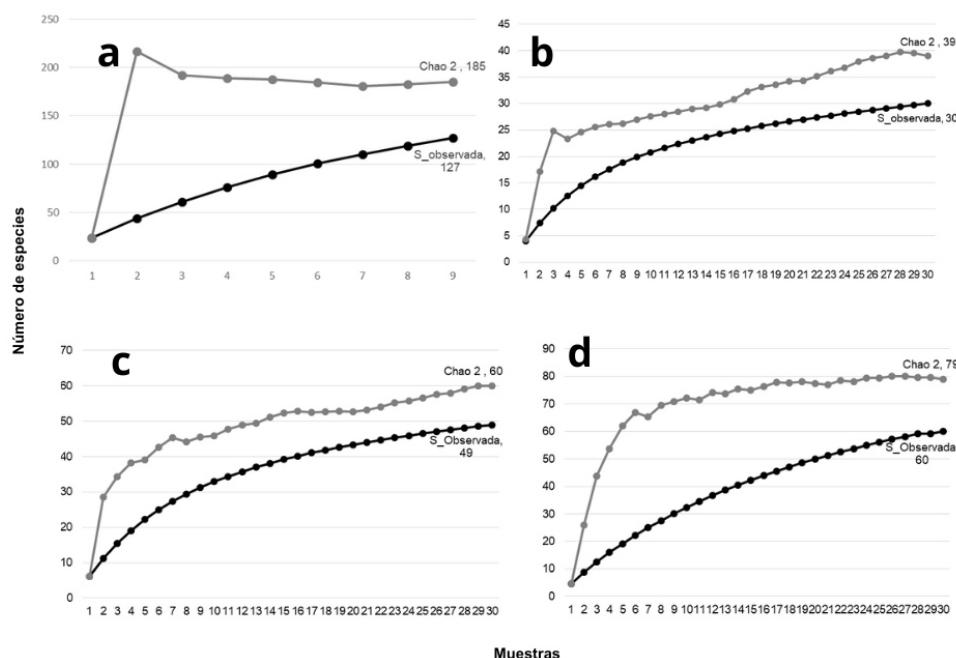


Figura 2. Curvas de acumulación de especies a nivel (a) regional y en las comunidades (b) Ixcateopan, (c) La Ciénega y (d) El Aserradero.

Figure 2. Species accumulation curves at regional level (a) and study locations (b) Ixcateopan, (c) La Ciénega and (d) El Aserradero.

Composición de especies

Del total de especies registradas el 80.31% pertenece a las Eudicotiledóneas, 18.11% a las Monocotiledóneas y el 1.58% a las Pteridophytas. Además, el 80.31% fueron nativas (de las cuales 11.82% son endémicas), 11.81% introducidas y 7.87% naturalizadas, ninguna de ellas se encuentra en alguna categoría de protección de la NOM-059-SEMARNAT-2015.

Las especies registradas pertenecen a 32 familias botánicas; de las cuales las mejor representadas fueron la Asteraceae con 32 especies, Poaceae con 16 y Fabaceae con 13, el resto de las familias presentaron menos de 10 especies. A nivel local, en El Aserradero se recolectaron 60 especies de 21 familias, siendo las Asteraceae la mejor representada (13 spp.), seguida de la Poaceae (10 sp.) y Fabaceae (6 spp.). En La Ciénega se registraron 49 especies, pertenecientes a 20 familias de las cuales la Asteraceae (18 spp.), Fabaceae (5 spp.), Poaceae y Solanaceae (con 3 spp.), presentaron la mayor riqueza. En Ixcateopan se registraron 30 especies de 13 familias donde la Euphorbiaceae (5 spp.), Asteraceae y Poaceae (4 spp.) fueron las mejor representadas (Figura 3).

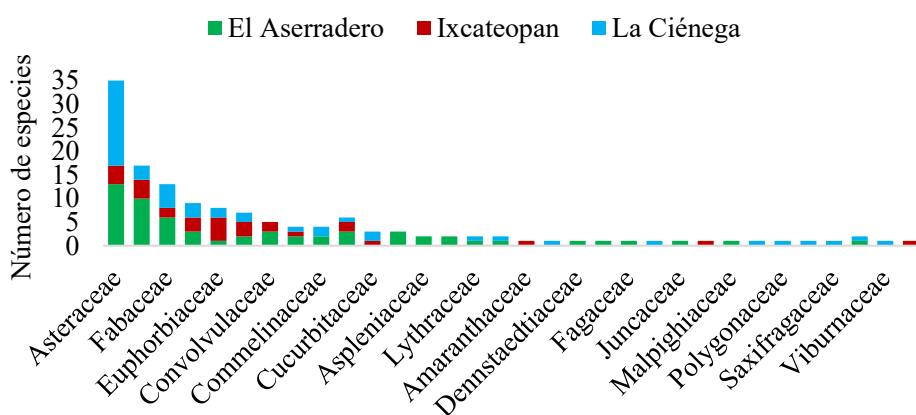


Figura 3. Número de especies arvenses por familia y localidad registradas en la región Montaña.

Figure 3. Number of weed species by family and locality recorded in the Mountain region.

La forma de vida predominante fue la herbácea anual, que representa el 53.50% del total, seguida por las herbáceas perennes con un 25.98%, las arbustivas con un 18.9% y, por último, las arbóreas, que constituyen el 1.57%.

Abundancia y densidad

Se registraron 3 941 individuos en las tres localidades con una densidad de 43.78 individuos por m². Las especies más abundantes en las tres localidades fueron: *Stevia tomentosa* Kunth, *Persicaria nepalensis* (Meisn.) Miyabe, *Stevia* sp., *Galinsoga quadriradiata* Ruiz & Pav., y *Verbena carolina* L., con más de 160 individuos cada una. En La Ciénega registró la mayor abundancia y densidad con 1 969 individuos y 65 individuos m², en El Aserradero se registraron 1 220 y 40 individuos por m² y en Ixcateopan 752 individuos y 25 individuos por m². Las especies más abundantes para La Ciénega fueron *Stevia tomentosa* Kunth, *Persicaria nepalensis* (Meisn.) Miyabe y *G. quadriradiata* Ruiz & Pav., con más de 150 individuos; en Ixcateopan fueron *Sanvitalia procumbens* Lam. y *Euphorbia heterophylla* L. con más de 100 individuos; para El Aserradero fueron *Stevia* sp., *Verbena carolina* L. y *Eupatorium* sp., con más de 140 individuos (Figura 4).

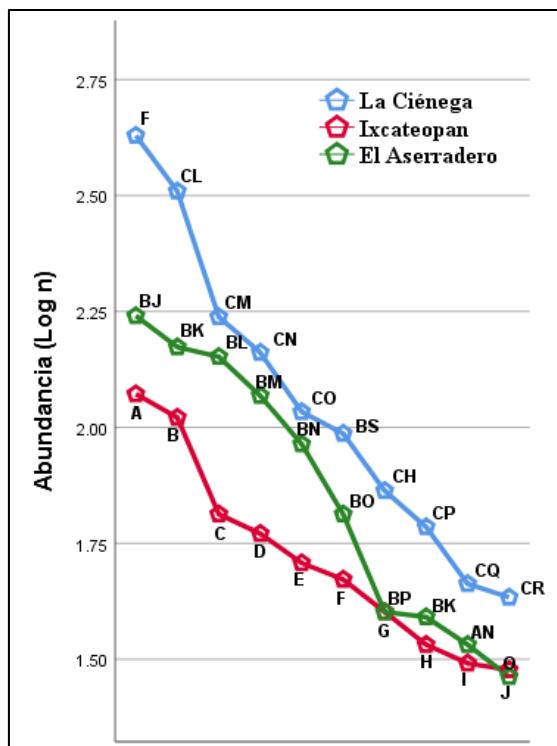


Figura 4. Especies de arvenses con mayor abundancia en las diferentes localidades de estudio. A = *Stevia sp.*, AN = *Euphorbia hirta*, B = *Verbena carolina*, BJ = *Sanvitalia procumbens*, BK = *Euphorbia heterophylla*, BK = *Solanum rostratum*, BL = *Sida hyssopifolia*, BM = *Mentzelia hispida*, BN = *Melampodium divaricatum*, BO = *Euphorbia dentata*, BP = *Panicum maximum*, BS = *Echinochloa colona*, C = *Eupatorium sp.*, CH = *Solanum americanum*, CL = *Persicaria nepalensis*, CM = *Galinsoga quadriradiata*, CN = *Smallanthus connatus*, CO = *Melampodium nutans*, CP = *Indigofera suffruticosa*, CQ = *Commelina tuberosa*, CR = *Callisia amplexicaulis*, D = *Conoclinium coelestinum*, E = *Spermacoce alata*, F = *Stevia tomentosa*, G = *Commelina diffusa*, H = *Porophyllum punctatum*, I = *Helicocarpus occidentalis*, J = *Ipomoea cholulensis*, O = *Spermacoce suaveolens*.

Figure 4. Species of greatest abundance of weed species in the different study communities. A = *Stevia sp.*, A = *Stevia sp.*, AN = *Euphorbia hirta*, B = *Verbena carolina*, BJ = *Sanvitalia procumbens*, BK = *Euphorbia heterophylla*, BK = *Solanum rostratum*, BL = *Sida hyssopifolia*, BM = *Mentzelia hispida*, BN = *Melampodium divaricatum*, BO = *Euphorbia dentata*, BP = *Panicum maximum*, BS = *Echinochloa colona*, C = *Eupatorium sp.*, CH = *Solanum americanum*, CL = *Persicaria nepalensis*, CM = *Galinsoga quadriradiata*, CN = *Smallanthus connatus*, CO = *Melampodium nutans*, CP = *Indigofera suffruticosa*, CQ = *Commelina tuberosa*, CR = *Callisia amplexicaulis*, D = *Conoclinium coelestinum*, E = *Spermacoce alata*, F = *Stevia tomentosa*, G = *Commelina diffusa*, H = *Porophyllum punctatum*, I = *Helicocarpus occidentalis*, J = *Ipomoea cholulensis*, O = *Spermacoce suaveolens*.

Diversidad alfa

De las 127 especies registradas (N0) en las localidades muestreadas en la Montaña de Guerrero, 87 fueron abundantes (N1) y 66 muy abundantes (N2). La diversidad de especies según el índice de Shannon-Wiener (H') fue de 3.8, con una dominancia (D) de 0.015. El Aserradero presentó la mayor riqueza de especies (60 spp.) y diversidad ($H' = 3.1$). La prueba de t de Hutchenson para la diversidad (H') mostró diferencias significativas entre las localidades de estudiadas (El Aserradero y La Ciénega, $t = 5.2$, $P < 0.0002$, El Aserradero e Ixcateopan, $t = 7.57$, $P < 0.0001$ y La Ciénega e Ixcateopan, $t = -2.22$, $P = 0.02$). En términos de dominancia (D), La Ciénega presentó el valor más alto, con 0.098 (Tabla 3).

Tabla 3. Riqueza y diversidad de especies arvenses por comunidad.
Table 3. Weed species diversity at each community.

| Índice | La Ciénega | Ixcateopan | El Aserradero | Total |
|--|------------|------------|---------------|-------|
| Simpson (D) | 0.098 | 0.080 | 0.072 | 0.038 |
| Shannon-Wiener (H') | 2.8 | 2.7 | 3.1 | 3.8 |
| N0 = número total de especies | 49 | 30 | 60 | 127 |
| N1 = número de especies abundantes | 17.77 | 16.16 | 22.62 | 46.85 |
| N2 = número de especies muy abundantes | 10.18 | 12.43 | 13.75 | 25.64 |

Diversidad beta

El número de especies de arvenses compartidas entre las localidades fue mayor entre La Ciénega (LC) y El Aserradero (EA), con 6 spp. y una similitud (J_J) de 0.06. Ixcateopan y La Ciénega compartieron 5 especies y una similitud de 0.05. El Aserradero e Ixcateopan, solo compartieron 2 especies, con similitud de 0.02.

El número de especies compartidas entre las parcelas de la misma comunidad fue entre una y seis. En la figura 5 se identifican tres grupos que separan las parcelas de cada localidad. El Aserradero muestra una similitud muy baja con las parcelas de La Ciénega e Ixcateopan. Aunque la agrupación entre las parcelas de La Ciénega e Ixcateopan es ligeramente mayor, la similitud entre ellas también es baja. La similitud entre las parcelas dentro de cada localidad osciló entre 0.17 y 0.44; las de La Ciénega presentaron similitudes de 0.31 a 0.36, las de Ixcateopan de 0.25 a 0.44, y las del Aserradero de 0.15 a 0.25.

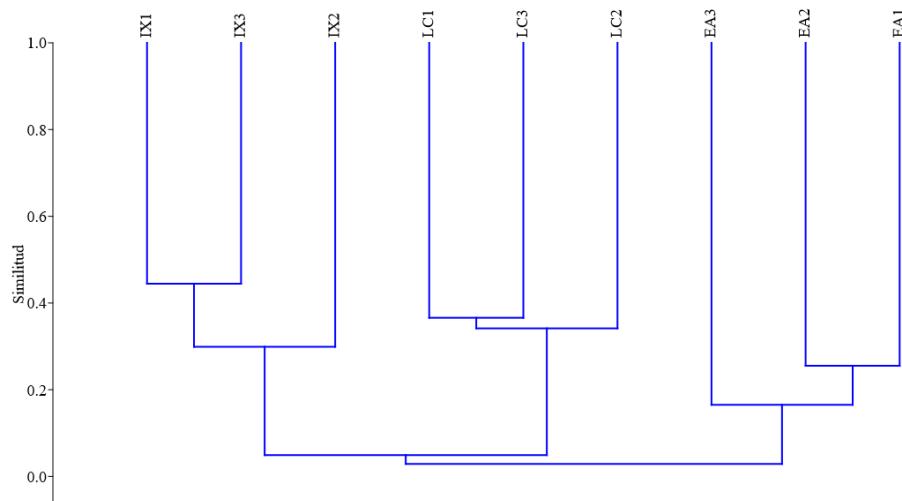


Figura 5. Similitud entre localidades y parcelas muestreadas en las distintas comunidades (IX = Ixcateopan, LC = La Ciénega y EA= El Aserradero).

Figure 5. Similarity between locations and sampled at each study community (IX = Ixcateopa, LC = La Ciénega and EA = El Aserradero).

Índice de Valor de importancia (IVI)

La especie con mayor peso ecológico en las localidades muestreadas fue *Stevia tomentosa* Kunth con 4.16%, seguida de *Persicaria nepalensis* (Meisn.) Miyabe (3.748%), *Euphorbia heterophylla* L. (3.40%), *Solanum americanum* Mill. (3.10%) y *Echinochloa colona* (L.) Link (3.071%). En el caso de la comunidad de La Ciénega *P. nepalensis* y *S. americanum* fueron las que presentaron los valores más altos con 9.08% y 7.27% respectivamente, en Ixcateopan *E. heterophylla* (11.19%) y *Sanvitalia procumbens* (9.44%) y en El Aserradero *Spermacoce alata* (8.26%) y *S. tomentosa* (6.31%) (Figura 6).

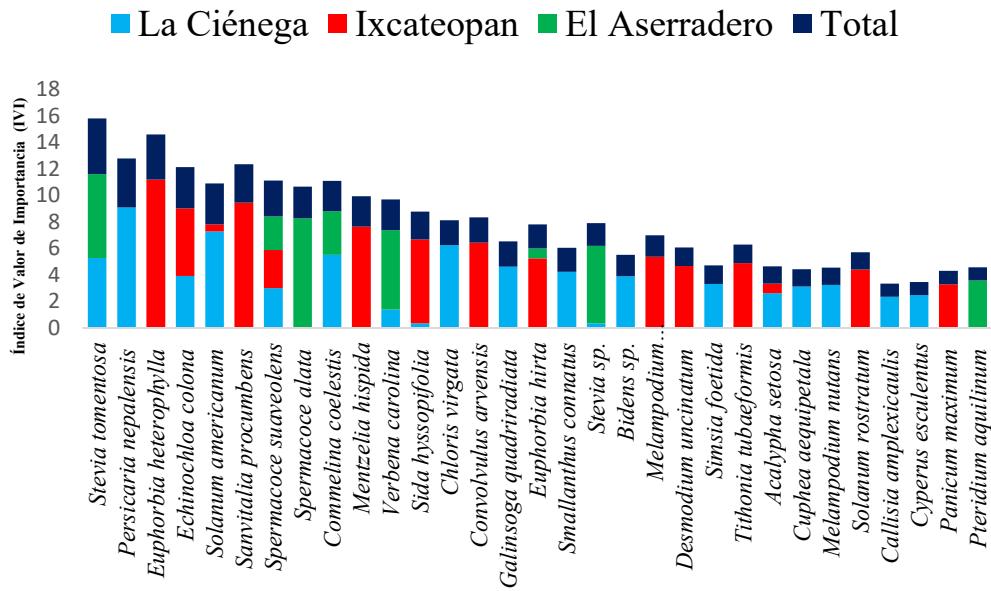


Figura 6. Índice de valor de importancia de las especies arvenses más representativas de cada comunidad y total.
Figure 6. Importance value index of weed species sampled by community and total.

DISCUSIÓN

Las especies registradas como arvenses en su mayoría (80.31%) son nativas, 11.81% introducidas y 7.87% naturalizadas, asimismo el 80.31% son eucotiledóneas y solo el 18.11% monocotiledóneas, lo que coincide con lo reportado en diversos estudios sobre este grupo de plantas en diferentes regiones de México y otros países (Almazán, 1993; Chávez y Guevara-Féfer, 2003; Sánchez- Blanco y Guevara-Féfer, 2013; Mascorro- De Loera *et al.*, 2023).

Las familias botánicas mejor representadas en el estudio fueron Asteraceae, Poaceae, Fabaceae y Solanaceae, lo cual concuerda con lo reportado en investigaciones previas, como las de Almazán (1993) y Mascorro-De Loera *et al.* (2023). Según Espinosa y Villaseñor (2017), estas familias no solo se destacan por su diversidad dentro del conjunto de plantas en general, sino también entre las arvenses, siendo algunas de las más prolíficas y adaptativas en diversos ecosistemas agrícolas.

La riqueza y diversidad de especies registrada en las parcelas de maíz de la Montaña de Guerrero ($H' = 3.84$, 127 especies) es superior a lo reportado en otros estudios de la misma entidad y diferentes regiones de México. Almazán y Bermúdez (1993) identificaron 115 especies en el Valle de Iguala, mientras que Guzmán-Mendoza *et al.* (2022) reportaron una diversidad menor ($H' = 2.94$, 26 especies) en monocultivos del Bajío, México; y Rivera *et al.* (2021) documentaron una diversidad aún más baja ($H' = 2.14$, 42 especies) en la Alcaldía de Cuajimalpa, Ciudad de México.

Las diferencias observadas entre los estudios pueden atribuirse a las características geográficas de las localidades incluidas en este trabajo, que abarcan un rango altitudinal amplio (de 930 a 1 959 m s.n.m.), lo cual favorece una mayor diversidad de especies. Como señalan Muoni (2014) y Blonder *et al.* (2014), la diferenciación de nichos ecológicos a lo largo de múltiples dimensiones funcionales impulsa la adaptación de las plantas a condiciones ambientales y de manejo específicas. En este mismo sentido, Blanco y Leyva (2007) subrayan la importancia de estos factores para explicar las variaciones en la diversidad a nivel local. Este fenómeno se refleja en los resultados del presente estudio, que muestran diferencias significativas en la diversidad entre las localidades, según la prueba de Hutcheson: El Aserradero y La Ciénega ($t = 5.2$, $P < 0.0002$), El Aserradero e Ixcateopan ($t = 7.57$, $P < 0.0001$) y La Ciénega e Ixcateopan ($t = -2.22$, $P = 0.02$).

Lo anterior se refleja en la baja similitud de especies entre las parcelas de las distintas comunidades (Índice de Jaccard, $J_1 = 0.07\%$). Solo se registró en las tres comunidades la

especie *Spermacoce suaveolens* (G.Mey.) Kuntze, la cual tiene una amplia distribución, abarcando altitudes de entre 900 a 2 400 m s.n.m. (Bacigalupo y Cabral, 1999).

La abundancia de especies también depende de diversos factores. Segundo Zimdalh y Clark (1982), aspectos como el tipo y la frecuencia de la labranza, la rotación de cultivos, y el tipo de herbicida utilizado influyen significativamente en la composición del banco de semillas y las características de cada especie, así como las características fisico-ambientales de cada zona (Almazán, 1993; Blanco *et al.*, 2014).

En este estudio, las parcelas de La Ciénega presentaron los valores más altos de densidad (1 989 individuos, 65 ind m⁻²), seguidas de El Aserradero (1 220 individuos, 40.6 ind m⁻²) e Ixcateopan (752 individuos, 25.6 ind m⁻²). Las especies más abundantes fueron *Stevia tomentosa* Kunth y *Persicaria nepalensis* (Meisn.) Miyabe. En contraste, Guzmán-Mendoza *et al.* (2022) reportaron otras especies dominantes como *Parthenium hysterophorus* L., *Portulaca oleracea* L., *Amaranthus hybridus* L., *Tithonia tubaeformis* (Jacq.) Cass., y *Brassica nigra* (L.) W.D.J. Koch. Por su parte, Almazán-Juárez (1993) identificó *Cyperus rotundus* L., *Malvastrum coromandelianum* (L.) Torr., y *Panicum reptans* L.

Las especies con mayor valor de importancia (IVI) en las comunidades estudiadas fueron *Stevia tomentosa* Kunth y *Persicaria nepalensis* (Meisn.) Miyabe, debido a su abundancia en dos de las comunidades analizadas. En particular, en La Ciénega, las especies más relevantes fueron *P. nepalensis* y *Euphorbia heterophylla* L., mientras que, en Ixcateopan y El Aserradero, la especie con mayor relevancia ecológica fue *Spermacoce alata* Aubl., que alcanzó un IVI del 8.26%. El IVI, que combina aspectos de la abundancia, frecuencia y dominancia de una especie, refleja su importancia ecológica en el ecosistema, la cual está influenciada tanto por factores ambientales como por las prácticas de manejo agrícola.

CONCLUSIONES

El estudio de la comunidad de arvenses en parcelas de maíz en la Montaña de Guerrero evidencia una notable riqueza y diversidad de especies, con predominancia de las nativas (80.31%) y una mayoría de eucotiledóneas (80.31%), lo que coincide con los patrones observados en otras regiones de México y en estudios internacionales. Las familias botánicas más representadas, como Asteraceae, Poaceae, Fabaceae y Solanaceae, se alinean con los hallazgos de investigaciones previas y destacan por su amplia diversidad tanto a nivel local como global.

La diversidad registrada ($H' = 3.84$, 127 especies) supera la reportada en estudios de otras regiones de México y se refleja en la baja similitud de especies entre las comunidades, con solo una especie, *Spermacoce suaveolens* (G.Mey.) Kuntze, presente en todas las localidades., lo cual puede atribuirse a la variación altitudinal de las parcelas estudiadas.

Las especies más abundantes (*Stevia tomentosa* y *Persicaria nepalensis*), al igual que las de mayor IVI *Spermacoce alata*, que es en ciertas localidades refleja la importancia de considerar múltiples factores ecológicos y de manejo en la evaluación de las comunidades arvenses.

Es relevante señalar que *Persicaria nepalensis*, una especie exótica invasora de alto riesgo para la diversidad local en México requiere especial atención para controlar su expansión y mitigar sus efectos negativos en el ecosistema. Estos resultados subrayan la necesidad de estrategias de manejo adaptadas a las condiciones locales para conservar la biodiversidad y optimizar la productividad agrícola en las parcelas de maíz de la Montaña de Guerrero.

LITERATURA CITADA

- Almazán, J. A. (1993). Contribución al conocimiento de la flora arvense del Estado de Guerrero (Méjico). *Botánica Complutensis*, 18, 137-150. <https://core.ac.uk/download/pdf/38807307.pdf>
- Altieri, M. A., Funes-Monzote, F. R., & Petersen, P. (2012). Agroecologically efficient agricultural systems for smallholder farmers: contributions to food sovereignty. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0065-6>

- Ayala-Enríquez, M. I. (2019). Caracterización del sistema milpa en Santa Catarina, Tepoztlán, Morelos, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 11-23. https://biblio.colsan.edu.mx/arch/especi/An_sag_011.pdf
- Bacigalupo, N. M. (1999). Revisión de las especies americanas del género *Diodia* (Rubiaceae, Spermacoceae). *Darwiniana*, 37(12), 153-165. <https://doi.org/10.14522/darwiniana.2014.371-2.348>
- Balcazar-Quiñones, L., Casas, A., Moreno-Calles, A. I., Camou-Guerrero, A., Pérez-Negrón, E., Vallejo-Ramos, M., & Torres-García, I. (2020). Arvenses y su relación con la cultura y la biodiversidad en México: Usos, manejo y conservación. *Ethnobiology and Conservation*, 9, 1-24. <https://doi.org/10.15451/ec2020-06-9.12-1-24>
- Baker, H. G. (1974.). The Evolution of Weeds. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5, 1-24. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.es.05.110174.000245>
- Blanco, V. Y., Leyva, G. Á., & Castro, L. I. (2014). Determinación del período crítico de competencia de arvenses en el cultivo del maíz (*Zea mays* L.). *Cultivos Tropicales*, 35(3), 62-69. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193232155007.pdf>
- Blanco, Y. L. (2007). Las arvenses en el agroecosistema y sus beneficios agroecológicos como hospederas de enemigos naturales. *Cultivos Tropicales*, 28(2), 21-28. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193217731003.pdf>
- Blanco, Y., & Leyva, A. (2010). Abundancia y diversidad de especies de arvenses en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) precedido de un barbecho transitorio después de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales*, 31(12), 12-16. Obtenido de <http://scielo.sld.cu/pdf/ct>
- Blonder, B., Lamman, C., Violle, C., & Enquist, B. J. (2014). The n-dimensional hypervolume. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 595-609. <https://doi.org/10.1111/geb.12146>
- Bye, R. A. (1981). Quelites-ethnoecology of edible greens-past, present and future. *Journal of Ethnobiology*, 1(1), 109-123. <https://ethnobiology.org/sites/default/files/pdfs/JoE/1-1/Bye1981.pdf>
- Caballero, J., & Mapes, C. (1985). Gathering and subsistence patterns among the P'urhepecha Indians of Mexico. *Journal of Ethnobiology*, 5(1), 31-47.
- Cepeda, A. M., Castellanos, G. L., Hernández, T. B. (2021). Caracterización ecológica de la flora de arvenses del alto y bajo Ricaurte (Bocayá). 17 (1), 112-125. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.09>
- Chávez, M. A., & Guevara-Féfer, F. (2003). *Flora arvense asociada al cultivo de maíz de temporal en el valle de Morelia, Michoacán, México*. (F. d. XIX, Ed.) Instituto de Ecología, A.C. Centro Regional.
- Colwell, R. K., & Elsensohn, J. E. (2014). EstimateS cumple 20 años: estimación estadística de la riqueza de especies y especies compartidas a partir de muestras, con extrapolación no paramétrica. *Ecografía*, 37, 609-613. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publica>
- Espinosa-García, F. J., & Villaseñor, J. L. (2017). Biodiversity, distribution, ecology and management of non-native weeds in Mexico. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(Supl. dic), 76-96. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2017.10.010>
- García-Barrios, L., Galván-Miyoshi, Y. M., Valdivieso-Pérez, I. A., Masera, O. R., Bocco, G., & Vandermeer, J. (2009). Neotropical forest conservation, agricultural intensification, and rural out-migration: The Mexican experience. *BioScience*, 59(10), 863-873. <https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.10.8>
- Guzmán-Mendoza, R., Hernández-Hernández, V., Salas-Araiza, M. D., & Núñez-Paleni, H. G. (2022). Guzmán-Mendoza, R.; Hernández-Diversidad de especies de plantas arvenses en tres monocultivos del Bajío, México. *Polibotánica*, 53, 69-85. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.5>
- Hammer, Ø., Harper, D., & Ryan, P. (2001). Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9. Obtenido de https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf.
- Kent, M., Coker, P. *Vegetation description and analysis. A practical approach*. Chichester: Ed. Jhon Wiley y Sons; 1992. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1393249>

Recibido:
3/junio/2024

Aceptado:
1/noviembre/2024

- Lorenzi, H. (2000). *Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas.* Brazil.: Instituto Plantarum. Nova Odessa.
- Lot, A., & Chiang, F. (1986). *Manual de Herbario. Administración y manejo de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos.* México: Consejo Nacional de la Flora de México A.C. Obtenido de https://issuu.com/jpintoz/docs/19_lot
- Magurran, A. E. (1988). *Ecological Diversity and its Measurement.* U.S.A: Cambridge, University Press.
- Mascorro-De Loera, R. D., Sosa-Ramírez, J., Luna-Ruiz, J. d., Perales-Segovia, C., & Cabrera-Manuel, F. (2023). Weed richness, diversity and similitude in rainfed maize fields at three communities of the state of Aguascalientes, Mexico. *Botanical Sciences*, 102(1), 234-255. <https://doi.org/10.17129/botsci.3362>
- Moreno, C. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad.* (Vol. 1). Zaragoza: La sociedad Entomológica Aragonesa. Obtenido de <http://entomologia.rediris.es/sea/manytos/metodos.pdf>
- 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*, 8(4), 1249-1261. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.4.745>
- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). *Aims and Methods of Vegetation Ecology.* New York: John Wiley and Sons.
- Muoni, T., Rusinamhodzi, L., Rugare, J. T., Mabasa, S., Mangosho, E., Mupangwa, W., & Thierfelder, C. (2014). Effect of herbicide application on weed flora under conservation agriculture in Zimbabwe. *Crop Protection*, 66, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014>
- Nkoa, R., Owen, M. D. K., & Swanton, C. J. (2015). Weed Abundance, Distribution, Diversity, and Community Analyses. *Weed Science*, 63(SP1), 64–90. <https://doi.org/10.1614/WS-D-13-00075.1>
- Rivera-Ramírez, I., Ríos-De la Cruz, A., B.-A. D., Bernal-Ramírez, L. A., Velázquez-Cárdenas, Y., de Santiago-Gómez, J. R., Rendón-Aguilar, B. (2021). Riqueza, abundancia y composición de arvenses en parcelas sujetas a diferentes prácticas agrícolas en la Alcaldía de Cuajimalpa, Ciudad de México. *Revista Etnobiología*, 19(1), 129-155. <https://revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/408/388>
- Roschewitz, I., Gabriel, D., Tscharntke, T., & Thies, C. (2005). The effects of landscape complexity on arable weed species diversity in organic and conventional farming: Landscape complexity and weed species diversity. *Journal of Applied Ecology*, 42(5), 873-882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01072.x>
- Sánchez-Blanco, J., & Guevara-Féfer, F. (2013). Plantas arvenses asociadas a cultivos de maíz de temporal en suelos salinos de la ribera del lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana*, 105, 107-129. <https://doi.org/10.21829/abm105.2013.227>
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera , (SIAP);. (2020). *Avances de siembras y cosechas.* Obtenido de https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/
- The World Flora Online (WFO). (2024). *An Online Flora of All Known Plants. Supporting the Global Strategy for Plant Conservation.* Obtenido de <https://www.worldfloraonline.org/>.
- Valdes, Y. B. (2016). El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. *Cultivos tropicales*, 37(4), 34-56. <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193247419003.pdf>
- Vibrans, H. (2016). Ethnobotany of Mexican weeds. *Ethnobotany of Mexico: Interactions of people and plants in Mesoamerica*, 287-317. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6669-7_12
- Vibrans, H. (2023). Malezas, buenezas, arvenses, ruderales, endémicas, invasoras ¿qué son? En C. G. Urrutia, *Manejo ecológico integral de arvenses no. 23* (págs. 10-18.). México: Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y (Baker) Tecnologías (CONAHCYT), México.
- Zimdahl, R. L., & Clark, S. K. (1982). Degradation of three acetanilide herbicides in soil. *Weed Science*, 30(5), 545-548. <https://doi.org/10.1017/S0043174500041138>

ANEXO

Tabla 4. Índice de valor de importancia de las especies arvenses muestreadas por comunidad y total.**Table 4.** Importance value index of weed species sampled by community and total.

| Clase | Familia | Especie | Origen | Número de individuos | Cobertura (%) | La Ciénega | Ixcateopan | El Aserradero | DR | FR | DOR | IVI |
|------------------|---------------|---|--------------|----------------------|---------------|------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| Eudicotyledoneae | Amaranthaceae | <i>Amaranthus hybridus</i> L. | Nativa | 1 | 23.5 | - | 0.52 | - | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.1 |
| | Asteraceae | <i>Ageratina arseniei</i> (B.L.Rob.) R.M.King & H.Rob. | Nativa * | 13 | 6 | 0.945 | - | - | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.4 |
| | | <i>Aldama excelsa</i> (Willd.) E.E.Schill. & Panero | Nativa * | 23 | 10.5 | 1.867 | - | - | 0.6 | 0.7 | 1 | 0.8 |
| | | <i>Barkleyanthus salicifolius</i> (Kunth) H.Rob. & Brettell | Nativa | 4 | 1 | 0.524 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| | | <i>Bidens aurea</i> Sherff | Nativa | 1 | 15 | - | - | 0.587 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Bidens</i> sp. | Nativa | 30 | 5 | 3.908 | - | - | 1.9 | 2.1 | 0.9 | 1.6 |
| | | <i>Calea utricifolia</i> DC. | Nativa | 1 | 15 | 0.357 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | | <i>Calypocarpus vialis</i> Less. | Nativa | 30 | 12 | 0.524 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| | | <i>Chromolaena odorata</i> (L.) R.M.King & H.Rob. | Nativa | 117 | 50.2 | - | - | 0.587 | 1.1 | 0.9 | 0.8 | 0.9 |
| | | <i>Elephantopus mollis</i> Kunth | Nativa | 25 | 9.5 | - | - | 0.776 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| | | <i>Erigeron bonariensis</i> L. | Naturalizada | 6 | 27.5 | 0.697 | - | 0.536 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.4 |
| | | <i>Erigeron variifolius</i> S.F.Blake | Nativa | 16 | 16 | - | - | 2.434 | 0.9 | 0.9 | 0.4 | 0.7 |
| | | <i>Fleischmannia pycnocephala</i> (Less.) R.M.King & H.Rob. | Nativa | 5 | | | | 3.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Galinsoga quadriradiata</i> Ruiz & Pav. | Nativa | 173 | 8 | 4.623 | - | - | 1.3 | 1.4 | 3.1 | 1.9 |
| | | <i>Gnaphalium americanum</i> Mill. | Nativa | 1 | 0.8 | 0.386 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | | <i>Melampodium divaricatum</i> DC. | Nativa | 51 | 12.5 | - | 5.384 | - | 1.7 | 1.4 | 1.7 | 1.6 |
| | | <i>Melampodium nutans</i> Stuessy | Nativa * | 108 | 15.4 | 3.251 | - | - | 0.9 | 0.9 | 2.3 | 1.3 |
| | | <i>Melampodium perfoliatum</i> Kunth | Nativa | 10 | 40 | - | - | 1.603 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | | <i>Parthenium hysterophorus</i> L. | Nativa | 5 | 6.3 | - | 1.696 | - | 0.6 | 0.7 | 0.1 | 0.5 |
| | | <i>Parthenium incanum</i> Kunth | Nativa | 2 | 3.2 | 0.409 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Persicaria nepalensis</i> (Meisn.) Miyabe | Introducida | 323 | 22.5 | 9.08 | - | - | 2.3 | 2.5 | 6.4 | 3.7 |
| | | <i>Physalis philadelphica</i> Lam. | Nativa | 1 | 41.1 | - | - | 0.57 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |

| Clase | Familia | Especie | Origen | Número de individuos | Cobertura (%) | La Cié nega | Ixcateopan | El Aserradero | DR | FR | DOR | IVI |
|-----------------|---------|---|-------------|----------------------|---------------|-------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | | <i>Porophyllum punctatum</i> S.F.Blake | Nativa | 39 | 1 | - | - | 0.759 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| | | <i>Richardia scabra</i> L. | Nativa | 3 | 40.3 | - | - | 0.604 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Sanvitalia procumbens</i> Lam. | Nativa | 118 | 3.3 | - | 9.449 | - | 1.5 | 1.6 | 5.6 | 2.9 |
| | | <i>Schkuhria schkuhrioides</i> Thell. | Nativa * | 8 | 1.5 | 0.398 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Simsia foetida</i> (Cav.) S.F.Blake | Nativa | 15 | 11 | 3.321 | - | - | 1.7 | 1.6 | 0.8 | 1.4 |
| | | <i>Smallanthus connatus</i> (Spreng.) H.Rob. | Nativa | 145 | 2.8 | 4.25 | - | - | 1.7 | 1.6 | 2 | 1.8 |
| | | <i>Sonchus asper</i> (L.) Hill | Introducida | 2 | 13.9 | - | - | 0.656 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Sonchus oleraceus</i> L. | Introducida | 3 | 10.3 | - | - | 1.675 | 0.6 | 0.7 | 0.1 | 0.5 |
| | | <i>Stevia</i> sp. | Nativa | 175 | 22.5 | 0.363 | - | 5.838 | 1.5 | 1.4 | 2.3 | 1.7 |
| | | <i>Stevia tomentosa</i> Kunth | Nativa * | 491 | 8.5 | 5.28 | - | 6.317 | 4.3 | 4.1 | 4.1 | 4.2 |
| | | <i>Tagetes lucida</i> Cav. | Nativa | 24 | 0.8 | 1.274 | - | - | 0.2 | 0.2 | 1.1 | 0.5 |
| | | <i>Tithonia tubaeformis</i> (Jacq.) Cass. | Nativa | 10 | 14.5 | - | 4.883 | - | 1.7 | 1.6 | 0.8 | 1.4 |
| | | <i>Verbesina fastigiata</i> B.L.Rob. & Greenm. | Nativa * | 32 | | 2.52 | | | 0.9 | 0.9 | 1.4 | 1 |
| Blechnaceae | | <i>Blechnum stoloniferum</i> Mett. | Nativa | 8 | 7.2 | - | - | 0.673 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| Caryophyllaceae | | <i>Drymaria cordata</i> Willd. ex Schult. | Nativa | 2 | 2.5 | - | - | 0.553 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | | <i>Drymaria malachiooides</i> Briq. | Nativa * | 11 | 3 | 1.106 | - | - | 0.6 | 0.7 | 0.1 | 0.5 |
| | | <i>Stellaria media</i> (L.) Vill. | Introducida | 6 | 24.3 | - | 1.284 | - | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.4 |
| | | <i>Stellaria ovata</i> Willd. ex D.F.K.Schltdl. | Nativa | 3 | 14.7 | - | - | 1.028 | 0.4 | 0.5 | 0 | 0.3 |
| Convolvulaceae | | <i>Convolvulus arvensis</i> L. | Nativa | 30 | 12 | - | 6.432 | - | 1.9 | 1.8 | 2 | 1.9 |
| | | <i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam. | Nativa | 9 | 7 | - | - | 1.774 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.5 |
| | | <i>Ipomoea capillacea</i> G.Don | Nativa | 17 | 20 | - | 1.168 | - | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.3 |
| | | <i>Ipomoea cholulensis</i> Kunth | Nativa | 29 | 22.5 | - | - | 1.83 | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 0.5 |
| | | <i>Ipomoea orizabensis</i> (G. Pelletan) Ledeb. ex Steud. | Nativa | 8 | 6.3 | - | - | 0.844 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| Cucurbitaceae | | <i>Cyclanthera tamnoides</i> Cogn. | Introducida | 1 | 2 | - | 0.62 | - | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |

| Clase | Familia | Especie | Origen | Número de individuos | Cobertura (%) | La Ciénega | Ixcateopan | El Aserradero | DR | FR | DOR | IVI |
|-----------------|---------|---|-------------|----------------------|---------------|------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | | <i>Sicyos villosus</i> Hook.f. | Nativa | 20 | 4 | 0.957 | - | - | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.4 |
| Euphorbiaceae | | <i>Acalypha setosa</i> A.Rich. | Nativa | 37 | 1 | 2.612 | 0.736 | - | 1.7 | 1.6 | 0.6 | 1.3 |
| | | <i>Eupatorium</i> sp. | Nativa | 142 | 6.3 | - | - | 1.86 | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.5 |
| | | <i>Euphorbia dentata</i> Michx. | Nativa | 47 | 25 | - | 2.481 | - | 0.9 | 0.9 | 0.4 | 0.7 |
| | | <i>Euphorbia heterophylla</i> L. | Nativa | 105 | 7 | - | 11.195 | - | 3 | 2.1 | 5.2 | 3.4 |
| | | <i>Euphorbia hirta</i> L. | Nativa | 34 | 26.1 | - | 5.242 | 0.759 | 2.1 | 1.8 | 1.3 | 1.8 |
| | | <i>Euphorbia</i> sp. | Nativa | 3 | 9.3 | 0.737 | - | - | 0.4 | 0.5 | 0 | 0.3 |
| | | <i>Ricinus communis</i> L. | Introducida | 5 | 2 | - | 1.701 | - | 0.6 | 0.7 | 0.1 | 0.5 |
| Fabaceae | | <i>Aeschynomene scabra</i> G.Don | Nativa | 2 | 5.5 | - | - | 1.208 | 0.4 | 0.5 | 0.2 | 0.4 |
| | | <i>Canavalia villosa</i> Benth. | Nativa | 3 | 10.4 | - | - | 0.518 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | | <i>Cassia</i> sp. | Nativa | 4 | 15 | 1.604 | - | - | 0.9 | 0.9 | 0.2 | 0.7 |
| | | <i>Crotalaria longirostrata</i> Hook. & Arn. | Nativa | 14 | 15.6 | - | - | 1.967 | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.6 |
| | | <i>Crotalaria pumila</i> Ortega | Nativa | 9 | 9 | - | - | 2.28 | 0.9 | 0.9 | 0.2 | 0.7 |
| | | <i>Crotalaria sagittalis</i> L. | Nativa | 3 | 4 | - | - | 0.536 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | | <i>Desmodium tortuosum</i> (Sw.) DC. | Nativa | 2 | 5.3 | 0.726 | - | - | 0.4 | 0.5 | 0 | 0.3 |
| | | <i>Desmodium uncinatum</i> (Jacq.) DC. | Nativa | 21 | 1 | - | 4.662 | - | 1.5 | 1.4 | 1.3 | 1.4 |
| | | <i>Indigofera suffruticosa</i> Mill. | Nativa | 61 | 5 | 1.978 | - | - | 1.1 | 0.9 | 0.5 | 0.8 |
| | | <i>Mimosa pigra</i> L. | Nativa | 1 | 7 | 0.374 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | | <i>Mimosa pudica</i> L. | Nativa | 1 | 2 | 0.386 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | | <i>Mimosa sensitiva</i> L. | Nativa | 8 | 3 | - | - | 1.603 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | | <i>Vachellia macracantha</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Seigler & Ebinger | Nativa | 2 | 32 | - | 0.533 | - | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| Fagaceae | | <i>Quercus obtusata</i> Bonpl. | Nativa * | 1 | 5 | - | - | 0.536 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| Geraniaceae | | <i>Geranium seemannii</i> Peyr. | Nativa | 3 | 36.3 | 0.538 | - | - | 0.4 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| Grossulariaceae | | <i>Ribes</i> sp. | Nativa | 2 | 15 | 1.303 | - | - | 0.4 | 0.5 | 0.7 | 0.5 |

| Clase | Familia | Especie | Origen | Número de individuos | Cobertura (%) | La Cié nega | Ixcateopan | El Aserradero | DR | FR | DOR | IVI |
|-----------------|--|---------|--------------|----------------------|---------------|-------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| Lamiaceae | <i>Hyptis capitata</i> Jacq. | | Nativa | 1 | 7.7 | - | - | 0.587 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | <i>Leonotis nepetifolia</i> (L.) R.Br. | | Introducida | 11 | 18 | - | - | 1.431 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |
| Lythraceae | <i>Cuphea aequipetala</i> Cav. | | Nativa | 15 | 2 | 3.124 | - | - | 1.1 | 1.1 | 1.7 | 1.3 |
| | <i>Cuphea toluicana</i> Peyr. | | Introducida | 4 | 23.7 | - | - | 0.536 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| Malpighiaceae | <i>Byrsinima crassifolia</i> Kunth | | Nativa | 10 | 10 | - | - | 2.121 | 0.6 | 0.7 | 0.5 | 0.6 |
| Malvaceae | <i>Abutilon dugesii</i> S.Watson | | Nativa | 2 | 20 | - | 0.809 | - | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| | <i>Abutilon trisulcatum</i> Urb. | | Nativa | 4 | 3 | - | 1.125 | - | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.3 |
| | <i>Fuertesimalva limensis</i> (L.) Fryxell | | Nativa | | 1.5 | - | - | 0.638 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | <i>Helicocarpus occidentalis</i> Rose | | Nativa * | 34 | 3 | - | - | 1.898 | 0.6 | 0.7 | 0.3 | 0.6 |
| | <i>Sida acuta</i> Burm.f. | | Naturalizada | 15 | 38.5 | 1.737 | - | - | 1.1 | 0.9 | 0.2 | 0.7 |
| | <i>Sida hyssopifolia</i> C.Presl | | Naturalizada | 67 | 8 | 0.363 | 6.323 | - | 2.1 | 2.3 | 1.9 | 2.1 |
| Melastomataceae | <i>Arthrostemma ciliatum</i> Pav. ex D.Don | | Nativa | 7 | 20 | - | - | 2.468 | 0.9 | 0.9 | 0.4 | 0.7 |
| | <i>Chaetogastra rufipilis</i> (Schltdl.) Walp. | | Nativa * | | 4.3 | - | - | 0.518 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | <i>Miconia schlechtendalii</i> Cogn. | | Nativa | 1 | 18.8 | - | - | 0.621 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| Onagraceae | <i>Mentzelia hispida</i> Willd. | | Nativa * | 59 | 20 | - | 7.64 | - | 2.1 | 2.1 | 2.6 | 2.3 |
| Oxalidaceae | <i>Oxalis corniculata</i> L. | | Naturalizada | 16 | 17.5 | 1.204 | - | - | 0.6 | 0.7 | 0.2 | 0.5 |
| | <i>Oxalis divergens</i> Benth. | | Nativa | 2 | 4.3 | - | - | 0.518 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| Papaveraceae | <i>Argemone platyceras</i> Link & Otto | | Nativa * | 8 | 0.1 | 0.582 | - | - | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| Rosaceae | <i>Rubus adenotrichus</i> Schltdl. | | Nativa | 14 | 26 | 1.475 | - | - | 0.9 | 0.9 | 0.1 | 0.6 |
| Rubiaceae | <i>Oldenlandia microtheca</i> (Cham. & Schltdl.) DC. | | Nativa * | 1 | 17.5 | - | 0.526 | - | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | <i>Spermacoce alata</i> Aubl. | | Naturalizada | 92 | 13.8 | - | - | 8.268 | 1.9 | 2.1 | 3.1 | 2.4 |
| | <i>Spermacoce suaveolens</i> (G.Mey.) Kuntze | | Nativa | 83 | 9 | 2.996 | 2.873 | 2.546 | 2.8 | 2.5 | 2.7 | 2.7 |
| Solanaceae | <i>Cestrum tomentosum</i> L.f. | | Nativa | 3 | 1 | - | - | 0.587 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | <i>Jaltomata procumbens</i> (Cav.) J.L.Gentry | | Nativa | 10 | 4.5 | 1.844 | - | - | 0.9 | 0.9 | 0.5 | 0.8 |

| Clase | Familia | Especie | Origen | Número de individuos | Cobertura (%) | La Cié nega | Ixcateopan | El Aserradero | DR | FR | DOR | IVI |
|------------------|---------------|--|--------------|----------------------|---------------|-------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| | | <i>Physalis chenopodifolia</i> Lam. | Nativa | 3 | 4 | - | 1.963 | - | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.6 |
| | | <i>Solanum americanum</i> Mill. | Nativa | 74 | 13.4 | 7.274 | 0.533 | - | 3.4 | 2.8 | 3.1 | 3.1 |
| | | <i>Solanum rostratum</i> Dunal | Nativa | 34 | 7.5 | - | 4.401 | - | 1.5 | 1.4 | 1 | 1.3 |
| | | <i>Solanum torvum</i> Sw. | Nativa | 7 | 17.6 | 1.516 | - | 0.759 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.8 |
| | Verbenaceae | <i>Verbena carolina</i> L. | Nativa | 164 | 10 | 1.389 | - | 5.996 | 2.1 | 2.3 | 2.5 | 2.3 |
| | Viburnaceae | <i>Sambucus canadensis</i> L. | Naturalizada | 18 | 6 | 1.107 | - | - | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | Vitacea | <i>Cissus</i> sp. | Nativa | 2 | 5 | - | 0.591 | - | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Sicyos microphyllus</i> Kunth | Nativa | 4 | 57.3 | 1.592 | - | - | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.7 |
| Monocotiledóneas | Commelinaceae | <i>Callisia amplexicaulis</i> (Klotzsch ex C.B.Clarke) Christenh. & Byng | Nativa | 43 | 0.5 | 2.357 | - | - | 1.1 | 1.1 | 0.7 | 1 |
| | | <i>Commelina diffusa</i> Burm.f. | Nativa | 46 | 33.3 | - | - | 3.219 | 0.6 | 0.7 | 1.4 | 0.9 |
| | | <i>Commelina tuberosa</i> L. | Nativa | 40 | 29.3 | 5.511 | - | 3.283 | 1.7 | 1.8 | 3.3 | 2.3 |
| | | <i>Tinantia erecta</i> (Jacq.) Fenzl | Nativa | 3 | 23.7 | - | - | 0.587 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | Cyperaceae | <i>Carex polystachya</i> Sw. ex Wahlenb. | Nativa | 4 | 9.5 | - | - | 0.81 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| | | <i>Cyperus esculentus</i> L. | Nativa | 26 | 5 | 2.477 | - | - | 1.3 | 1.4 | 0.5 | 1 |
| | Dioscoreaceae | <i>Dioscorea convolvulacea</i> Cham. & Schltld. | Nativa | 6 | 12.9 | - | - | 1.088 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.3 |
| | Poaceae | <i>Chloris virgata</i> Sw. | Nativa | 26 | 5 | 6.235 | - | - | 1.1 | 1.1 | 3.5 | 1.9 |
| | | <i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers. | Introducida | 13 | 7 | - | - | 1.174 | 0.4 | 0.5 | 0.1 | 0.3 |
| | | <i>Echinochloa colona</i> (L.) Link | Introducida | 126 | 1.4 | 3.932 | 5.093 | - | 3.6 | 3.4 | 2.1 | 3.1 |
| | | <i>Eleusine indica</i> Gaertn. | Naturalizada | 16 | 16 | - | - | 1.946 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 0.6 |
| | | <i>Melinis minutiflora</i> P. Beauv. | Introducida | 4 | 17.5 | - | - | 0.844 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.2 |
| | | <i>Oplismenus hirtellus</i> (L.) P.Beauv. | Naturalizada | 10 | 0.5 | - | - | 1.603 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| | | <i>Panicum maximum</i> Jacq. | Introducida | 40 | 1 | - | 3.308 | - | 0.9 | 0.9 | 1.2 | 1 |
| | | <i>Panicum trichoides</i> Sw. | Nativa | 6 | 21.3 | - | - | 2.434 | 0.9 | 0.9 | 0.4 | 0.7 |
| | | <i>Paspalum plicatulum</i> Michx. | Introducida | 7 | 5 | 1.626 | - | 1.774 | 0.9 | 0.9 | 0.3 | 0.7 |

| Clase | Familia | Especie | Origen | Número de individuos | Cobertura (%) | La Cié nega | Ixcateopan | El Aserradero | DR | FR | DOR | IVI |
|----------------|------------------|---|--------------|----------------------|---------------|-------------|------------|---------------|-----|-----|-----|-----|
| Pterido-phytas | | <i>Paspalum denticulatum</i> Trin. | Nativa | 6 | 4.8 | - | - | - | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.5 |
| | | Poacea 1 | Nativa | 2 | 9.3 | - | 0.591 | - | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| | | <i>Setaria verticillata</i> (L.) P.Beauv. | Introducida | 16 | 17.5 | 1.591 | - | - | 0.4 | 0.5 | 1.1 | 0.7 |
| | | <i>Sporobolus indicus</i> (L.) R.Br. | Naturalizada | 22 | 3.3 | - | - | 1.774 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.5 |
| | | <i>Urochloa meziana</i> (Hitchc.) Morrone & Zuloaga | Nativa * | 6 | 80 | - | - | 2.1 | 0.4 | 0.5 | 0.9 | 0.6 |
| | | <i>Urochloa plantaginea</i> (Link) R.D.Webster. | Introducida | 20 | 5 | - | - | 1.517 | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |
| | | <i>Urochloa</i> sp. | Nativa | 2 | 7.9 | - | - | 1.346 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.4 |
| | Aspleniaceae | <i>Asplenium blepharodes</i> D.C. Eaton | Nativa | 1 | 6.8 | - | - | 0.518 | 0.2 | 0.2 | 0 | 0.2 |
| | Dennstaedtiaceae | <i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn | Naturalizada | 8 | 5 | - | - | 3.579 | 0.6 | 0.7 | 1.7 | 1 |

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

VARIABILIDAD ESTRUCTURAL DE UNA COMUNIDAD DE REFERENCIA DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO

VARIABILITY OF THE STRUCTURE, COMPOSITION AND DIVERSITY OF A REFERENCE COMMUNITY OF TAMAULIPAN THORN SCRUB

Alanís-Rodríguez, E., A.M. Patiño-Flores, A. Collantes-Chávez-Costa, V.M. Molina-Guerra, E. Rubio-Camacho y A. Mora Olivo

VARIABILIDAD ESTRUCTURAL DE UNA COMUNIDAD DE REFERENCIA DEL MATORRAL ESPINOSO TAMAULIPECO

VARIABILITY OF THE STRUCTURE, COMPOSITION AND DIVERSITY OF A REFERENCE COMMUNITY OF TAMAULIPAN THORN SCRUB



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0
Atribución-No Comercial ([CC BY-NC 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).

Variabilidad estructural de una comunidad de referencia del matorral espinoso tamaulipeco

Variability of the structure, composition and diversity of a reference community of tamaulipan thorn scrub

Eduardo Alanís-Rodríguez <https://orcid.org/0000-0001-6294-4275>

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Linares, Nuevo León, México

Ana María Patiño-Flores <https://orcid.org/0000-0002-4463-3198>

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Linares, Nuevo León, México

Alejandro Collantes-Chávez-Costa <https://orcid.org/0000-0003-4067-6307>

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, División de Desarrollo Sustentable, Cozumel, Quintana Roo, México

Víctor M. Molina-Guerra <https://orcid.org/0000-0003-4405-699X>

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, Linares, Nuevo León, México

RENAC Asesorías Ambientales, S.A. de C.V., Linares, Nuevo León, México

Ernesto Rubio-Camacho <https://orcid.org/0000-0003-3464-363X>

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigación Regional Pacífico Centro (CIRPAC), Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco, Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México

Arturo Mora-Olivio. Autor de correspondencia: amorao@docentes.uat.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-9654-0305>

Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería y Ciencias / Instituto de Ecología Aplicada, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México

Eduardo Alanís-Rodríguez,
Ana María Patiño-Flores,
Alejandro Collantes-Chávez-
Costa, Víctor M. Molina-
Guerra, Ernesto Rubio-
Camacho, Arturo Mora Olivo

VARIABILIDAD
ESTRUCTURAL DE UNA
COMUNIDAD DE
REFERENCIA DEL
MATORRAL ESPINOSO
TAMAULIPECO

VARIABILITY OF THE
STRUCTURE,
COMPOSITION AND
DIVERSITY OF A
REFERENCE COMMUNITY
OF TAMAULIPAN THORN
SCRUB

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 81-95. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polibotanica.59.5](https://doi.org/10.18387/polibotanica.59.5)

RESUMEN: El matorral espinoso tamaulipeco es una de las comunidades vegetales más afectadas por el cambio de uso de suelo en el noreste de México. Sin embargo, aún existen algunas áreas donde este matorral ha alcanzado la madurez y se encuentra en buen estado de conservación. Se evaluó la variabilidad estructural, en composición y la diversidad de una comunidad de matorral espinoso tamaulipeco, en el Noreste de México. Se muestrearon 10 localidades, en cada una de ellas se establecieron 10 sitios de 10 x 10 m (100 sitios en total). A cada individuo leñoso se midió su diámetro basal ($d_{0.10} \geq 4$ cm), su altura total (h) y su identidad taxonómica. Se determinó área basal, cobertura vertical del dosel, volumen (de madera), riqueza de especies, abundancia, densidad de individuos y diversidad beta. Se realizó un análisis de varianza y como prueba *post hoc* la prueba de Tukey. Se registraron 30 especies, 26 géneros y 15 familias. La riqueza de especies osciló entre 3.90 ± 1.1 y 6.2 ± 1.22 , el área basal varió de 7.8 ± 4.4 a $14.1 \pm 10.9 \text{ m}^2 / \text{ha}$, en cuanto al cobertura se presentó una sobreposición de las copas en ocho de las 10 localidades. *Cordia boissieri*, *Havardia pallens*, *Senegalia greggii* y *Vachellia rigidula* se encontraron en las 10 localidades evaluadas. Las Fabaceae dominan las áreas de matorral maduro, y la similitud de las localidades es intermedia-alta. Las localidades presentan una alta variabilidad en abundancia, área basal, área de copa y volumen de madera, presentando diferencias significativas ($p < 0.05$).

Palabras clave: área de copa, ecosistema de referencia, matorral maduro, riqueza de especies, similitud.

ABSTRACT: The tamaulipan thornscrub is one of the plant communities most affected by land use change in northeastern Mexico. However, there are still some areas where this scrub has reached maturity and is in a good state of conservation. The structural variability, composition and diversity of a Tamaulipas thornscrub community in northeastern Mexico was evaluated. Ten locations were sampled, in each of them 10 sites of 10 x 10 m were established (100 sites in total). The basal diameter ($d_{0.10} \geq 4$ cm), total height (h) and taxonomic identity of each woody individual were measured. Basal area, vertical canopy cover, volume (of wood), species richness, abundance, density of individuals and beta diversity were determined. An analysis of variance was performed and the Tukey test was used as a *post hoc* test. 30 species, 26 genera and 15 families were recorded. Species richness ranged between 3.90 ± 1.1 and 6.2 ± 1.22 , basal area varied from 7.8 ± 4.4 to $14.1 \pm 10.9 \text{ m}^2 / \text{ha}$, and canopy cover overlapped in eight of the 10 locations. *Cordia boissieri*, *Havardia pallens*, *Senegalia greggii* and *Vachellia rigidula* were found in the 10 evaluated localities. Fabaceae dominate the mature scrub areas, and the similarity of the localities is intermediate-high. The localities present a high variability in abundance, basal area, crown area and wood volume, presenting significant differences ($p < 0.05$).

Key words: crown area, reference ecosystem, mature shrubland, species richness, similarity.

INTRODUCCIÓN

Las comunidades vegetales presentan distintos niveles de sucesión ecológica a través del tiempo, destacando la etapa clímax o vegetación madura como un estado de referencia del ecosistema en las actividades de restauración (Sabattini & Sabattini, 2018). Un ecosistema de referencia se caracteriza por estar escasamente antropizado y representar un estado de desarrollo maduro, con características de estructura, composición y funcionamiento similares al de un sistema en condición prística (González Ovando *et al.*, 2016). Sin embargo, un sistema de referencia no necesariamente es único, sino que comprende muchos estados posibles dentro de la gama histórica de variación (Egan & Howell, 2005; McDonald *et al.*, 2016). En ese contexto, las acciones de restauración ecológica se orientan al restablecimiento de la integridad biótica preexistente en términos de funcionamiento, composición de especies y estructura de la comunidad (SER, 2024), dentro de la ventana de variabilidad natural de un ecosistema de referencia (Wiens, 1996).

El cambio de uso de suelo, ocasionado principalmente por el abandono de los sitios sujetos con anterioridad al desarrollo de actividades productivas tales como la agrícola, ganadera y silvícola, ha modificado la estructura y composición de distintos ecosistemas del mundo (Johnson & Miyanishi, 2020) y de México en general (Velázquez *et al.*, 2002), y norte del país en particular (Arriaga, 2009). El matorral espinoso tamaulipeco (MET) es una comunidad vegetal restringida al noreste de México y sur de Texas (USA), caracterizada por la dominancia de arbustos y árboles bajos de 2 a 5 m de altura, como *Cordia boissieri*, *Celtis pallida*, *Havardia pallens*, *Leucophyllum frutescens*, *Opuntia engelmannii* y *Vachellia rigidula*; lamentablemente este matorral ha sido uno de los tipos de vegetación más afectados por la acción del hombre (Molina-Guerra *et al.*, 2019). A pesar de esto, aún es posible encontrar áreas con un buen estado de conservación, las cuales son propicias para tomarlas como referencia en futuros programas de restauración (Graciano-Ávila *et al.*, 2018).

Si bien se han desarrollado diversas investigaciones que evalúan la estructura vegetal de comunidades maduras de matorral espinoso tamaulipeco (Graciano-Ávila *et al.*, 2018; Mora-Donjuan *et al.*, 2013; Pequeño-Ledezma *et al.*, 2018), éstas se han enfocado a localidades puntuales, sin analizar la variabilidad natural en diferentes localidades. Por lo tanto, el objetivo general del presente trabajo fue describir y analizar la estructura, composición florística y diversidad de matorral espinoso tamaulipeco, en diez localidades distribuidas en un área de 160 km², en el centro del municipio de Linares, Nuevo León. Esto de tal manera que se pueda comparar la variación de las características del MET muestreado y en un futuro que sirva de referencia para mejorar las condiciones en comunidades semejantes degradadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Los sitios de muestreo se encuentran ubicados en el municipio de Linares, Nuevo León, en el Noreste de México (Figura 1). Según la clasificación de Köppen el clima predominante es BS1hw, correspondiente al tipo semiárido, templado, con lluvias en verano (Peel *et al.*, 2007). En el área se registra una precipitación anual que oscila entre los 600 y 1000 mm, y una temperatura media anual de 22.3 °C (García, 1988). Los tipos de suelo predominantes en el área de estudio son de tipo Vertisol y Rendzina, que se encuentran en zonas planas y lomerío, y de tipo Litosol y Regosol, presentes en zonas de ubicadas en la Sierra madre Oriental y sus lomeríos colindantes (García-Hernández & Jurado, 2008).

Esta superficie se encuentra circunscrita en la Provincia Florística de Tamaulipas, donde predominan los matorrales xerófilos y bosques espinosos, con mayor presencia de los géneros *Acacia*, *Celtis* y *Prosopis* (ahora *Neltuma*), entre otros (Morrone, 2005). En el municipio se reconocen seis tipos de vegetación, entre los que se encuentra el matorral espinoso tamaulipeco (MET) en distintos grados de conservación (García-Hernández & Jurado, 2008). El MET está constituido hasta por 160 taxa de plantas herbáceas y leñosas, que pertenecen a 46 familias, siendo las mejor representadas Asteraceae, Cactaceae, Fabaceae y Poaceae (Foroughbakhch *et al.*, 2013).

Diseño del muestreo

Con el propósito de localizar poblaciones del MET en condiciones de madurez sucesional o mejor integridad ecológica, se seleccionaron 10 localidades mediante verificación de campo y su revisión en imágenes satelitales de Google Earth. La selección de las localidades se realizó considerando criterios de composición florística (como la ausencia de especies invasoras asociadas con disturbios, ejemplares maduros y muertos en pie) e historia de uso de suelo (ausencia de actividades como desmontes, y actividades agropecuarias, de acuerdo con el registro histórico). En las localidades seleccionadas se tuvo conocimiento que la única alteración fue la colecta de algunos frutos y leña del suelo por pobladores locales. En la tabla 1 se muestra la ubicación, altitud, especies dominantes y tipo de suelo (INEGI, 2017) de las localidades estudiadas.

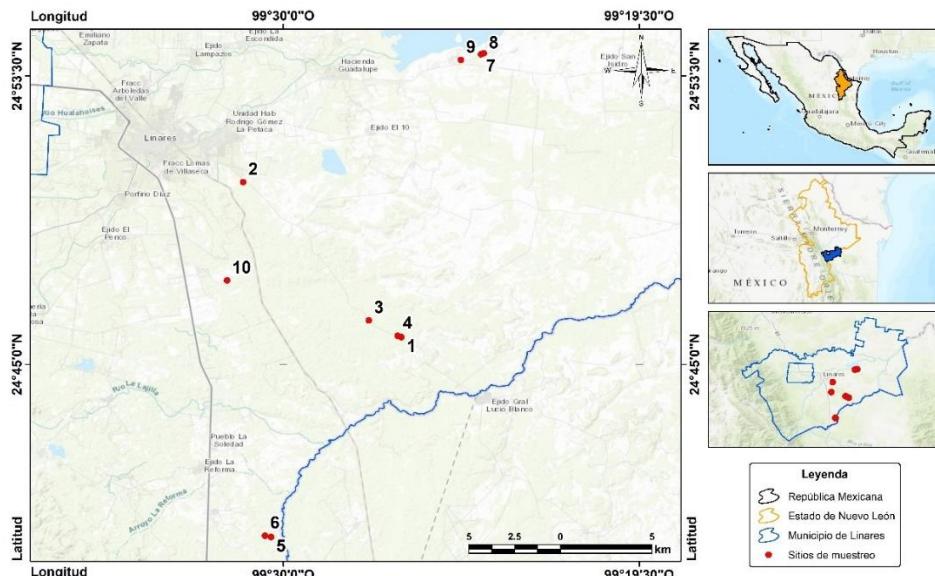


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del área de estudio. Las imágenes de la derecha muestran el mapa de México indicando el estado de Nuevo León, el estado de Nuevo León indicando el municipio de Linares y el municipio de Linares indicando las 10 localidades estudiadas. El mapa de la Izquierda es un acercamiento de la ubicación de la 10 localidades.

Figure 1. Geographic location map of the study area. The images on the right show the map of Mexico indicating the state of Nuevo León, the state of Nuevo León indicating the municipality of Linares, and the municipality of Linares indicating the 10 locations studied. The map on the left is a close-up of the location of the 10 locations.

Tabla 1. Variables bióticas (especies dominantes) y abióticas (elevación y tipo de suelo) de las localidades evaluadas.

Table 1. Biotic (dominant species) and abiotic (elevation and soil type) variables of the evaluated locations.

| Localidad | Coordenadas | Elevación (msnm) | Especies | Tipo de suelo |
|-----------|------------------------|------------------|--|----------------------------|
| 1 | 24.4548°N 99.2631°O | 331 | <i>Havardia pallens</i> , <i>Cordia boissieri</i> | Xerosol, Regosol, Vertisol |
| 2 | 24.5022°N 99.3111°O | 340 | <i>Havardia pallens</i> , <i>Cordia boissieri</i> | Xerosol, Regosol, Vertisol |
| 3 | 24.4617°N 99.2728°O | 336 | <i>Havardia pallens</i> , <i>Acacia rigidula</i> | Xerosol, Regosol, Vertisol |
| 4 | 24.4550°N 99.2637°O | 330 | <i>Havardia pallens</i> , <i>Cordia boissieri</i> | Vertisol |
| 5 | 24.3954°N 99.3021°O | 338 | <i>Porlieria angustifolia</i> , <i>Havardia pallens</i> | Xerosol, Regosol, Vertisol |
| 6 | 24.3956°N 99.3032°O | 334 | <i>Randia obcordata</i> , <i>Ebenopsis ebano</i> | Xerosol, Regosol, Vertisol |
| 7 | 24.5481°N 99.2410°O | 292 | <i>Cordia boissieri</i> | Luvisol, Vertisol |
| 8 | 24.5496°N 99.2405°O | 293 | <i>Vachellia farnesiana</i> , <i>Cordia boissieri</i> | Luvisol, Vertisol |
| 9 | 24.5358°N 99.2445°O | 290 | <i>Prosopis laevigata</i> , <i>Cordia boissieri</i> | Luvisol, Vertisol |
| 10 | 24.4728°N 99.3139°O | 380 | <i>Diospyros palmeri</i> , <i>Diospyros texana</i> | Xerosol, Regosol, Vertisol |

Análisis de la vegetación

En abril de 2019, se establecieron 10 cuadros de muestreo de 10×10 m (100 m^2) en cada una de las 10 localidades del MET seleccionadas (100 cuadros en total). En cada cuadro se registraron y midieron los individuos leñosos con un diámetro mayor a los 4 cm, medidos a 10 cm de la base ($d_{0.10} \geq 4$ cm). La medición del diámetro a 10 cm de la base es una medida estandarizada utilizada en matorrales (Alanís Rodríguez *et al.*, 2020). En el caso de los ejemplares que se ramifican desde la base se midieron todos los diámetros (Alanís Rodríguez *et al.*, 2020). A nivel de individuo, se registró su identidad taxonómica, y se les midió la altura total (h) con una vara telescopica Hastings® E-15-1, el diámetro basal ($d_{0.10}$) con una forcípula Haglöf Mantax Blue® 80 mm y los diámetros de copa (k) en sentidos N-S y E-O con un flexómetro de 10 m Truper®. La identidad de los individuos fue determinada a nivel de especie por personal calificado de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Molina-Guerra *et al.*, 2019), con el apoyo de muestras de herbario y utilizando la plataforma Taxonomic Name Resolution Service, versión 5.1.

Análisis de los datos

El área basal de los fustes (m^2) y la cobertura o el área de copa (m^2) fueron calculados mediante la ecuación:

$$A = \frac{\pi}{4} * d^2$$

Donde A es el área, π = un valor constante de 3.1416 y d = diámetro. Para estimar el volumen de madera del tronco (m^3) la fórmula utilizada fue la siguiente:

$$V = g * h * CM$$

Donde V es el volumen, g es la superficie supuesta circular del diámetro basal, h altura total del individuo y CM coeficiente mórfico, que para el matorral espinoso tamaulipeco es de 0.5 (Alanís Rodríguez *et al.*, 2020).

Se estimó por cada cuadro la riqueza de especies (S), la abundancia (N), y la densidad de individuos (N / ha) representada esta como la abundancia por cuadro, extrapolada a una hectárea. Con estos valores se contrastaron las variables de cada una de las diez localidades evaluadas. Previo al análisis paramétrico, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas. Una vez verificados, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor (localidad), para los valores de riqueza de especies (S) por sitio de muestreo, área basal (m^2 / ha), área de copa (m^2 / ha) y volumen (m^3 / ha). Como prueba *post hoc* se utilizó la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Los análisis se realizaron en el programa IBM SPSS Statistics 22.

De igual forma, se calculó la diversidad beta entre las localidades, definida como el grado de reemplazo de especies, o cambio biótico a través de condiciones ambientales (Whittaker, 1972); esta fue calculada mediante el uso del programa Past 3.14 (Hammer *et al.*, 2001), expresada a través del porcentaje de similitud (0% a 100%) y representada por medio del dendrograma de similitud de Bray-Curtis (Brower *et al.*, 1998).

RESULTADOS

En total se registraron 29 especies de plantas vasculares leñosas con diámetro basal mayor a 4 cm, pertenecientes a 25 géneros y 15 familias (Tabla 2). Los géneros con dos especies fueron *Celtis*, *Diospyros*, *Eysenhardtia* y *Vachellia*. La familia más representada fue Fabaceae con 11 especies, seguida de Rutaceae con tres y Cannabaceae, Ebenaceae y Euphorbiaceae con dos especies cada una. De las 29 especies, 13 tienen porte arbóreo y 17 arbustivo.

Tabla 2. Lista florística registrada del matorral espinoso tamaulipeco muestreado en Linares, Nuevo León.

Table 2. Recorded floristic list of the Tamulipan thorn scrub sampled in Linares, Nuevo León.

| Familia | Nombre científico | Nombre común | Forma de crecimiento |
|---------------|---|------------------|----------------------|
| Asparagaceae | <i>Yucca filifera</i> Chabaud | Palma china | Arbórea |
| Boraginaceae | <i>Cordia boissieri</i> A. DC. | Anacahuita | Arbórea |
| Cactaceae | <i>Opuntia engelmannii</i> Salm-Dyc ex Engelm. | Nopal | Arbustiva |
| Cannabaceae | <i>Celtis laevigata</i> Willd. | Palo blanco | Arbórea |
| Cannabaceae | <i>Celtis pallida</i> Torr. | Granjeno | Arbustiva |
| Celastraceae | <i>Schaefferia cuneifolia</i> A. Gray | Capul, Yupón | Arbustiva |
| Ebenaceae | <i>Diospyros palmeri</i> Eastw. | Chapote | Arbórea |
| Ebenaceae | <i>Diospyros texana</i> Scheele | Chapote manzano | Arbórea |
| Euphorbiaceae | <i>Bernardia myricifolia</i> (Scheele) S. Watson | Oreja de ratón | Arbustiva |
| Euphorbiaceae | <i>Croton incanus</i> Kunth | Salvia | Arbustiva |
| Fabaceae | <i>Erythrostemon mexicanus</i> (Rose) Gagnon & G.P. Lewis | Hierba del potro | Arbórea |
| Fabaceae | <i>Ebenopsis ebano</i> (Berland.) Barneby & J.W. Grimes | Ébano | Arbórea |
| Fabaceae | <i>Eysenhardtia polystachya</i> (Ortega) Sarg. | Taray | Arbustiva |
| Fabaceae | <i>Eysenhardtia texana</i> Scheele | Vara dulce | Arbustiva |
| Fabaceae | <i>Havardia pallens</i> (Benth.) Britton & Rose | Tenaza | Arbustiva |
| Fabaceae | <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit | Leucaena | Arbórea |
| Fabaceae | <i>Parkinsonia texana</i> (A.Gray) S. Watson | Palo verde | Arbórea |
| Fabaceae | <i>Prosopis laevigata</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) M.C. Johnst. | Mezquite | Arbórea |

| Familia | Nombre científico | Nombre común | Forma de crecimiento |
|------------------|--|----------------------------|----------------------|
| Fabaceae | <i>Senegalia greggii</i> (A.Gray) Britton & Rose | Uña de gato | Arbustiva |
| Fabaceae | <i>Vachellia farnesiana</i> (L.) Wight & Arn. | Huizache | Arbustiva |
| Fabaceae | <i>Vachellia rigidula</i> (Benth.) Seigler & Ebinger | Gavia, chaparro prieto | Arbustiva |
| Oleaceae | <i>Forestiera angustifolia</i> Torr. | Panalero | Arbustiva |
| Rhamnaceae | <i>Karwinskia humboldtiana</i> (Schult.) Zucc. | Coyotillo | Arbustiva |
| Rubiaceae | <i>Randia obcordata</i> S. Watson | Crucillo | Arbustiva |
| Rutaceae | <i>Casimiroa greggii</i> (S. Watson) F. Chiang | Manguito, chapote amarillo | Arbórea |
| Rutaceae | <i>Helietta parvifolia</i> (A. Gray ex Hemsl.) Benth. | Barreta | Arbórea |
| Rutaceae | <i>Zanthoxylum fagara</i> (L.) Sarg. | Colima | Arbustiva |
| Scrophulariaceae | <i>Leucophyllum frutescens</i> (Berland.) I.M. Johnst. | Cenizo | Arbustiva |
| Zygophyllaceae | <i>Porlieria angustifolia</i> A. Gray | Guayacán | Arbustiva |

Los valores de riqueza de especies (S) por sitio de muestreo oscilaron entre 3.90 ± 1.1 (media ± desviación estándar) a 6.2 ± 1.22 , mostrando diferencias ($gl=14$; $F=2.441$; $p=0.004$). Las localidades que presentaron diferencias fueron las 7 y 8, el resto presentó similitud estadística (Tabla 3). Los resultados de la abundancia (N / ha) oscilaron entre 1160 ± 142 N / ha a 2640 ± 527 N / ha, siendo el promedio de las 10 localidades 1906 ± 637 N / ha. En este parámetro ecológico, las localidades presentaron diferencias significativas ($gl=14$; $F=7.008$; $p=<0.001$) (Tabla 3).

Los valores del área basal oscilaron entre 7.8 ± 4.4 y 14.1 ± 10.9 m^2 / ha; la diferencia observada entre dichos valores fue estadísticamente significativa ($gl=14$; $F=2.734$; $p=0.001$). El área de copa en ocho de las 10 localidades evaluadas superará los 10000 m^2 / ha. Las localidades presentaron valores que variaron entre 7333 ± 2177 y 19206 ± 6828 m^2 / ha; la diferencia mostrada entre los valores de cobertura fue estadísticamente significativa ($gl=14$; $F=21.834$; $p<0.001$). En cuanto a los valores de volumen de madera registrados para las localidades se observó una oscilación que va de 17.2 ± 24.52 a 38.4 ± 41.9 m^3 / ha, diferencia que también fue estadísticamente significativa ($gl=14$; $F=2.734$; $p=0.001$) (Tabla 3).

Tabla 3. Valores promedios ± desviación estándar de la riqueza de especies (S), abundancia (N / ha), área basal (m² / ha), área de copa (m² / ha) y volumen (m³ / ha) de las 10 localidades evaluadas. Letras diferentes (a, b, c) muestran diferencias significativas ($P = 0.05$).

Table 3. Mean values ± standard deviation of species richness (S), abundance (N / ha), basal area (m² / ha), crown area (m² / ha) and volume (m³ / ha) of the 10 evaluated locations. Different letters (a, b, c) show significant differences ($P = 0.05$).

| Localidades | Riqueza de especies (S) | Abundancia (N / ha) | Área basal (m ² / ha) | Área de copa (m ² / ha) | Volumen (m ³ / ha) |
|-------------|-------------------------|---------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 4.9±1.3 a,b | 1920±551 b,c,d,e | 8.7±8.3 a,b | 9000±3860 a,b | 21.2±24.3 a,b |
| 2 | 5.7±1.8 a,b | 2140±360 c,d,e | 14.1±10.9 a,b,c | 11491±3754 a,b,c | 36.7±51 a,b,c |
| 3 | 4.5±0.7 a,b | 2160±222 c,d,e | 10.8±14.4 a,b,c | 7333±2177 a | 29.6±58.4 a,b |
| 4 | 5.1±1.6 a,b | 2180±1117 c,d,e | 7.8±10.3 a | 11364±7459 a,b,c | 17.2±24.5 a,b |
| 5 | 6±1.3 a,b | 1830±552 b,c,d | 12.3±11 a,b,c | 19206±6828 d,e | 38.4±41.9 a,b,c |
| 6 | 5.6±1.2 a,b | 2010±213 c,d,e | 7.8±4.4 a,b | 12344±5228 a,b,c,d | 18.3±13.6 a,b |
| 7 | 6.2±1.2 b | 2070±189 c,d,e | 13.3±4.1 a,b,c | 12751±2818 a,b,c,d | 31.8±12.4 a,b,c |
| 8 | 4.3±2.9 a | 2170±362 c,d,e | 13±7.3 a,b,c | 13312±4648 b,c,d | 31.6±28.5 a,b,c |
| 9 | 5.5±1.6 a,b | 2040±963 c,d,e | 13.1±8.3 a,b,c | 17439±5463 c,d,e | 36±26.1 a,b,c |
| 10 | 5.6±1 a,b | 1480±239 a,b,c | 13.9±7.8 a,b,c | 13108±4969 a,b,c,d | 36.1±17.7 b,c |

Las especies que destacaron por su presencia en las 10 localidades fueron *Cordia boissieri*, *Havardia pallens*, *Senegalia greggii* y *Vachellia rigidula*. Las especies *Casimiroa greggii*, *Croton incanus*, *Eysenhardtia texana* y *Opuntia engelmannii* fueron las que se encontraron en solo una localidad; mientras que *Celtis laevigata*, *Karwinskya humboldtiana* y *Leucaena leucocephala* se registraron en dos, y *Diospyros palmeri* y *Leucophyllum frutescens* estuvieron en tres de las 10 localidades muestreadas (Tabla 4).

Tabla 4. Abundancias (N / ha) de las especies del MET en las 10 localidades muestreadas (ordenadas alfabéticamente) en Linares, Nuevo León. El guion representa la ausencia de organismos de la especie en el sitio correspondiente.

Table 4. Abundances (N / ha) of MET species in the 10 sampled locations (sorted alphabetically) in Linares, Nuevo León. The dash represents the absence of organisms of the species at the corresponding site.

| Especies | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| <i>Bernardia myricifolia</i> | 10 | - | - | 10 | - | - | - | - | - | - |
| <i>Erythrostemon mexicanus</i> | - | - | 30 | - | 10 | - | - | - | - | - |
| <i>Casimiroa greggii</i> | - | 220 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Celtis laevigata</i> | - | - | - | 10 | - | - | - | - | - | 10 |
| <i>Celtis pallida</i> | - | - | - | - | - | 210 | 230 | 190 | 120 | - |
| <i>Cordia boissieri</i> | 370 | 540 | 210 | 390 | 80 | 20 | 1010 | 570 | 320 | 80 |
| <i>Croton incanus</i> | - | - | - | 10 | - | - | - | - | - | - |
| <i>Diospyros palmeri</i> | - | - | 20 | 60 | - | - | - | - | - | 400 |
| <i>Diospyros texana</i> | - | 10 | - | - | 60 | 80 | 60 | 40 | 60 | 320 |
| <i>Ebenopsis ebano</i> | 10 | 30 | - | 40 | 200 | 220 | 10 | - | 100 | 30 |
| <i>Eysenhardtia polystachya</i> | 90 | - | - | 70 | 30 | - | 10 | 60 | - | - |
| <i>Eysenhardtia texana</i> | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 200 |
| <i>Forestiera angustifolia</i> | - | 20 | - | 120 | - | 50 | 10 | - | - | - |

| Species | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <i>Havardia pallens</i> | 630 | 580 | 580 | 750 | 410 | 130 | 100 | 50 | 280 | 290 |
| <i>Helietta parvifolia</i> | 40 | - | 700 | 200 | 10 | - | - | - | - | - |
| <i>Karwinskia humboldtiana</i> | - | - | - | - | - | - | 40 | 50 | - | - |
| <i>Leucaena leucocephala</i> | - | 20 | 30 | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Leucophyllum frutescens</i> | 110 | - | 20 | - | - | - | 10 | - | - | - |
| <i>Opuntia engelmannii</i> | 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| <i>Parkinsonia texana</i> | 30 | 30 | - | 10 | - | - | 20 | 10 | 30 | - |
| <i>Porlieria angustifolia</i> | 50 | 30 | - | 140 | 420 | 50 | 90 | 60 | - | - |
| <i>Prosopis laevigata</i> | - | 80 | - | - | 10 | 50 | 130 | 90 | 360 | - |
| <i>Randia obcordata</i> | 140 | - | - | - | - | 990 | 10 | - | 200 | - |
| <i>Schaefferia cuneifolia</i> | 60 | 120 | 70 | 80 | 140 | 30 | 90 | - | 60 | - |
| <i>Senegalia greggii</i> | 10 | 190 | 80 | 50 | 200 | 40 | 10 | 10 | 10 | 60 |
| <i>Vachellia farnesiana</i> | - | 10 | - | 80 | - | - | 100 | 800 | 150 | - |
| <i>Vachellia rigidula</i> | 300 | 210 | 410 | 100 | 260 | 50 | 130 | 190 | 300 | 90 |
| <i>Yucca filifera</i> | 40 | 50 | 10 | 30 | - | 20 | - | - | 10 | - |
| <i>Zanthoxylum fagara</i> | 20 | - | - | 30 | - | 70 | 10 | 50 | 40 | - |

El análisis de similitud entre las localidades estimada a través de la diversidad beta, muestra la formación de dos grupos en un punto de corte de 50% de similitud. El primero de ellos lo conforman las localidades 7 y 8 (las cuales tienen una similitud arriba del 61%); y el segundo, que agrupó la mitad de las localidades estudiadas, se conformó por las localidades 1, 2, 4, 3 y 5 (compartiendo las 4 primeras localidades del grupo una similitud por encima del 61%) (Figura 2). Las localidades 6, 9 y 10 no se agruparon al nivel de corte establecido del 50%, mostrando en común cerca del 42% de similitud.

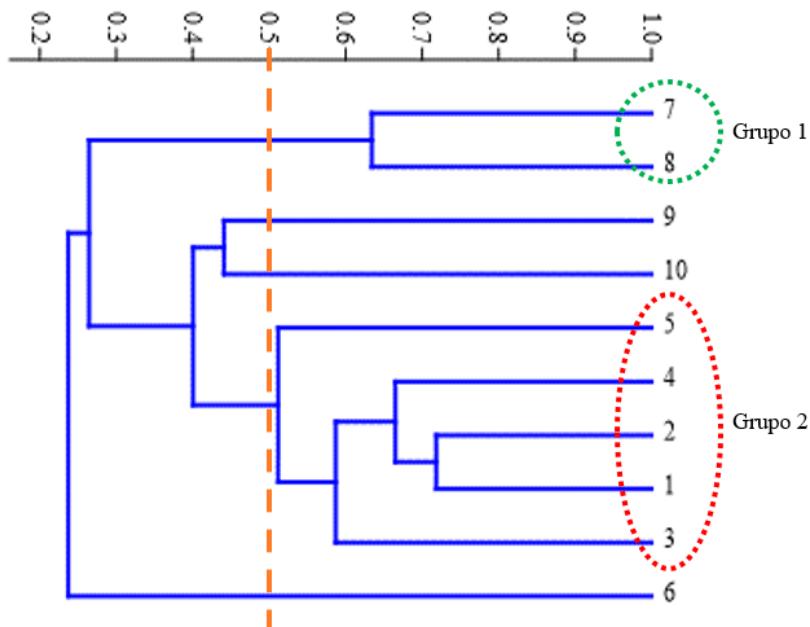


Figura 2. Dendrograma de similitud de Bray-Curtis entre las localidades evaluadas (ver Figura 1). La línea punteada indica el nivel en el que se separan los grupos.

Figure 2. Bray-Curtis similarity dendrogram between the evaluated localities (see Figure 1). The dotted line indicates the level at which the groups separate.

DISCUSIÓN

En nuestro estudio se registró una riqueza florística de 29 especies (12 arbóreas y 17 arbustivas), lo cual pudiera parecer baja comparada con el reporte de 160 taxa para el MET por otros autores; sin embargo, esto obedece a que en este trabajo solamente se muestrearon elementos leñosos. Sin embargo, nuestra riqueza fue similar a la observada por Návar *et al.* (2002), quienes registraron 30 especies leñosas en cuatro sitios (con 55 parcelas muestreadas en total) de los estados de Coahuila, Nuevo León (Linares) y Tamaulipas; sin embargo, fue mayor a la registrada por Valdez *et al.*, (2018) para el grupo de arbustos y árboles de un área prístina del matorral espinoso tamaulipeco (un sitio tres parcelas de muestreo), en donde registraron una especie arbórea y 14 arbustivas; asimismo, la riqueza registrada en nuestro estudio fue menor que la observada por Reid *et al.*, (1990) para el grupo de leñosas y suculentas de gran talla, donde registraron 73 especies (en 39 sitios de muestreo). Las diferencias observadas con relación a estos estudios del MET en el municipio de Linares pueden ser en parte resultado del esfuerzo y distribución del muestreo. Especies como *Karwinskia humboldtiana*, *Erythrostemon mexicanus*, *Parkinsonia texana*, *Porlieria angustifolia*, *Eysenhardtia texana*, *Senegalia greggii*, *Leucaena leucocephala* y *Vachellia rigidula*, no fueron registradas para el MET en los trabajos que estudiaron MET prístinos (Reid *et al.*, 1990; Návar *et al.*, 2002; Valdez *et al.*, 2018); en este contexto resulta relevante mencionar que al menos las cinco últimas especies mencionadas con anterioridad, sí son características del MET con disturbio antropogénico anterior (Alanís Rodríguez *et al.*, 2013; Molina-Guerra *et al.*, 2013; Patiño-Flores *et al.*, 2021).

La familia con mayor número de especies fue Fabaceae con 11 especies seguida de Rutaceae con tres y Cannabaceae, Ebenaceae y Euphorbiaceae con dos especies respectivamente. Nuestros resultados son similares a los registrados por García-Hernández & Jurado (2008), Mora-Donjuán *et al.* (2013), Graciano-Ávila *et al.* (2018), (Alanís-Rodríguez *et al.* (2018) y Valdez *et al.* (2018) en los que las leguminosas (Fabaceae) dominan las áreas de matorral evaluadas en Nuevo León. Esta familia es un grupo bien representado en la vegetación del Noreste de México (Estrada Castillón *et al.*, 2004); en particular, este taxón ha registrado tan solo en la región centro del estado de Nuevo León 168 especies (Estrada Castillón *et al.*, 2004). Esta familia presenta una distribución cosmopolita (Estrada Castillón *et al.*, 2005; Lewis *et al.*, 2005) y, en general, tiene la ventaja de poder cubrir sus requerimientos de Nitrógeno y además facilitar el que sus plantas vecinas logren obtenerlo, lo que ayuda a explicar su amplia distribución (Pirhofer-Walzl *et al.*, 2012).

Los valores del área basal presentaron una alta oscilación entre sitios, de 7.8 ± 4.4 a 14.1 ± 10.9 m^2 / ha , y todos por debajo de lo reportado por Jiménez-Pérez *et al.* (2009) para un área de uso ganadero con $29.80 m^2 / ha$ pero similar a los resultados de Leal-Elizondo *et al.* (2018) en un matorral regenerado postpecuario de 20 años obtuvieron $13.76 m^2 / ha$. Estos valores de área basal podrían explicarse con base a que en el área de ganadería existe el impacto constante y los individuos presentan diámetros mayores y la competencia por el recurso es menor que en el área de matorral maduro, donde las altas densidades de plantas provocan alta competencia por recursos y no logren desarrollar diámetros considerables. A pesar de que en la selección de sitios se verificó la ausencia de actividades como desmontes, y actividades agropecuarias, los datos registrados indican cierto disturbio previo. Nuestros datos apoyan en parte las observaciones realizadas por García-Hernández y Jurado (2008) en el sentido de que más del 99% del matorral del municipio de Linares ha sufrido algún grado de alteración derivada de algún tipo de actividad productiva de origen antropogénica, misma que data desde los años 1920.

En cuanto a la riqueza de especies, solo los sitios 7 y 8, y a pesar de su cercanía, mostraron diferencia en esta variable. Reid *et al.*, (1990) explican que la variabilidad florística, así como el número de especies que se presenten en distintas locaciones del MET, pueden ser determinadas por no solo por factores varían a escala regional como clima, sino también por otro de variación también local, como topografía, tipo de suelo, sustrato y profundidad del suelo, manejo e historia del uso.

El área total de copa registrada mostró un valor promedio de $12734 \pm 4720 m^2 / ha$, siendo el área total muestreada de $10,000 m^2$. La mayor cobertura de copa observada, en comparación con el total del área muestreada, denota la sobreposición de las copas de árboles y arbustos. Esta

sobreposición se registró en ocho sitios de los 10 muestreados. La sobreposición de copa ha sido ampliamente documentada (Martínez Hernández *et al.* 2014; Mora-Donjuán *et al.* 2013) y se debe a que existen al menos dos cohortes de altura, y/o dos estratos, el de especies de porte arbóreo y el de porte arbustivo, y en parte puede explicarse por la facilitación que los individuos del dosel ofrecen a la vegetación del subdosel (Návar *et al.*, 2014). Sánchez-Reyes (2021) explican que un dosel denso (representado por una alta cobertura como la observada en varios sitios), favorece que los arbustos y árboles jóvenes que crecen en el sotobosque, disminuyan sus tasas de evaporación debido a la protección de nodricismo conferida por las especies del dosel, representada en su estudio por *Ebenopsis ebano*, *Cassimiroa greggii*, *Ocotea tampicensis* y *Havardia pallens*, esta última bien representada en todo los sitios muestreados en el nuestro.

Debido a que las especies vegetales del matorral espinoso tamaulipeco tienen poco aprovechamiento maderable se han desarrollado escasas investigaciones que evalúen el volumen maderable (Alanís Rodríguez *et al.*, 2021; Foroughbakch *et al.*, 2014; Foroughbakch *et al.*, 2012; Ngangyo Heya *et al.*, 2017). Los resultados del volumen de madera entre las localidades presentaron una alta oscilación entre sitios y dentro de los mismos, de 17.2 ± 24.52 a 38.4 ± 41.9 m^3 / ha . Esta variación se relaciona con la observada en el área basal, y con la variación de crecimiento de los individuos presentes, su composición florística, y de formas de crecimiento (mayores volúmenes en sitios 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10 con dominancia de especies arbóreas). Esta información es importante dado que Leal-Elizondo *et al.* (2018) encontraron $26.74 \text{ m}^3 / \text{ha}$ en un área de matorral espinoso postganadería, mientras que, según los datos presentados por Návar *et al.* (2002) para el MET, cerca de $27.38 \text{ m}^3 / \text{ha}$ aproximadamente. Es de importancia en futuros estudios incluir esta variable para conocer el potencial maderable que tienen las especies del matorral si es que en algún momento se realizara un aprovechamiento sostenible de los árboles. Las abundancias de las plantas leñosas muestreadas oscilaron en promedio de $2000 \pm 476 \text{ N ha}^{-1}$ en las 10 localidades siendo estas inferiores a otros estudios. Martínez Hernández *et al.* (2014) observaron abundancias de 4766 N ha^{-1} evaluando todos los individuos leñosos $\geq 0.5 \text{ cm}$ de diámetro en un MET de Linares, Nuevo León; Jiménez-Pérez *et al.* (2013) llegaron a estimar $16\,983 \text{ N ha}^{-1} \pm 3,429 \text{ N ha}^{-1}$ en un área con historial de pastoreo con producción intensiva. La diferencia entre otros estudios podría deberse a que en este trabajo fueron considerados solo los individuos con diámetro $\geq 4 \text{ cm}$ como se sugiere para especies de matorrales por Alanís Rodríguez *et al.* (2020). La especie arbórea con mayor abundancia, y presencia en las 10 localidades fue *Cordia boissieri*, seguida en abundancia de *Helietta parvifolia* (presente en 3 localidades), *Ebenopsis ebano* (en las localidades 1, 2, 4 y 5, en la 7; y en las 6, 9 y 10;). Nuestros registros concuerdan con los datos de Reid *et al.* (1990), Valdez *et al.* (2018) y Návar *et al.* (2002), en los que se registra la presencia de estas especies, como en particular *Cordia boissieri* (Estrada Castillón *et al.*, 2004; INEGI, 2002). Estrada Castillón *et al.* (2005), Rzedowski (2006) y García-Hernández & Jurado (2008) identifican a *Helietta parvifolia* como especie representativa del matorral submontano con fisionomía de matorral alto característico de localidades con mayor elevación, en zonas de transición entre el matorral el matorral submontano y el espinoso tamaulipeco y, en áreas que no han sido afectadas por impactos atrópicos. Así, el matorral submontano y el MET, pueden estar en colindancia y entremezclarse, compartiendo algunas especies más características de uno o de otro (Mora-Olivio *et al.*, 2016). *Helietta parviflora* se encuentran presente las localidades 1, 3, 4 y 5, que conforman el Grupo 2 (Figura 2), lo que estaría explicando la cercanía de cada uno de estos sitios a área con matorral submontano. El grupo 2 se encuentra agrupando localidades caracterizados todos ellos por suelos de tipo Xerosol, Regosol y Vertisol. Se ubican al sur y sureste de la ciudad de linares. Por otro lado, *Parkinsonia texana* y *Diospyros texana* fueron las especies arbóreas que caracterizaron al grupo 1 (Figura 2). La primera no ha sido regularmente registrada como especie característica del MET pristino, y ha sido registrada en MET secundario con historial de ganadería (Alanís *et al.*, 2013); mientras que la segunda es una especie característica del MET, identificada como tal en varios estudios (Návar *et al.*, 2002; Reid *et al.*, 1990; Valdez *et al.*, 2018). El grupo 1 está compuesto por las localidades 7 y 8, caracterizadas por suelos de tipo Luvisol y Vertisol, y ubicadas al noreste de la ciudad de Linares, más al este de la Sierra Madre Oriental que las localidades del grupo 2.

La especie arbustiva más abundante fue *Havardia pallens*, seguida de *Vachellia rigidula* ambas presentes en las 10 localidades, seguida de *Randia obcordata* presente solo en las localidades 1,

así como en las 6, 7 y 9. Reid *et al.*, (1990), García-Hernández y Jurado, (2008) y Valdez *et al.* (2018) registraron también a *Havardia pallens* como una de las especies características del MET. Si bien *Vachellia rigidula* no figura como especie propia del MET en todos los estudios, esta es identificada en algunos otros (Návar *et al.*, 2002; Valdez *et al.*, 2018), principalmente en MET de origen secundario (Alanís Rodríguez *et al.*, 2013; Molina-Guerra *et al.*, 2013; Patiño-Flores *et al.*, 2021). Las especies arbustivas representativas del grupo 1 fueron *Eysenhardtia polystachya*, *Porlieria angustifolium*, *Celtis pallida*, *Zanthoxylum fagara* y *Karwinskyia humboldtiana*, todas representativas del MET bien conservado de acuerdo con los estudios de Reid *et al.*, (1990), Návar *et al.*, (2002), García-Hernández & Jurado, (2008) y Valdez *et al.* (2018). Por otro lado, la especie arbustiva que caracterizó al grupo 2 fue *Schaefferia cuneifolia*, especie identificada como parte del MET (Návar *et al.*, 2002; Reid *et al.*, 1990; Valdez *et al.*, (2018)). Con relación a la formación de los grupos 1 y 2 antes descritos, de acuerdo con Reid *et al.* (1990), existe un gradiente climático ocasionado por el efecto orográfico de la Sierra Madre Oriental, y al aumento gradual de la elevación de este a oeste. Debido a esto, hacia la Sierra Madre Oriental y el sur de la ciudad de Linares, donde se ubican las localidades del grupo 2, persisten condiciones más frescas y húmedas, mientras que al norte y noreste de la Ciudad, las condiciones son más cálidas y secas (zona de ubicación de las localidades del grupo 2). En su estudio, Reid *et al.*, (1990), identificaron que *Hellieta parviflora*, característica del grupo 2 de nuestro estudio, se asocia con zonas más húmedas y frescas, y no se ubicó dentro del gradiente en las zonas secas y cálidas, que en nuestro estudio correspondieron a la ubicación del grupo 1, en la que, además, en nuestro caso, resultó ausente. En este contexto, la ubicación distal de las localidades, a lo largo del gradiente expuesto, explica en buena medida las composiciones diferenciadas en nuestro análisis. Reid *et al.* (1990), además explican que la variabilidad florística, del MET, pueden ser ocasionada por factores como clima, como topografía, tipo de suelo, sustrato y profundidad del suelo, y manejo e historia del uso. En nuestro estudio, varias de las especies no características del matorral prístino, pero propias del MET secundario caracterizaron la variabilidad entre sitios.

CONCLUSIONES

Con base en la estructura y composición florística, se concluye que la comunidad estudiada está en buen estado de conservación o en un estado avanzado de sucesión, pues solamente una especie (*Vachellia farnesiana*) es indicadora de perturbación.

Las localidades de matorral espinoso tamaulipeco evaluadas presentaron una alta variabilidad en abundancia, área basal, área de copa y volumen. La variabilidad observada puede ser explicada por factores climáticos, edáficos y de uso de suelo (pasado y/o actual), lo que promueve la variabilidad del MET. Aun cuando las localidades no presentan disturbios importantes, las leguminosas son las que dominan las áreas, por lo que además de ser especies pioneras, pueden ser aún dominantes en el matorral espinoso tamaulipeco maduro.

Es importante propiciar la conservación de este matorral, de tal manera que siga siendo una comunidad de referencia para futuros trabajo de reforestación en áreas degradadas o que hayan perdido su cobertura vegetal.

AGRADECIMIENTOS

El segundo autor recibió una beca del CONACYT para realizar sus estudios de posgrado. Agradecemos a todo el personal que apoyó con las actividades de campo, especialmente al Sr. Guadalupe Pérez Malacara. Se agradece a Yulia Abigail Ortíz Cuevas por su apoyo con la literatura citada.

LITERATURA CITADA

- Alanís Rodríguez, E., Jiménez Pérez, J., Tagle, G., Yerena Yamallel, J. I., Cuellar Rodríguez, G., & Mora-Olivio, A. (2013). Análisis de la vegetación secundaria del matorral espinoso tamaulipeco, México. *Phyton (Buenos Aires)*, 82(2), 185–191.
- Alanís Rodríguez, E., Mora Olivio, A., & Marroquín de la Fuente, J. (2020). *Muestreo ecológico de la vegetación*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León .
- Alanis Rodriguez, E., Valdecantos-Dema, A., Canizales-Velázquez, P. A., Collantes-Chavez-Costa, A., Rubio-Camacho, E., & Mora-Olivio, A. (2018). Análisis estructural de un área agroforestal en una porción del matorral xerófilo del noreste de México. *Acta Botanica Mexicana*, 125, 133–156. <https://doi.org/10.21829/abm125.2018.1329>
- Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V. M., Collantes-Chávez-Costa, A., Buendía-Rodríguez, E., Mora-Olivio, A., Sánchez-Castillo, L., & Alcalá-Rojas, A. G. (2021). Structure and composition of woody plant community in assisted and unassisted ecological succession in a Tamaulipan thornscrub, Mexico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 94, 6. <https://doi.org/10.1186/s40693-021-00102-6>
- Arriaga, L. (2009). Implicaciones del cambio de uso de suelo en la biodiversidad de los matorrales xerófilos: un enfoque multiescalar. . *Investigación Ambiental*, 1, 6–16.
- Brower, J. E., Zar, J. H., & Von-Ende, C. N. (1998). *General Ecology*. McGraw-Hill.
- Egan, D., & Howell, E. A. (2005). *The historical ecology handbook: a restorationist's guide to reference ecosystems*. Island Press. .
- Estrada Castillón, E., Villarreal Quintanilla, J. Á., & Jurado, E. (2005). Leguminosas del norte del estado de Nuevo León, México. *Acta Botanica Mexicana*, 73, 1–18. <https://doi.org/10.21829/abm73.2005.1003>
- Estrada Castillón, E. Yen Méndez, C., Delgado Salinas, A., Villarreal Quintanilla, J. A. (2004). Leguminosas del centro del estado de Nuevo León, México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica*, 75, 73–85.
- Foroughbakhch, R., Hernández-Piñero, J. L., & Carrillo-Parra, A. (2014). Adaptability, growth and firewood volume yield of multipurpose tree species in semiarid regions of Northeastern Mexico. *International Journal of Agricultural Policy and Research*, 2(12), 444–453. <http://dx.doi.org/10.15739/IJAPR.016>
- Foroughbakhch, R., Alvarado-Vázquez, M. A., Carrillo Parra, A., Hernández-Piñero, J. L., & Lucio, G. (2013). Floristic diversity of a shrubland in northeastern Mexico. *Phyton*, 82(2), 175–184. <https://www.revistaphyton.fundromuloraggio.org.ar/vol82/FOROUGHBAKHCH.pdf>
- Foroughbakhch R, Carrillo Parra, A., Hernández Piñero, J. L., Alvarado Vázquez, M. A. Rocha Estrada,S., & Cardenas, M. A. (2012). Wood volume production and use of 10 woody species in semiarid zones of Northeastern Mexico. *International Journal of Forestry Research*, 2012, 1-7. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1155/2012/529829>
- García, E. (1988). *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana* (4a ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.
- García-Hernández, & Jurado, E. (2008). Caracterización del matorral con condiciones prístinas en Linares, N.L., México. *Ra Ximhai*, 4(1), 1–21. <https://doi.org/10.35197/rx.04.01.2008.01.jgej>
- González Ovando, M. L., Plascencia Escalante, F. O., & Martínez-Trinidad, T. (2016). Áreas prioritarias para restauración ecológica y sitios de referencia en la región Chignahuapan-Zacatlán. . *Madera y Bosques*, 22(2), 41–52.
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, Ó. A., González-Tagle, M. A., Rubio-Camacho, E. A., & Mata-Balderas, J. M. (2018). Caracterización y estructura florística de un grupo funcional vegetal del matorral espinoso tamaulipeco. *Gayana Botánica*, 75(1), 512–523. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432018000100512>
- Hammer, O., Harper, D. A. T., & Rayan, P. D. (2001). Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis Paleonotol. *Electronica*, 1, 9.
- INEGI. (2002). *Uso actual del suelo en los núcleos agrarios. Aspectos geográficos de Nuevo León*.
- INEGI. (2017). *Carta edafológica : escala 1:250 000*. México.

- Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., González Tagle, M. A., Aguirre Calderón, O. A. & Treviño Garza, E. J. (2013) Characterizing regeneration of woody species in areas with different land-history tenure in the Tamaulipan thornscrub, Mexico," *The Southwestern Naturalist* 58(3), 299-304. <https://doi.org/10.1894/0038-4909-58.3.299>
- Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., Pando-Moreno, M., & González Tagle, M. (2009). Análisis sobre el efecto del uso del suelo en la diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco. *Madera Bosques*, 15(3), 5–20. <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v15n3/v15n3a1.pdf>
- Johnson, E. A., & Miyanishi, K. (2020). Disturbance and succession. En Johnson, E. A., & Miyanishi, K. (Eds.), *Plant disturbance ecology* (pp. 1-15). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818813-2.00001-0>
- Leal-Elizondo, N. A., Alanís-Rodríguez, E., Mata-Balderas, J. M., Treviño-Garza, E. J., & Yerena-Yamallel, J. I. (2018). Estructura y diversidad de especies leñosas del matorral espinoso tamaulipeco regenerado post-ganadería en el noreste de México. *Polibotánica*, 45: 75-88. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.45.6>
- Lewis, G. P. (2005). *Caesalpinieae*. In *Legumes of the world*. (G. Lewis, B. Schrire, B. Mackinder, & M. Lock, Eds.). Royal Botanic Gardens.
- Martínez Hernández, D. D., Jiménez Pérez, J., Alanís Rodríguez, E., Uvalle Sauceda, J. I., Canizales Velázquez, P. A., & Rocha Domínguez, L. (2014). Regeneración natural del matorral espinoso tamaulipeco en una plantación de *Eucalyptus* spp.. . *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(21), 94–107.
- McDonald, T., Gann, G., Jonson, J., & Dixon, K. (2016). *International standards for the practice of ecological restoration—including principles and key concepts*. (Soil-Tec, Inc).
- Molina Guerra V.M, Mora Olivo A., Alanís Rodríguez, E., Soto Mata, B., & Patiño Flores, A. M. (2019). *Plantas características del matorral espinoso tamaulipeco en México*. Editorial Universitaria de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Molina-Guerra, V. M., Pando-Moreno, M., Alanís- Rodríguez, E., Canizales-Velázquez, P. A., González- Rodríguez, H. y Jiménez-Pérez, J. (2013). Composición y diversidad vegetal de dos sistemas de pastoreo en el matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 4(3), 361–371.
- Molina-Guerra, V. M., Pando-Moreno, M., Alanís-Rodríguez, E., Canizales-Velázquez, P. A., Rodríguez, H. G., & Jiménez-Pérez, J. (2013). Composición y diversidad vegetal de dos sistemas de pastoreo en el matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias*, 4(3), 361–371.
- Mora, C. A., Alanís, E., Jiménez, J., González, M. A., Yerena, J. I., & Cuellar L.G. (2013). Estructura, composición florística y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco, México. *Ecología Aplicada* , 12(1), 29–34.
- Mora-Olivo, A., Alanís-Rodríguez, E., Marroquín-Castillo, J. J., Sarmiento-Muñoz, T. I., Martínez-Ávalos, J. G., Garza-Ocañas, F., & Torres-Castillo, J. A. (2016). Structure and diversity of a submontane scrub Community in Tamaulipas, Mexico. *Interciencia*, 41(11), 769–773.
- Morrone, J. J. (2005). Hacia una síntesis biogeográfica de México. . *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 76(2), 207–252.
- Návar, J., Rodriguez-Flores, F. J., Dominguez-Calleros, P. A., & Perez-Verdin, G. (2014). Diversity-Productivity Relationship in the Northeastern Tamaulipan Thornscrub Forest of Mexico. *International Journal of Ecology*, 1, 196073.
- Návar, J., Méndez, E., & Dale V. (2002). Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Annals of Forest Science*, 59(8), 813–821.
- Ngangyo Heya, M., Foroughbakhch Pournavab, R., Carrillo Parra, A., Maiti, R., Salas Cruz, L.R. (2017). Timber-yielding plants of the Tamaulipan thorn scrub: Forest, fodder, and bioenergy potential. *Biology, Productivity and Bioenergy of Timber-Yielding Plants: An Experimental Technology*, 1–119.
- Patiño-Flores, A., Alanís-Rodríguez, E., Jurado, E., González-Rodríguez, H., Aguirre-Calderón, O., & Molina-Guerra, V. (2021). Estructura y diversidad del matorral espinoso tamaulipeco regenerado posterior a uso pecuario. *Polibotánica*, 52, 75–88.

Recibido:
31/julio/2024

Aceptado:
17/diciembre/2024

- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pequeño Ledezma, M. A., Alanís Rodríguez, E., Molina Guerra, V. M., Mora Olivo, A., Alcalá Rojas, A. G., Martínez Ávalos, J. G., & Garza Ocañas, F. (2018). Plant composition and structure of two post-livestock areas of Tamaulipan thornscrub, Mexico. *Revista Chilena de Historia Natural*, 91, 1-8. <https://doi.org/10.1186/s40693-018-0074-9>
- Pirhofer-Walzl, K., Rasmussen, J., Høgh-Jensen, H., Eriksen, J., Søegaard, K., & Rasmussen, J. (2012). Nitrogen transfer from forage legumes to nine neighbouring plants in a multi-species grassland. *Plant and Soil*, 350(1–2), 71–84. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0882-z>
- Reid, N., Smith, D. M., Beyer-Miinzel, P., & Marroquin, J. (1990). Floristic and structural variation in the Tamaulipan thornscrub, northeastern Mexico. *Journal of Vegetation Science*, 1(4), 529–538.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. (1^a Edición digital). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Sabattini, J. A., & Sabattini, R. A. (2018). Sucesión vegetal y restauración ecológica. . *Revista Científica Agropecuaria*, 22(1–2), 31–53.
- Sánchez-Reyes, U. J., Niño-Maldonado, S., Barrientos-Lozano, L., Treviño-Carreón, J., Meléndez-Jaramillo, E., Sandoval-Becerra, F.M., & Jones, R. W. (2021). Structural changes of vegetation and its association with microclimate in a successional gradient of low thorn forest in northeastern Mexico. *Plant Ecology*, 222, 65–80. <https://doi.org/10.1007/s11258-020-01088-z>
- SER. (2004). *What is ecological restoration?* Society for Ecological Restoration. <http://ser-rrc.org/what-is-ecological-restoration/>
- Valdez M., Valdés G., A., Forougbakhch P., R., Alvarado V., A. A., & Rocha E., A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación en un matorral espinoso prístico de Tamaulipas, México. *Revista de Biología Tropical*, 66(4), 1674–1682. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44959684027>
- Velázquez, A., Mas, J. F., Díaz Gallegos, J. R., Mayorga Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., Fernández, T., Bocco, G., Ezcurra, E., & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62, 21–37. <https://www.redalyc.org/pdf/539/53906202.pdf>
- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21(1–2), 213–251. <https://doi.org/10.2307/1218190>
- Wiens, J. A. (1996). *Coping with variability in environmental impact assessment*. En Baird, D.J., L. Maltby, P. W. Greig-Smith, P. E. T. Douben. (Eds.), *ECotoxicology: Ecological Dimensions* (pp. 55-70). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1541-1_6

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

RESILIENCIA DE *Abies durangensis* Martínez A SEQUÍAS EN EL SUROESTE DE DURANGO MEDIANTE PROXIES DENDROECOLÓGICOS

DROUGHT RESILIENCE OF *Abies durangensis* Martínez IN SOUTHWESTERN DURANGO USING DENDROECOLOGICAL PROXIES

Martínez-Rivas, J.A., A.C. Acosta-Hernández, E.D. Vivar-Vivar y N. Silva-Ávila
RESILIENCIA DE *Abies durangensis* Martínez A SEQUÍAS EN EL SUROESTE DE
DURANGO MEDIANTE PROXIES DENDROECOLÓGICOS
DROUGHT RESILIENCE OF *Abies durangensis* Martínez IN SOUTHWESTERN
DURANGO USING DENDROECOLOGICAL PROXIES



Resiliencia de *Abies durangensis* Martínez a sequías en el suroeste de Durango mediante proxies dendroecológicos

Drought resilience of *Abies durangensis* Martínez in southwestern Durango using dendroecological proxies

José Alexis Martínez-Rivas,
Andrea Cecilia Acosta-Hernández, Eduardo Daniel Vivar-Vivar y Nancy Silva-Ávila

RESILIENCIA DE *Abies durangensis* Martínez A SEQUÍAS EN EL SUROESTE DE DURANGO MEDIANTE PROXIES DENDROECOLÓGICOS

DROUGHT RESILIENCE OF *Abies durangensis* Martínez IN SOUTHWESTERN DURANGO USING DENDROECOLOGICAL PROXIES

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 97-115. Enero 2025

DOI:
10.18387/polbotanica.59.6

José Alexis Martínez-Rivas. Autor de correspondencia: mtz.alexis05@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-7799-4168>

¹Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan, Valle del Sur, 34120 Durango, México

²Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango

Andrea Cecilia Acosta-Hernández andrea.acostah@hotmail.com
Eduardo Daniel Vivar-Vivar unam.vivar@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-2052-0404>

Nancy Silva-Ávila nancysilvaavila09@outlook.com
Laboratorio de Dendroecología, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango, Río Papaloapan y Blvd. Durango s/n Col. Valle del Sur, Durango, Dgo., 34120, México

RESUMEN: Los ecosistemas forestales son esenciales para la captura y el almacenamiento de carbono y la conservación de la biodiversidad, pero se enfrentan a actividades humanas y presiones de procesos naturales que pueden alterar su estructura y crecimiento. Este estudio examinó la respuesta del crecimiento radial a las condiciones climáticas, y se evaluó la resiliencia a la sequía de los árboles de *Abies durangensis* Martínez en la Sierra Madre Occidental de Durango, México, durante el periodo 1900-2022. Se analizaron 42 núcleos de madera de 21 árboles, estudiando los anillos de crecimiento anual para correlacionar los datos climáticos y de sequía con el crecimiento radial. Además, se calcularon índices de resiliencia, que evalúan la capacidad del árbol para recuperarse después de eventos de estrés, como las sequías, analizando el crecimiento antes, durante y después del evento. Nuestros resultados revelaron una correlación positiva entre el crecimiento y las precipitaciones a principios de la estación de crecimiento (marzo del año posterior, Coeficiente = 0.206, $p < 0.05$). Sin embargo, las temperaturas máximas (junio del año anterior; Coeficiente = -0.170, $p < 0.05$) y mínimas (junio del año anterior; Coeficiente = -0.199, $p < 0.05$), junto con las sequías prolongadas, afectaron negativamente al crecimiento radial. A pesar de la sensibilidad del crecimiento radial ante condiciones climáticas adversas, los índices de resiliencia mostraron resistencia moderada y alta resiliencia tras los eventos de sequía. Aunque estas condiciones pueden ser parte de su dinámica natural, su impacto negativo sugiere que la especie podría estar alcanzando límites críticos de adaptación, lo que representa un riesgo para su sostenibilidad a largo plazo. Sin embargo, *A. durangensis* demuestra una notable capacidad de adaptación a variaciones climáticas futuras, según los resultados obtenidos.

Palabras clave: Crecimiento radial, Resiliencia, Sequía, Adaptación climática, Sensibilidad climática.

ABSTRACT: Forest ecosystems are essential for carbon capture and storage, as well as biodiversity conservation, but they face pressures from human activities and natural processes that can disrupt their structure and growth. This study examined the radial growth response of *Abies durangensis* Martínez to climate conditions and evaluated its

drought resilience in the Sierra Madre Occidental of Durango, Mexico, during the period 1900-2022. We analyzed 42 growth cores from 21 trees, studying annual growth rings to correlate climatic and drought data with radial growth. Additionally, resilience indices were calculated, which measure the tree's ability to recover after stress events, such as droughts, by analyzing growth before, during, and after the event. Our results revealed a positive correlation between growth and precipitation at the beginning of the growing season (March of the following year, Coefficient = 0.206, $p < 0.05$). However, maximum temperatures (June of the previous year; Coefficient = -0.170, $p < 0.05$) and minimum temperatures (June of the previous year; Coefficient = -0.199, $p < 0.05$), along with prolonged droughts, negatively impacted radial growth. Despite the sensitivity of radial growth to adverse climatic conditions, resilience indices showed moderate resistance and high resilience following drought events. While these conditions may be part of the species' natural dynamics, their negative impact suggests that the species could be reaching critical adaptation limits, posing a risk to its long-term sustainability. Nonetheless, *A. durangensis* demonstrates a notable capacity for adaptation to future climatic variations, according to our findings.

Key words: Radial growth, Resilience, Droughts, Climate adaptation, Climate sensitivity.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales son uno de los principales sumideros de carbono terrestre (Ameray *et al.*, 2021), además, son proveedores de bienes y servicios a escala local, regional y global (Von Döhren & Haase, 2015). Sin embargo, estos ecosistemas están constantemente bajo presiones antropogénicas y naturales que modifican su composición, estructura del dosel, en procesos y funciones que se desarrollan dentro de los bosques (Grantham *et al.*, 2020; Patacca *et al.*, 2023). Se han producido rápidas modificaciones en la estructura y composición de los bosques pasando de maduros a jóvenes debido a la sobreexplotación forestal y a incendios, sequías, plagas y enfermedades, etc... (Allen *et al.*, 2010; O'Hara *et al.*, 2017 Hammond *et al.*, 2022). Asimismo, la distribución y la superficie de las áreas forestales ha disminuido por el aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías provocadas por el cambio climático, lo que ha intensificado la mortalidad de las especies forestales en el mundo (Abbass *et al.*, 2022). Por ende, la comunidad científica se ha centrado en entender la dinámica de los ecosistemas forestales y la transformación de su estructura bajo los efectos del cambio climático permite anticipar su capacidad de adaptación y resistencia (Muller-Landau *et al.*, 2021; Hartmann *et al.*, 2022; McDowell *et al.*, 2022). Es importante para desarrollar estrategias que aseguren la sostenibilidad de los bosques y mitiguen los efectos del cambio climático, como la pérdida de carbono y la alteración de ciclos ecológicos.

Actividades como la productividad forestal está asociada a las limitaciones del crecimiento del arbolado, un factor clave en el almacenamiento de carbono que ayuda a mitigar los efectos del cambio climático (p.e. aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías) (Girona *et al.*, 2023). Unos de los temas que más ha captado la atención de los ecólogos es la relación entre el clima, la edad, especie, manejo y disturbios en el crecimiento radial de los árboles (Wilmking *et al.*, 2020; Rydval *et al.*, 2024), así como también la respuesta del crecimiento radial a la sequía en un contexto de cambio climático (Anderegg *et al.*, 2019). Aun cuando el crecimiento forestal depende de múltiples factores ambientales y locales, la comunidad científica concuerda en que los anillos de los árboles son un proxy confiable para establecer estas relaciones clima-crecimiento (Babst *et al.*, 2018; Wilmking *et al.*, 2020). En este contexto, la resiliencia se define como la capacidad de un ecosistema para recuperar su estructura y función tras un evento de perturbación (Lloret *et al.*, 2011). Por lo tanto, es fundamental profundizar en este tipo de estudios para comprender el proceso de adaptación de las especies forestales ante escenarios adversos (Kannenberg *et al.*, 2020).

Las condiciones hidrológicas locales desempeñan un papel crucial a la hora de determinar la resiliencia al estrés causado por el calor y la sequía en los ecosistemas forestales (Song *et al.*, 2022; B. Wang *et al.*, 2022). La resiliencia en los árboles se refiere a la capacidad para mantener y recuperar una tasa de crecimiento estable después de una perturbación o un evento extremo

(p.e. sequías, incendios o plagas) (Lloret *et al.*, 2011; Marcotti *et al.*, 2021). La resiliencia está influenciada por diversos factores, como las condiciones hidrológicas locales, sequías, la variabilidad genética, la biogeografía, el tamaño de los árboles y la competencia por los recursos (Castagneri *et al.*, 2022; Locosselli *et al.*, 2024). Es por lo que analizar los efectos de estos factores y su temporalidad es valioso para cuantificar puntos de crecimiento o decremento y determinar la persistencia de los bosques (Wang *et al.*, 2022). También, los árboles que integran las diferentes comunidades tienden a crecer de forma independiente en respuesta al clima, lo que muestra un patrón del crecimiento que contribuye a la estabilidad y resiliencia generales de los bosques (Castruita-Esparza *et al.*, 2019; Bernal *et al.*, 2023; Correa-Díaz *et al.*, 2023).

Existen evaluaciones que abordan la sensibilidad de la relación entre la respuesta al clima y el crecimiento (Acosta-Hernández *et al.*, 2017; Carlón Allende *et al.*, 2021). Sin embargo, nuestro conocimiento sobre como las especies forestales mexicanas responden a las variaciones y las condiciones climáticas locales, así como fenómenos a gran escala aún es limitado y requiere más investigación. Principalmente, las sequías extremas y los efectos acumulativos o legados afectan negativamente a los ecosistemas forestales, incidiendo más aún sobre aquellos ecosistemas especialmente vulnerables. Entre ellos, los Bosques de Alto Valor de Conservación (BAVC) son ricos en biodiversidad, constituyen el hábitat de especies en peligro, son refugios de fauna silvestre, y proporcionan servicios hidrológicos y de importancia social y cultural (Mikusiński *et al.*, 2021; García-Trujillo *et al.*, 2023).

Durango es la primera reserva forestal de México, donde destacan sus bosques de coníferas por ser ricos en biodiversidad con presencia de los géneros de *Pinus*, *Quercus*, *Juniperus* y *Arbutus*, entre otras hojas (Martínez-Rivas *et al.*, 2023); destacando las especies forestales de coníferas con distribución limitada como *Pseudotsuga*, *Picea* y *Abies*. La especie *Abies durangensis* Martínez tiene su distribución potencial centrada en grupos discontinuos en los estados de Chihuahua, Sinaloa, Jalisco y Durango (González-Elizondo *et al.*, 2012). Es una conífera endémica de México, que forma parte de comunidades con Alto Valor de Conservación, puede llegar a medir hasta 40 metros de altura, tiene conos erectos con semillas en ramas laterales sobre un corto pedúnculo y las hojas son de color verde brillante de 20-35 mm de longitud por 1-1.5 mm de ancho (CONABIO, 2016).

A pesar de que en la actualidad en México se están abordando investigaciones relacionadas con la resiliencia a la sequía de las especies forestales (Cabral-Alemán *et al.*, 2022; Correa-Díaz *et al.*, 2023), aún es necesario un mayor esfuerzo para comprender la dinámica de la resiliencia de los bosques y especies arbóreas mexicanas ante eventos climáticos extremos. En particular, responder la pregunta: ¿Cómo ha respondido el crecimiento radial de *A. durangensis* a las sequías en el suroeste de la Sierra Madre Occidental?, y ¿Cuál es su capacidad de resiliencia ante estos eventos? Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de los anillos de crecimiento radial a las condiciones climáticas y la resiliencia a los eventos de las sequías de *A. durangensis* en el suroeste de la Sierra Madre Occidental mediante proxies dendroecológicos. Se espera que *A. durangensis* presente una reducción significativa en el crecimiento radial durante los años de sequía, pero una alta resiliencia en las décadas más recientes debido a posibles adaptaciones a condiciones climáticas más extremas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubica al suroeste del estado de Durango, en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental (SMO) a 2800 m.s.n.m. (23.6° N, -105.3°O; Figura 1).

Estos tipos de bosques se localizan principalmente en cañadas y laderas con exposición norte, cuya donde la orientación geográfica los protege de los fuertes vientos y la insolación intensa, formando un microclima húmedo y con temperaturas moderadas que favorece su adecuado crecimiento (González-Elizondo *et al.*, 2012). En el sitio de estudio convergen especies de los géneros *Abies*, *Pseudotsuga*, *Pinus*, *Juniperus* y *Quercus*, los árboles pueden alcanzar alturas de hasta 50 m y supera los 70 cm de diámetro normal.

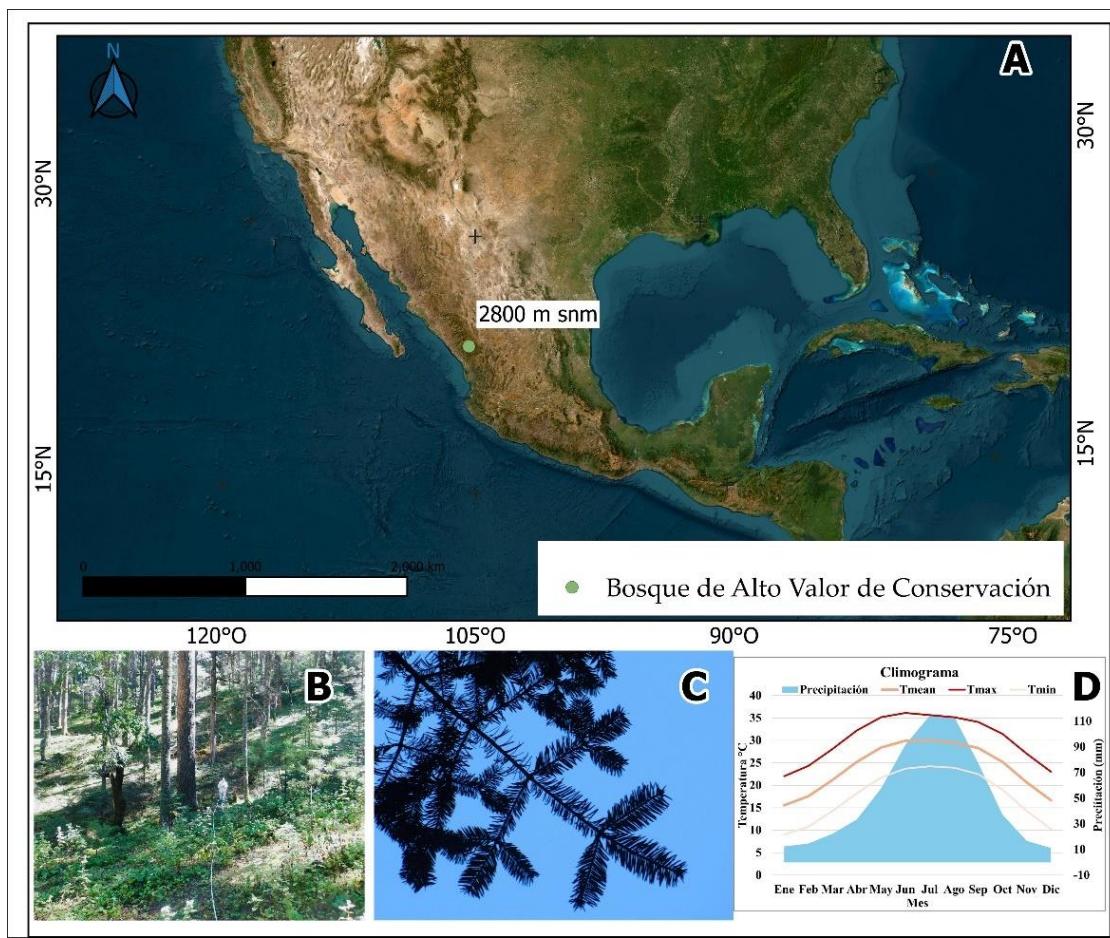


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio (A), Vista general de área de estudio (B), vista del follaje de *Abies durangensis* Martínez (C) y Climograma (D).

Figure 1. Geographical location of the study area (A), general overview of the study area (B), foliage view of *Abies durangensis* Martínez (C), and Climograph (D).

El clima del área de estudio tiene temperaturas máximas de 22.03 °C en enero a 36.11 °C en junio, mientras que las mínimas oscilan de 9.05 °C y 24.25 °C. La precipitación sigue un patrón estacional, siendo julio el mes más húmedo con 114.25 mm, mientras que enero y diciembre son los más secos, con 12.38 mm y 11.17 mm, respectivamente (Figura 1). El tipo de suelo es Cambisol dístico, y se caracteriza por un horizonte superficial rico en materia orgánica y buena fertilidad, con textura media (INEGI, 2017).

Colecta y procesamiento de datos dendrocronológicos

Fueron seleccionados 21 árboles de *A. durangensis* dominantes de edad desigual, contiguos a un árbol central elegido aleatoriamente, luego seleccionamos los 20 árboles adicionales ubicados más cerca del árbol centro (23.6°N, -105.3°O). Los árboles muestrados alrededor del árbol central incluyeron individuos adultos con diámetros mayores a 30 cm a una altura de 1.30 m. De cada individuo se colectaron dos núcleos de madera a una altura de 1.30 m utilizando una barrena de incremento de Pressler (5 mm de diámetro y 50 cm de longitud). Las muestras fueron montadas sobre bastidores de madera y secados a temperatura ambiente. Despues se pulieron con papel lija de granulometría de gruesa a fina (100, 300, 600, 800 y 1000) hasta que fueran visibles los anillos de crecimiento (Stokes & Smiley, 1968).

Las series de crecimiento radial fueron datadas y sincronizadas mediante la identificación de años de crecimiento característicos, que son aquellos en los que los árboles muestran un crecimiento radial inusualmente rápido (anillo ancho) o reducido (anillos estrechos), generalmente en

respuesta a condiciones climáticas extremas. El ancho total de anillo o TRW (Tree Ring Width, por sus siglas en inglés), fue medido sobre cada muestra utilizando el sistema de VELMEX el cual ofrece una alta precisión (0,001 micras) (VELMEX Inc. 2016, Bloomfield, NY, EE. UU.). Luego del fechado visual y la medición de las series, se validó estadísticamente la datación cruzada mediante el programa estadístico COFECHA (Holmes, 1983). Los efectos biológicos y las tendencias geométricas de los árboles fueron eliminados mediante un modelo exponencial negativo como medio de estandarización. Este proceso se llevó a cabo utilizando la biblioteca *dplR* (Bunn, 2008) del programa estadístico R studio (R. Core Team, 2018), lo que asegura que los datos reflejan adecuadamente las variaciones en el crecimiento radial sin la influencia de estos factores. Las cronologías son consideradas registros que muestran cómo varía el crecimiento anual de los árboles con el tiempo, se generaron posterior a la estandarización a partir de las mediciones de los anillos de crecimiento (madera temprana, madera tardía y ancho total de anillo) para finalmente obtener los índices de ancho de anillo (RWI), índice que se caracteriza por su adimensionalidad, media cercana a 1,0 y varianza homogénea. Así mismo, fue calculada la señal poblacional expresada (EPS; Wigley *et al.*, 1984) para el periodo 1871–2021 para determinar la idoneidad de las cronologías en términos de la señal poblacional (EPS > 0.85), las ventanas utilizadas en el análisis fueron 50 observaciones con un paso de 25. Esto implica que se evaluaron segmentos de datos de 50 años, avanzando 25 años en cada iteración.

Relaciones clima-crecimiento

Con el fin de identificar la influencia del clima sobre el crecimiento radial anual, se calcularon correlaciones de Pearson mediante la paquetería treeclim entre las variables climáticas mensuales y cronología del crecimiento radial. Se utilizó la plataforma *Climate Explorer* (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>, acceso el 20 de mayo del 2024; Trouet & Van Oldenborgh, 2013), a una resolución de 0.5° de la base de datos CRU TS v. 4.04 (Harris *et al.*, 2020) para acceder a una serie temporal consistente y de calidad que abarca desde 1900-2022, lo que permite un análisis detallado de las tendencias climáticas. La información mensual descargada correspondió a las variables temperatura mínima (TMIN), temperatura máxima (TMAX) y precipitación (PP) dentro del periodo común de 1900 a 2022.

La influencia de la intensidad y duración de la sequía sobre el crecimiento radial fue evaluada mediante correlaciones de Pearson calculadas entre la cronología y el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Beguería *et al.*, 2014) fue el indicador empleado para representar la sequía. Este índice basado en el balance hídrico y considera datos de precipitación y temperatura a diferentes escalas de tiempo. Los datos del SPEI fueron extraídos de la página oficial (<https://spei.csic.es/>, acceso el 20 de mayo del 2024), con una resolución espacial de 0.5° y una escala temporal de 1-48 meses para el periodo de crecimiento de 1954–2021. El SPEI es utilizado para monitorear sequías, basado en la relación entre la precipitación y la evapotranspiración, una herramienta útil para evaluar la disponibilidad hídrica en diferentes escalas temporales (Lee *et al.*, 2024).

Índices de resiliencia

Se utilizó el paquete estadístico *pointRes* (van der Maaten-Theunissen *et al.*, 2015) para analizar años característicos y los diferentes índices de resiliencia de las cronologías de crecimiento en R studio (R Core Team, 2018). Para identificar años característicos, identificados como crecimiento anormalmente ancho o estrecho, se procedió mediante el método de normalización de ventana móvil de Neuwirth (Neuwirth *et al.*, 2007), el cual ajusta los datos de crecimiento a través de un análisis de ventanas móviles para detectar anomalías en el ancho de los anillos en comparación con las expectativas normales de crecimiento. Para conocer la capacidad de recuperar el crecimiento anterior a un disturbio, se utilizó el cálculo de los índices de resistencia, recuperación, resiliencia y periodo de recuperación de *A. durangensis* a la sequía (Lloret *et al.*, 2011).

La resistencia mide la capacidad de la vegetación para mantener su funcionamiento (por ejemplo, crecimiento, producción de biomasa) durante una sequía. Se calcula como la proporción del estado del crecimiento durante la sequía en comparación con su estado antes de la sequía.

$$Rt = \frac{Dr}{PreDr}$$

Donde: Dr : Crecimiento durante la sequía y $PreDr$: Crecimiento en el período previo 5 años de la sequía.

La recuperación mide la capacidad del ecosistema para volver a su estado original después de que la sequía ha terminado. Se calcula como la proporción del estado del crecimiento después de la sequía en comparación con su estado durante la sequía.

$$Rc = \frac{\text{PostDr}}{\text{Dr}}$$

Donde: PostDr: Crecimiento después de la sequía y Dr: Crecimiento durante la sequía.

La resiliencia combina la resistencia y la recuperación, proporcionando una medida global de la capacidad del ecosistema para soportar y recuperarse de la sequía. Se calcula como la proporción del estado del crecimiento después de la sequía en comparación con su estado antes de la sequía.

$$Rs = \left(\frac{\text{PostDr} - \text{Dr}}{\text{PreDr} - \text{Dr}} \right) \left(1 - \left(\frac{\text{Dr}}{\text{PreDr}} \right) \right)$$

Donde: PostDr: Crecimiento después de la sequía y PreDr: Crecimiento en el período previo a la sequía y Dr: Crecimiento durante la sequía.

El periodo de recuperación representa el tiempo necesario para que el crecimiento alcance los niveles previos a la perturbación, lo cual es crucial para entender la dinámica de la respuesta del ecosistema a eventos estresantes como la sequía.

RESULTADOS

Crecimiento de radial

Las mediciones de ancho total de anillo para *A. durangensis* mostraron un crecimiento promedio de 0.961 ± 0.251 mm/año con una amplitud o extensión de 151 años correspondientes al periodo 1870-2022, la intercorrelación entre series fue de 0.655, con una sensibilidad media de 0.274 mostró una autocorrelación de primer orden de 0.802 y se registró un EPS de 0.981, Estos resultados sugieren que *A. durangensis* presenta patrones de crecimiento particulares, los cuales se reflejan en años indicadores comunes (Figura 2). La variabilidad interanual del crecimiento puede ser evaluada analíticamente, considerando que los anillos de crecimiento pueden ser clasificados como anillos estrechos, asociados a condiciones de sequía, o anillos anchos relacionados con años húmedos. Por ejemplo, los años 2011, 2006, 1998, 1991, 1983, 1962, 1950, 1927, 1902, 1890 y 1885 son identificados como anillos estrechos, mientras que 2010, 2005, 2002, 1996, 1990, 1986, 1983, 1961, 1948, 1945 y 1941 corresponden a anillos anchos.

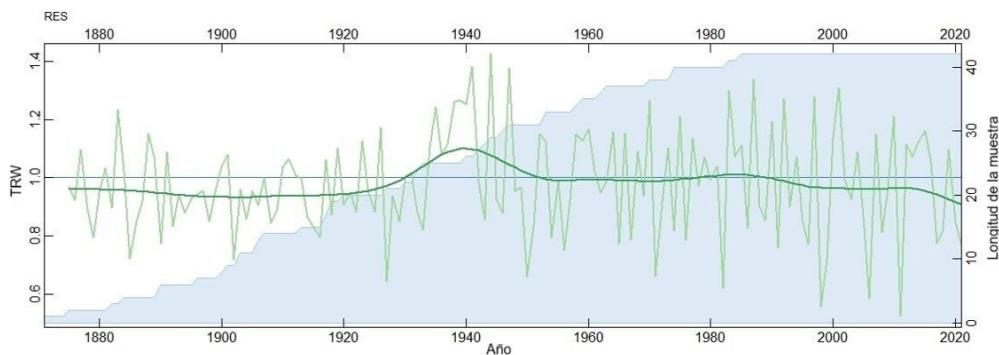


Figura 2. Cronología residual de índice de ancho de anillo (verde olivo) de *A. durangensis*. La línea verde oscura representa el spliline, mientras que el área azul indica el número de radios medidos (profundidad de la muestra) para cada año (eje y derecho).

Figure 2: Residual chronology of *A. durangensis* tree ring width index (olive green). The dark green line represents the moving averages, while the blue area indicates the number of measured radii (sample depth) for each year (right y-axis).

Sin embargo, el índice de ancho de anillo de *A. durangensis* también revela que, en algunos períodos, como de 1940 a 2022, presenta una correlación más clara con los aumentos en la temperatura máxima (TMAX), sugiriendo que no solo la precipitación, sino también la temperatura, tiene un rol clave en la variabilidad del crecimiento radial. (Figura 2). Las variaciones de temperatura máxima y mínima también comienzan a tener un incremento a partir de 1940, mientras que la precipitación no mostró una tendencia temporal por lo que la disminución del índice de TRW tiene correspondencia con el incremento de temperatura (Figura 3).

Correlación con clima

De acuerdo con los datos obtenidos de *Climate Explorer*, se puede observar que, las temperaturas máximas y mínimas promedio de cada mes, han comenzado a incrementarse a partir de 1980 (Figura 3). Caso contrario con lo que ocurre con la precipitación a partir de ese año, que no muestra una tendencia significativa en este periodo, sin embargo, ha comenzado a disminuir (Figura 3).

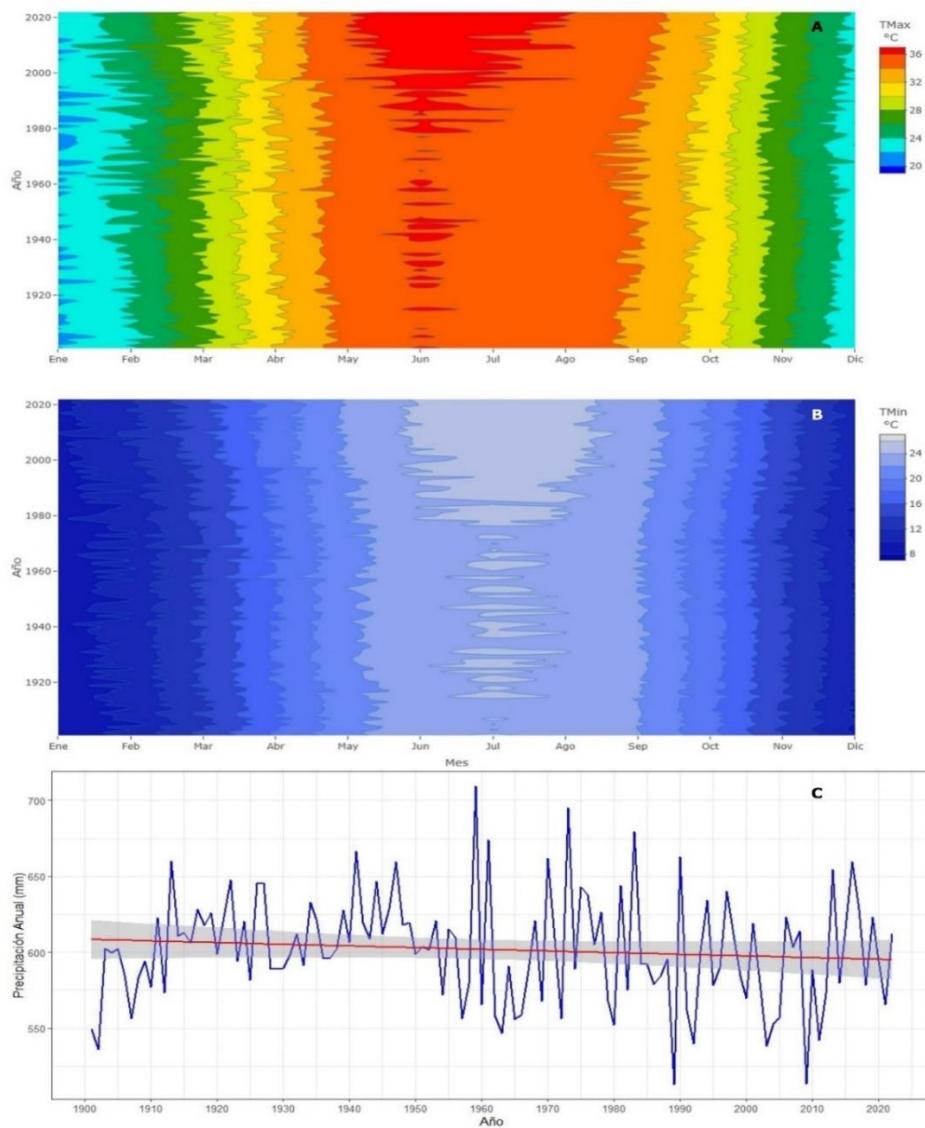


Figura 3. Registros históricos mensuales a partir de 1900 de Temperatura máxima, mínima y precipitación obtenidos a partir de *Climate Explorer*.

Figure 3. Monthly historical records dating back to 1900 of maximum temperature, minimum temperature, and precipitation obtained from *Climate Explorer*.

El análisis de correlación realizado mediante el paquete estadístico treeclim para el periodo 1900-2021 reveló la relación entre las variables climáticas y el crecimiento de los anillos de *A. durangensis*. Estos coeficientes indican la magnitud y el signo de la correlación entre las variables climáticas y el crecimiento de los anillos (Figura 4).

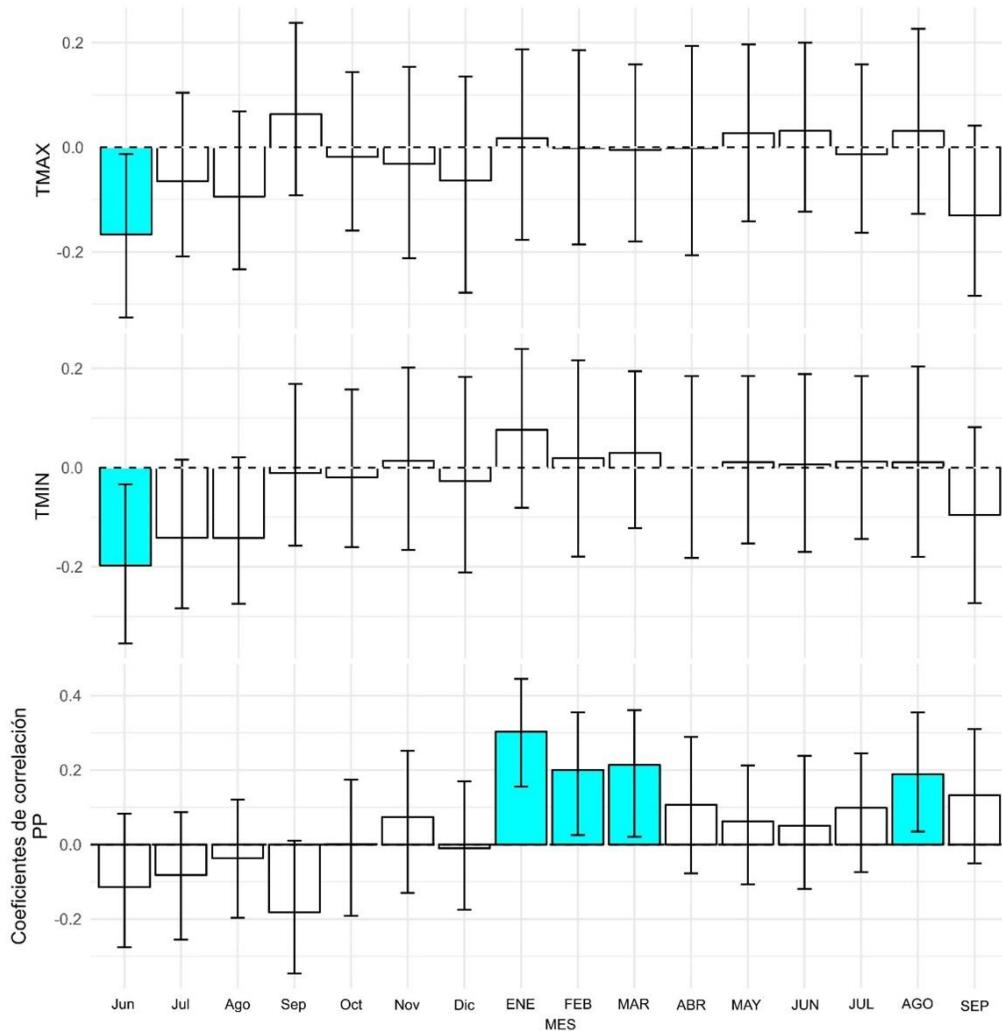


Figura 4. Correlaciones de la cronología del ancho de anillo con la temperatura máxima, la temperatura mínima y la precipitación (TMAX, TMIN y PP, respectivamente). Los meses en minúsculas corresponden al periodo de crecimiento anterior, mientras que los que están en mayúsculas representan el año actual. Las correlaciones que son estadísticamente significativas se destacan en cyan y se obtuvieron a un nivel de confianza del 95%.

Figure 4. Correlations of the ring-width chronology with maximum temperature, minimum temperature, and precipitation (TMAX, TMIN, and PP, respectively). The months in lowercase refer to the previous growth period, while those in uppercase indicate the current year. Statistically significant correlations are highlighted in cyan and were obtained at a 95% confidence level.

Para la TMAX, el coeficiente de correlación para junio del año anterior es -0.172, lo que sugiere una correlación negativa significativa ($p < 0.05$) con el crecimiento del ancho de anillo. Esto indica que temperaturas máximas diarias mayores en junio del año anterior están asociadas con anillos de crecimiento más estrechos en el año siguiente.

En cuanto a la TMIN, en junio (-0.202) las temperaturas mínimas nocturnas más elevadas están asociadas con anillos de crecimiento más estrechos en el año siguiente ($p < 0.05$). Estos resultados sugieren que los patrones de temperatura mínima durante estos meses pueden tener un impacto significativo en el crecimiento de los anillos de *A. durangensis*. Por otro lado, para la PP se

muestran correlaciones positivas significativas con el crecimiento de los anillos en enero, febrero, marzo y agosto del año siguiente con incrementos porcentuales del 30.6%, 20.1%, 20.9% y 19.1%, respectivamente. Esto sugiere que una mayor precipitación durante estos meses está asociada con anillos de crecimiento más anchos en el mismo año (Figura 4).

SPEI y TRW

El análisis de las correlaciones entre los meses del año del SPEI y TRW, revelan una fuerte relación entre la variabilidad climática y el crecimiento radial de los árboles. Las correlaciones de 0.39-0.60 indican que los patrones de crecimiento radial están estrechamente vinculados con el SPEI en diferentes períodos del año. Durante los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, y diciembre y la sequía acumulada desde 2 a 20 meses se observan correlaciones de 0.39 (Figura 5). Esto sugiere que el SPEI tiene un impacto significativo en el crecimiento radial de los árboles. En términos ecológicos, esto significa que la disponibilidad de agua es un factor crítico que influye en la capacidad de los árboles para crecer y desarrollarse. Un balance hídrico positivo, donde la precipitación es suficiente para satisfacer las demandas de evapotranspiración, se traduce en un aumento en el crecimiento radial.

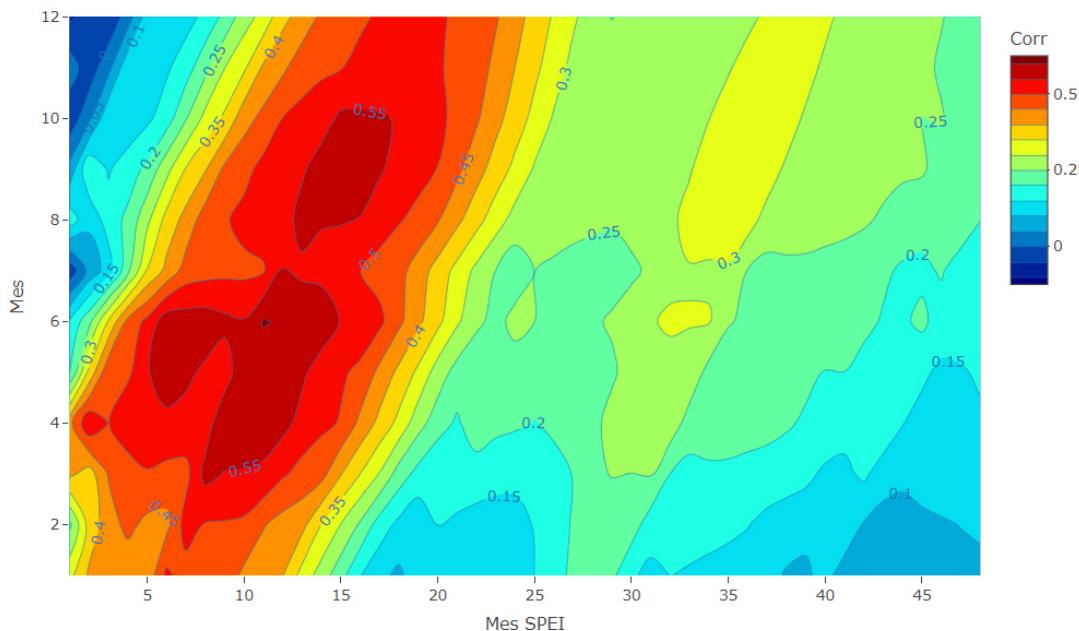


Figura 5. Correlaciones de los meses de crecimiento (enero-diciembre [1-12], eje y) en relación con la sequía y el crecimiento de *A. durangenensis* relacionando con TRW y el índice de sequía SPEI acumulado, considerando escalas de hasta 48 meses (eje x). Las correlaciones se calcularon para el período común y mejor replicado 1900-2021. Los coeficientes de correlación por encima de los valores de 0.30- 0.60 son significativos en $P <0.05$ y $P <0.01$, respectivamente.

Figure 5. Correlations of growth months (January-December [1-12], y-axis) in relation to drought and growth of *A. durangenensis*, linking with TRW and the accumulated drought index SPEI, considering scales of up to 48 months (x-axis). The correlations were calculated for the common and best-replicated period of 1900-2021. Correlation coefficients above the values of 0.30-0.60 are significant at $P <0.05$ and $P <0.01$, respectively.

Índices de Resiliencia

Los años característicos indican que los años extremos corresponden a eventos climáticos extremos, ya sean adversos o favorables y tienen un impacto significativo en el crecimiento de los anillos *A. durangenensis*, ya sea de manera negativa o positiva. Los años característicos negativos extremos, como 1999, 1982, 1916, 1880 y 1879, sugieren sequías u otros factores ambientales negativos que resultaron en anillos más estrechos. En contraste, los años característicos positivos extremos registrados fueron 2015, 2001, 1987, 1970 y 1921. Los años

característicos negativos fuertes fueron 2011, 2006, 1998, 1974, 1956, y 1987, mientras que solo 1881 fue positivo fuerte.

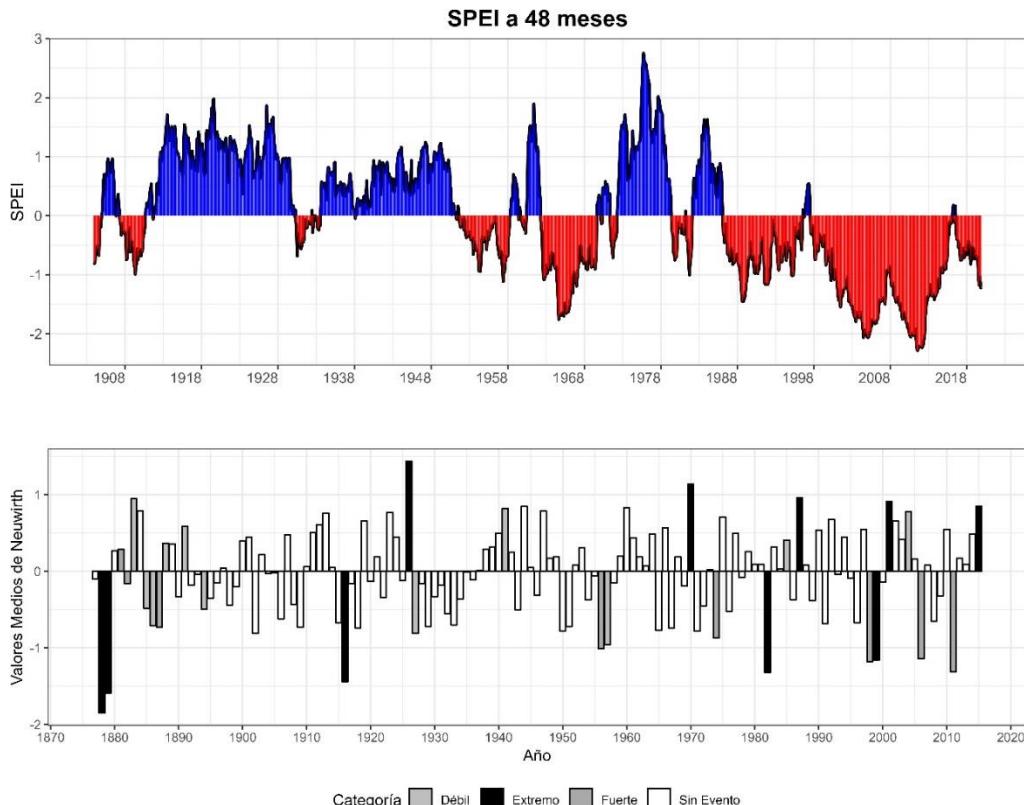


Figura 6. SPEI a 48 meses (superior) para el periodo 1900-2020 y valores medios de Neuwirth para el periodo 1878-2020 (inferior). Años característicos positivos y negativos mostrando aumentos y reducciones en el crecimiento radial (TRW, Tree-Ring Width), respectivamente.

Figure 6. 48-month SPEI (top) for the period 1900-2020 and Neuwirth mean values for the period 1878-2020 (bottom). Positive and negative pointer years show increases and decreases in radial growth (TRW, Tree-Ring Width), respectively.

Aunque es probable que las sequías hayan sido un factor clave, es necesario considerar otros posibles factores ambientales negativos, como la competencia del suelo o perturbaciones biológicas, que podrían contribuir al desarrollo de anillos más estrechos (Figura 6).

En la Figura 7 se muestra la variación anual de los índices de resistencia, recuperación y resiliencia de TRW de *A. durangensis* para la extensión de la cronología de 1870-2021. A partir de 1990, los índices de recuperación, resistencia y resiliencia tienen una mayor variación que en los años anteriores, coincidiendo con una reducción del crecimiento medio de *A. durangensis*. Sin embargo, para los años identificados como característicos extremos negativos 1999, 1982 y los años negativos fuertes 1956, 1957, 1974, 1998, 2006 y 2011, éstos presentan registros más elevados de estos índices en comparación con los años no característicos. La resistencia registró los menores valores en los años 1982, 1998, 1999, 2006 y 2011. En cuanto a la recuperación, registró los mayores valores para esos mismos años. La resiliencia mostró variaciones a lo largo del periodo. En 1998, 1999, 2011 y 2012 se observaron valores de resiliencia con mayor frecuencia partir del fin del siglo XX. Se muestra que, las reducciones en el crecimiento son más irregulares e intensas, en donde se ve reflejado en la resistencia, la recuperación y resiliencia (Figura 7).

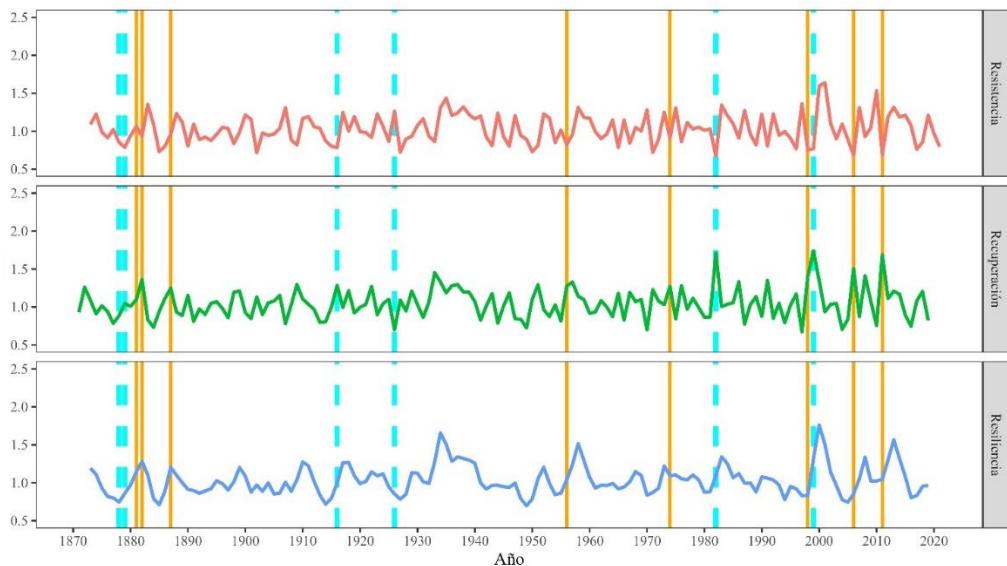


Figura 7. Índices de resistencia, recuperación y resiliencia para el periodo de 1870-2021. Años característicos negativos extremos: línea cyan y años característicos fuertes: líneas naranja.

Figure 7. Resistance, recovery, and resilience indices for the period 1870-2021. Extreme negative pointer years: cyan line, and strong pointer years: orange lines

El análisis del periodo de recuperación ha revelado una disminución significativa del tiempo de recuperación a lo largo del tiempo (pendiente = -0.0045 , $p = 0.0381$), lo que indica que, en promedio, la especie está tardando menos en recuperar a los niveles de crecimiento pre-sequía (Figura 8). Este hallazgo parece contradictorio al considerar que la resistencia ha disminuido. Sin embargo, una posible explicación es que las condiciones post-evento, como la disponibilidad de agua y nutrientes, han mejorado en algunos casos, permitiendo que los árboles se recuperen más rápidamente. Alternativamente, podría haber un efecto compensatorio, donde la especie invierte más recursos en su recuperación a expensas de otros procesos, como el crecimiento a largo plazo.

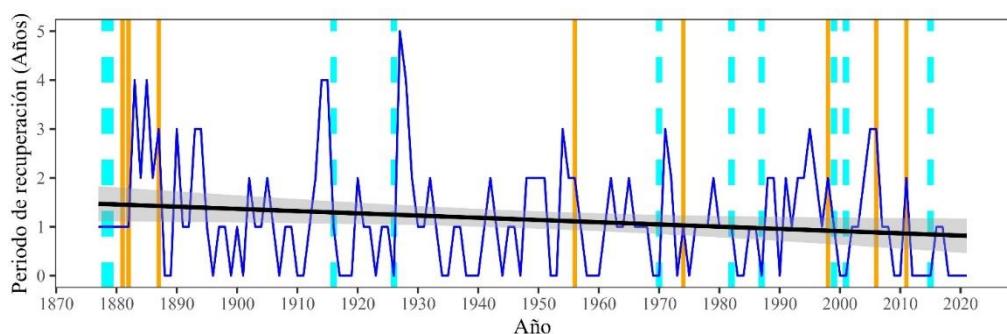


Figura 8. Tendencia del Período de recuperación de *Abies durangensis* de 1880-2021 (línea azul). Años característicos negativos extremos: línea cyan, años característicos negativos fuertes: líneas naranja, y línea de tendencia: línea negra.

Figure 8. Trend of *Abies durangensis* Recovery Period from 1880-2021 (blue line). Extreme negative pointer years: cyan line, strong negative pointer years: orange lines, and trend line: black line.

A pesar de la disminución en el tiempo de recuperación, la estabilidad en los índices de resiliencia sugiere que *A. durangensis* mantiene una capacidad para recuperarse, pero sin lograr una adaptación superior en el tiempo. Esto resalta la complejidad de la dinámica de crecimiento post-sequía, en donde factores como el cambio climático, la disponibilidad de recursos y las perturbaciones forestales juegan roles interrelacionados. Aunque la especie puede recuperarse

más rápidamente, su resistencia y resiliencia no han mejorado significativamente, lo que podría tener implicaciones importantes en la capacidad de *A. durangensis* para enfrentar futuros eventos extremos. Es crucial profundizar en el análisis de estos patrones para entender si el cambio en el tiempo de recuperación está vinculado a una mayor vulnerabilidad general del ecosistema o si responde a cambios en las dinámicas forestales a nivel local.

DISCUSIÓN

La cronología evaluada muestra robustez, con un valor de señal poblacional expresada (EPS) de 0.981, similar a las reportadas en otros estudios (Villanueva-Díaz *et al.*, 2016), indicando una alta fiabilidad en la serie cronológica. Con 42 núcleos y un total de 861 anillos, la correlación media (*r-bar*) fue de 0.546, lo que sugiere una adecuada consistencia entre las muestras.

Estudios anteriores han abordado la respuesta de crecimiento de los bosques a las condiciones climáticas, mostrando discrepancias entre los autores respecto al impacto de las señales climáticas por la edad. Mientras que algunos sugieren que la edad influye en dichas señales (Haddad *et al.*, 2015; Jiao *et al.*, 2017; Belokopytova *et al.*, 2022), otros indican que las respuestas de crecimiento ante el clima son independientes de la edad (Linares *et al.*, 2013). Esta divergencia sugiere que factores adicionales podrían estar modulando las respuestas del crecimiento de las especies arbóreas frente a las condiciones climáticas. Aunque no se evaluó directamente en este estudio, se reconoce que la edad puede ser un factor relevante en futuras investigaciones más específicos sobre el papel de la edad y otros factores en diferentes especies y regiones. Estos métodos no destructivos son una opción para evitar la remoción del arbolado, y necesarios para nuestra comprensión de la influencia de estos procesos naturales en el crecimiento de los árboles a condiciones extremas cada vez más recurrentes. Además, estos cálculos son vitales para sustentar propuestas de mitigación al cambio climático (Cabral-Alemán *et al.*, 2022).

Esta investigación contribuye al posicionamiento de México en la agenda internacional sobre el tema de resiliencia de especies ante el cambio climático (Gazol *et al.*, 2017; Schwarz *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2022). Los resultados de esta investigación comprenden 151 años de resiliencia a la sequía en *A. durangensis* al suroeste de la SMO de Durango. En términos de vulnerabilidad climática, encontramos que *A. durangensis* es sensible al estrés por sequía similar a lo reportado anteriormente (Pompa-García *et al.*, 2017), lo que pone en evidencia que será más vulnerable a las condiciones cada vez más cálidas y secas durante este siglo (Wang & Wang, 2024).

La sensibilidad de las especies forestales a las variaciones climáticas es contrastante, especialmente en términos de condiciones cálidas (Camarero *et al.*, 2021). Por ejemplo, *A. durangensis* se correlacionó negativamente con las TMAX y TMIN en el mes de junio (Figura 4). En concordancia, las reducciones del crecimiento radial de TRW (Figura 2) decrecieron cuando comenzaron a incrementar las TMAX y TMIN a partir de 1970 (Figura 2 y 3) este mismo comportamiento también fue reportado por Pompa-García *et al.* (2017). Un coeficiente de correlación bajo no necesariamente indica que no haya una relación significativa; podría reflejar la complejidad de los factores ambientales y biológicos que interactúan en el proceso de crecimiento. A pesar de la existencia de una relación, otros factores influyentes en el crecimiento de los anillos no están siendo considerados en este análisis y, por lo tanto, podrían ser objeto de investigaciones adicionales para comprender mejor la variabilidad observada.

La falta de correlación entre la precipitación y el crecimiento radial sugiere que la respuesta del crecimiento a la humedad del suelo puede ser retardada y dependiente de otros factores como la temperatura y la luz solar. Además, el estrés hídrico acumulado puede limitar el crecimiento, resaltando la complejidad de la relación entre estas variables (Lloret *et al.*, 2011). Además, se ha documentado que *A. durangensis* responde significativamente al clima en su crecimiento radial, los anchos de los anillos son más sensibles a las condiciones de humedad, mientras que la densidad de la madera se ve más afectada por la temperatura. (González-Cásares, Pompa-García & Venegas-González, 2019).

Los meses de primavera y verano (marzo a agosto) muestran correlaciones altas. Estos meses coinciden con la temporada de crecimiento activo de los árboles. En otoño (septiembre a noviembre), las correlaciones altas sugieren que la disponibilidad de agua sigue siendo importante para el crecimiento radial, posiblemente debido a la acumulación de reservas y la

preparación para el invierno. Incluso en diciembre, las correlaciones positivas indican que el balance hídrico puede estar reflejando los efectos acumulativos o residuales de las condiciones climáticas a lo largo del año. Las correlaciones mayores a 0.39 entre el SPEI y los meses del año de crecimiento destacan la importancia del balance hídrico en el crecimiento radial de los árboles. Estas relaciones subrayan la sensibilidad de *A. durangensis* a las variaciones climáticas, especialmente en términos de disponibilidad de agua.

Nuestros resultados sugieren que desde 1990 a 2022 han ocurrido 4 eventos de reducciones del crecimiento (1998, 1999, 2006 y 2011). Estos eventos han sido identificados en otras investigaciones como sequías en el norte del país (Pompa-García *et al.*, 2017; Castruita-Esparza *et al.*, 2019; Cabral-Alemán *et al.*, 2022). Además, los años 1956, 1974 y 1982 también fueron registrados como reducciones de crecimiento por sequías en otras investigaciones del norte del país (Carlón Allende *et al.*, 2021; Cabral-Alemán *et al.*, 2022; Correa-Díaz *et al.*, 2023). En los años 1878 y 1879 los estados del norte de México sufrieron una sequía que provocó gran escasez y carencia de alimentos (Cerano Paredes *et al.*, 2011; Domínguez, 2016). Estos eventos también fueron registrados en esta investigación como eventos extremos de reducción del crecimiento radial.

En total fueron registradas 9 reducciones del crecimiento radial a lo largo de 1910-2020 años que corresponden a sequías históricas que azotaron el norte de México. Nuestros resultados sugieren que *A. durangensis* ha estado sometido a mayores presiones climáticas, lo que se refleja en una disminución de su resistencia y un aumento en la capacidad de recuperación. Esto ha llevado a una mayor resiliencia frente a la creciente recurrencia e intensidad de los períodos secos en México durante las últimas décadas (Stahle *et al.*, 2016; Pompa-García *et al.*, 2017; Correa-Díaz *et al.*, 2023). Sin embargo, esta interpretación podría deberse a otros factores no climáticos, como la competencia intraespecífica, las condiciones edáficas o perturbaciones bióticas, que pudieron haber influido en el crecimiento de los anillos. Para mejorar la precisión, sería conveniente complementar el análisis con datos ambientales, como humedad del suelo, plagas y enfermedades que ayuden a determinar el origen multifactorial de las observaciones.

Los valores de resistencia, recuperación y resiliencia tienen concordancia con los registrados para otras especies mexicanas. Por ejemplo, Correa-Díaz *et al.* (2023) encontraron que *Abies concolor* y *Pinus jeffreyi* presentaron una baja resistencia a la sequía, pero mostraron una alta capacidad de recuperación. En contraste con *Pinus lumholtzii* tuvo un valor de resistencia más alto, aunque su recuperación fue menor. Por otro lado, *Pinus lambertiana* mostró una resistencia intermedia y una buena capacidad de recuperación. Además, también mostraron concordancia con especies como *Pinus ponderosa* Douglas en E.E.U.U y *Araucaria araucana* (Molina) en Argentina (Lloret *et al.*, 2011; Piraino *et al.*, 2022).

Una limitante de nuestra investigación fue la evaluación del comportamiento dendroclimático de un solo sitio para la especie, lo que no representa un gradiente geográfico amplio que podría revelar las limitaciones de la respuesta a los factores climáticos bajo condiciones diferentes. Además, otra limitante son los datos climáticos, pues al no tener datos climáticos detallados a nivel local podría subestimar la correlación precisa entre las variables climáticas con los anillos de crecimiento, lo que podría afectar en la exactitud de las conclusiones sobre la relación clima-crecimiento. Por tanto, se sugiere para futuros estudios complementar datos climáticos de mayor resolución u otras fuentes de datos climáticos.

CONCLUSIONES

El crecimiento radial de *A. durangensis* durante el periodo 1910-2020 mostró una correlación positiva con las precipitaciones y negativas con la temperatura máxima y mínima. Este crecimiento fue especialmente sensible a los períodos de sequía acumulada, mientras que años con abundantes precipitaciones y temperaturas moderadas favorecieron el crecimiento radial.

A. durangensis muestra una notable capacidad para recuperarse de eventos climáticos extremos, aprovechando eficientemente los recursos hídricos y restaurando su tasa de crecimiento anterior. Aunque mantiene su resistencia durante períodos de sequía, la recuperación puede verse afectada. A pesar de un aumento en la resiliencia para recuperar tasas de crecimiento previas a estos

eventos, la creciente frecuencia e intensidad de las sequías asociadas al cambio climático podría comprometer su capacidad de recuperación.

La protección de los BAVC es esencial para mantener servicios ecosistémicos críticos. Este estudio resalta la importancia de priorizar la conservación de estos bosques, enfocándose en estrategias prácticas que promuevan su resiliencia ante el cambio climático. Se recomienda adaptar las prácticas de manejo forestal para aumentar su resistencia a condiciones climáticas extremas, así como fomentar la reforestación garantizando la preservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos.

Los estudios dendroecológicos no destructivos constituyen una evaluación del pasado que permite realizar una proyección del comportamiento futuro de nuestros bosques. Analizar los anillos de crecimiento mediante técnicas no destructivas ayuda comprender la vida y el comportamiento de las especies forestales, y permiten pronosticar como influyen los cambios ambientales en el crecimiento de especies forestales.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo de la beca doctoral 1012625. Agradecemos al equipo de DendroRed (<https://dendrored.ujed.mx/>) y al Laboratorio de Dendroecología de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Juárez del Estado de Durango por las facilidades para la toma de datos de campo y procesamiento de muestras.

LITERATURA CITADA

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Acosta-Hernández, A. C., Pompa-García, M., & Camarero, J. J. (2017). An Updated Review of Dendrochronological Investigations in Mexico, a Megadiverse Country with a High Potential for Tree-Ring Sciences. *Forests* 2017, Vol. 8, Page 160, 8(5), 160. <https://doi.org/10.3390/f8050160>
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., . . . Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, 259(4), 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001>
- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., & et al. (2021). Forest Carbon Management: a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*, 7, 245–266. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>
- Anderegg, W. R. L., Trugman, A. T., Bowling, D. R., Salvucci, G., & Tuttle, S. E. (2019). Plant functional traits and climate influence drought intensification and land-atmosphere feedbacks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(28), 14071–14076. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904747116>
- Babst, F., Bodesheim, P., Charney, N., Friend, A. D., Girardin, M. P., Klesse, S., Moore, D. J. P., Seftigen, K., Björklund, J., Bouriaud, O., Dawson, A., DeRose, R. J., Dietze, M. C., Eckes, A. H., Enquist, B., Frank, D. C., Mahecha, M. D., Poulter, B., Record, S., . . . Evans, M. E. K. (2018). When tree rings go global: Challenges and opportunities for retrospective and prospective insight. *Quaternary Science Reviews*, 197, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.009>
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>

- Belokopytova, L. V., Zhirnova, D. F., Krutovsky, K. V., Mapitov, N. B., Vaganov, E. A., & Babushkina, E. A. (2022). Species-and Age-Specific Growth Reactions to Extreme Droughts of the Keystone Tree Species across Forest-Steppe and Sub-Taiga Habitats of South Siberia. *Forests*, 13(7), 1027. <https://doi.org/10.3390/f13071027>
- Bernal, A. A., Kane, J. M., Knapp, E. E., & Zald, H. S. J. (2023). Tree resistance to drought and bark beetle-associated mortality following thinning and prescribed fire treatments. *Forest Ecology and Management*, 530, 120758. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120758>
- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Cabral-Alemán, C., Villanueva-Díaz, J., Quiñonez-Barraza, G., & Gómez-Guerrero, A. (2022). Resilience of *Pinus durangensis* Martínez in Extreme Drought Periods: Vertical and Horizontal Response of Tree Rings. *Atmosphere* 2023, Vol. 14, Page 43, 14(1), 43. <https://doi.org/10.3390/atmos14010043>
- Camarero, J. J., Gazol, A., Linares, J. C., Fajardo, A., Colangelo, M., Valeriano, C., Sánchez-Salguero, R., Sangüesa-Barreda, G., Granda, E., & Gimeno, T. E. (2021). Differences in temperature sensitivity and drought recovery between natural stands and plantations of conifers are species-specific. *Science of The Total Environment*, 796, 148930. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148930>
- Carlón Allende, T., Villanueva Díaz, J., Soto Castro, G., Mendoza, M. E., & Macías, J. L. (2021). Tree rings as indicators of climatic variation in the Trans-Mexican Volcanic Belt, central Mexico. *Ecological Indicators*, 120, 106920. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106920>
- Castagneri, D., Vacchiano, G., Hacket-Pain, A., DeRose, R. J., Klein, T., & Bottero, A. (2022). Meta-analysis Reveals Different Competition Effects on Tree Growth Resistance and Resilience to Drought. *Ecosystems*, 25(1), 30–43. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00638-4>
- Castruita-Esparza, L. U., Silva, L. C. R., Gómez-Guerrero, A., Villanueva-Díaz, J., Correa-Díaz, A., & Horwath, W. R. (2019). Coping With Extreme Events: Growth and Water-Use Efficiency of Trees in Western Mexico During the Driest and Wettest Periods of the Past One Hundred Sixty Years. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124(11), 3419–3431. <https://doi.org/10.1029/2019JG005294>
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., Valdez-Cepeda, D. R., Méndez-González, J., & Constante-García, V. (2011). Sequías reconstruidas en los últimos 600 años para el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2, 235–249. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2nspe2/v2spe2a6.pdf>
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2016). *Oyamel norteño (Abies durangensis)*. EncicloVida. <https://enciclovida.mx/especies/155240-abies-durangensis>
- Correa-Díaz, A., Villanueva-Díaz, J., Gómez-Guerrero, A., Martínez-Bautista, H., Castruita-Esparza, L. U., Horwath, W. R., & Silva, L. C. R. (2023). A comprehensive resilience assessment of Mexican tree species and their relationship with drought events over the last century. *Global Change Biology*, 29(13), 3652–3666. <https://doi.org/10.1111/gcb.16705>
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: de la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 77–93. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500077&lng=es&nrm=iso&tlang=es
- García-Trujillo, Z. H. M. K., Torres-Pérez, J. A., Cázares-Morán, M. A., Avitia-Deras, A., Claudia Palafox-Barcenas, & Ku-De Dios, E. N. (2023). Percepción social de las reservas naturales en Ejidos de Quintana Roo: Social perception of natural reserves in Ejidos de Quintana Roo. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(1), 126–139. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n1-012>
- Gazol, A., Camarero, J. J., Anderegg, W. R. L., & Vicente-Serrano, S. M. (2017). Impacts of droughts on the growth resilience of Northern Hemisphere forests. *Global Ecology and Biogeography*, 26(2), 166–176. <https://doi.org/10.1111/geb.12526>
- Girona, M. M., Aakala, T., Aquilué, N., Bélisle, A. C., Chaste, E., Danneyrolles, V., Díaz-Yáñez, O., D'Orangeville, L., Grosbois, G., Hester, A., Kim, S., Kulha, N., Martin, M., Moussaoui,

- L., Pappas, C., Portier, J., Teitelbaum, S., Tremblay, J. P., Svensson, J., ... Gauthier, S. (2023). Challenges for the Sustainable Management of the Boreal Forest Under Climate Change. *Advances in Global Change Research*, 74, 773–837.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_31
- González-Cázares, M., Pompa-García, M., & Venegas-González, A. (2019). Climate signals from intra-annual wood density fluctuations in *Abies durangensis*. *IAWA journal*, 40(2), 276–287. Disponible en: <https://doi.org/10.1163/22941932-40190217>
- 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://www.scielo.org.mx/pdf/abm/n100/n100a12.pdf>
- Grantham, H. S., Duncan, A., Evans, T. D., Jones, K. R., Beyer, H. L., Schuster, R., Walston, J., Ray, J. C., Robinson, J. G., Callow, M., Clements, T., Costa, H. M., DeGemmis, A., Elsen, P. R., Ervin, J., Franco, P., Goldman, E., Goetz, S., Hansen, A., ... Watson, J. E. M. (2020). Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. *Nature Communications* 2020 11:1, 11(1), 1–10.
<https://doi.org/10.1038/s41467-020-19493-3>
- Hadad, M. A., Roig Juñent, F. A., Boninsegna, J. A., & Patón, D. (2015). Age effects on the climatic signal in *Araucaria araucana* from xeric sites in Patagonia, Argentina. *Plant Ecology & Diversity*, 8(3), 343–351. <https://doi.org/10.1080/17550874.2014.980350>
- Hammond, W. M., Williams, A. P., Abatzoglou, J. T., Adams, H. D., Klein, T., López, R., ... Allen, C. D. (2022). Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, 13(1), 1761.
<https://doi.org/10.1038/s41467-022-29289-2>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data* 2020 7:1, 7(1), 1–18.
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hartmann, H., Bastos, A., Das, A. J., Esquivel-Muelbert, A., Hammond, W. M., Martínez-Vilalta, J., McDowell, N. G., Powers, J. S., Pugh, T. A. M., Ruthrof, K. X., & Allen, C. D. (2022). Climate Change Risks to Global Forest Health: Emergence of Unexpected Events of Elevated Tree Mortality Worldwide. *Annual Review of Plant Biology*, 73(Volume 73, 2022), 673–702. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-102820-012804>
- Holmes, R. L. (1983). Computer-Assisted Quality Control in Tree-Ring Dating and Measurement Item Type Article Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 43. <http://hdl.handle.net/10150/261223>
- INEGI. (2017). Conjunto Nacional de Información de Uso del Suelo y Vegetación Escala 1: 250,000, Serie VI. Dirección General de Geografía. *Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática*. Ags., México.
- Jiao, L., Jiang, Y., Wang, M., Zhang, W., & Zhang, Y. (2017). Age-Effect Radial Growth Responses of *Picea schrenkiana* to Climate Change in the Eastern Tianshan Mountains, Northwest China. *Forests* 2017, Vol. 8, Page 294, 8(9), 294.
<https://doi.org/10.3390/f8090294>
- Kannenberg, S. A., Schwalm, C. R., & Anderegg, W. R. L. (2020). Ghosts of the past: how drought legacy effects shape forest functioning and carbon cycling. *Ecology Letters*, 23(5), 891–901. [https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ele.13485](https://doi.org/10.1111/ele.13485)
- Lee, S., Moriasi, D. N., Mehr, A. D., & Mirchi, A. (2024). Sensitivity of Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) to the choice of SPEI probability distribution and evapotranspiration method. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101761. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101761>
- Linares, J. C., Taïqui, L., Sangüesa-Barreda, G., Seco, J. I., & Camarero, J. J. (2013). Age-related drought sensitivity of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) in the Moroccan Middle Atlas forests. *Dendrochronologia*, 31(2), 88–96. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.003>
- Lloret, F., Keeling, E. G., & Sala, A. (2011). Components of tree resilience: effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine forests. *Oikos*, 120(12), 1909–1920.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2011.19372.x>

- Locosselli, G. M., Cintra, B. B. L., Ferreira, L. S., da Silva-Luz, C. L., Miyahara, A. A. L., Brienen, R. J. W., Gloor, E., Boom, A., Grandis, A., & Buckeridge, M. S. (2024). Stress-tolerant trees for resilient cities: Tree-ring analysis reveals species suitable for a future climate. *Urban Climate*, 55, 101964. <https://doi.org/10.1016/j.ulclim.2024.101964>
- Marcotti, E., Amoroso, M. M., Rodríguez-Catón, M., Vega, L., Srur, A. M., & Villalba, R. (2021). Growth resilience of Austrocedrus chilensis to drought along a precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Forest Ecology and Management*, 496, 119388. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119388>
- Martínez-Rivas, J. A., Vargas-Larreta, B., López-Martínez, J. O., Aguirre-Calderón, C. G., Hernández, F. J., & Ángeles-Pérez, G. (2023). Understanding Soil Respiration Dynamics in Temperate Forests in Northwestern Mexico. *Forests 2023, Vol. 14, Page 1763*, 14(9), 1763. <https://doi.org/10.3390/f14091763>
- McDowell, N. G., Sapes, G., Pivovaroff, A., Adams, H. D., Allen, C. D., Anderegg, W. R. L., Arend, M., Breshears, D. D., Brodribb, T., Choat, B., Cochard, H., De Cáceres, M., De Kauwe, M. G., Grossiord, C., Hammond, W. M., Hartmann, H., Hoch, G., Kahmen, A., Klein, T., ... Xu, C. (2022). Mechanisms of woody-plant mortality under rising drought, CO₂ and vapour pressure deficit. *Nature Reviews Earth & Environment* 2022 3:5, 3(5), 294–308. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00272-1>
- Mikusiński, G., Orlikowska, E. H., Bubnicki, J. W., Jonsson, B. G., & Svensson, J. (2021). Strengthening the Network of High Conservation Value Forests in Boreal Landscapes. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 595730. <https://doi.org/10.3389/fevo.2020.595730>
- Muller-Landau, H. C., Cushman, K. C., Arroyo, E. E., Martinez Cano, I., Anderson-Teixeira, K. J., & Backiel, B. (2021). Patterns and mechanisms of spatial variation in tropical forest productivity, woody residence time, and biomass. *New Phytologist*, 229(6), 3065–3087. <https://doi.org/10.1111/nph.17084>
- Neuwirth, B., Schweingruber, F. H., & Winiger, M. (2007). Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971. *Dendrochronologia*, 24(2–3), 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2006.05.004>
- O'Hara, K. L., Cox, L. E., Nikolaeva, S., Bauer, J. J., & Hedges, R. (2017). Regeneration Dynamics of Coast Redwood, a Sprouting Conifer Species: A Review with Implications for Management and Restoration. *Forests 2017, Vol. 8, Page 144*, 8(5), 144. <https://doi.org/10.3390/f8050144>
- Patacca, M., Lindner, M., Lucas-Borja, M. E., Cordonnier, T., Fidej, G., Gardiner, B., ... & Schelhaas, M. J. (2023). Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Global change biology*, 29(5), 1359–1376. <https://doi.org/10.1111/gcb.16531>
- Piraino, S., Molina, J. A., Hadad, M. A., & Juñent, F. A. R. (2022). Resilience capacity of *Araucaria araucana* to extreme drought events. *Dendrochronologia*, 75, 125996. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125996>
- Pompa-García, M., Sánchez-Salguero, R., & Camarero, J. J. (2017). Observed and projected impacts of climate on radial growth of three endangered conifers in northern Mexico indicate high vulnerability of drought-sensitive species from mesic habitats. *Dendrochronologia*, 45, 145–155. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.08.006>
- R. Core Team. (2018). *R: a Language and Environment for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>
- Rydval, M., Björklund, J., von Arx, G., Begović, K., Lexa, M., Nogueira, J., Schurman, J. S., & Jiang, Y. (2024). Ultra-high-resolution reflected-light imaging for dendrochronology. *Dendrochronologia*, 83, 126160. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2023.126160>
- Schwarz, J., Skadiadesis, G., Kohler, M., Kunz, J., Schnabel, F., Vitali, V., & Bauhus, J. (2020). Quantifying Growth Responses of Trees to Drought—a Critique of Commonly Used Resilience Indices and Recommendations for Future Studies. *Current Forestry Reports*, 6(3), 185–200. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00119-2>
- Song, Y., Sterck, F., Sass-Klaassen, U., Li, C., & Poorter, L. (2022). Growth resilience of conifer species decreases with early, long-lasting and intense droughts but cannot be explained by hydraulic traits. *Journal of Ecology*, 110(9), 2088–2104. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13931>

Recibido:
3/junio/2024

Aceptado:
4/noviembre/2024

- Stahle, D. W., Cook, E. R., Burnette, D. J., Villanueva, J., Cerano, J., Burns, J. N., Griffin, D., Cook, B. I., Acuña, R., Torbenson, M. C. A., Szejner, P., & Howard, I. M. (2016). The Mexican Drought Atlas: Tree-ring reconstructions of the soil moisture balance during the late pre-Hispanic, colonial, and modern eras. *Quaternary Science Reviews*, 149, 34–60. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.06.018>
- Stokes, M.A. & Smiley, T.L. (1968). An Introduction to Tree Ring Dating; University of Chicago Press: Chicago, IL, USA.
- Trouet, V., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). KNMI Climate Explorer: A Web-Based Research Tool for High-Resolution Paleoclimatology. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.1.3> 69(1), 3–13. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.1.3>
- van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., & Bouriaud, O. (2015). pointRes: An R package to analyze pointer years and components of resilience. *Dendrochronologia*, 35, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.006>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Villanueva-Díaz, J., Vázquez-Selem, L., Gómez-Guerrero, A., Cerano-Paredes, J., Aguirre-González, N. A., & Franco-Ramos, O. (2016). Potencial dendrocronológico de *Juniperus monticola* Martínez en el monte Tlaloc, México. *Revista fitotecnia mexicana*, 39(2), 175–185. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v39n2/0187-7380-rfm-39-02-00175.pdf>
- Von Döhren, P., & Haase, D. (2015). Ecosystem disservices research: A review of the state of the art with a focus on cities. *Ecological Indicators*, 52, 490–497. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.027>
- Wang, B., Chen, T., Li, C., Xu, G., Wu, G., & Liu, G. (2022). Discrepancy in growth resilience to drought among different stand-aged forests declines going from a semi-humid region to an arid region. *Forest Ecology and Management*, 511, 120135. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120135>
- Wang, X., & Wang, X. (2024). Hotter drought and trade-off between fast and slow growth strategies as major drivers of tree-ring growth variability of global conifers. *Journal of Ecology*, 112(5), 1123–1139. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14290>
- Wigley, T. M., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23(2), 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023%3C0201:OTAVOC%3E2.0.CO;2)
- Wilming, M., van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Scharnweber, T., Buras, A., Biermann, C., Gurskaya, M., Hallinger, M., Lange, J., Shetti, R., Smiljanic, M., & Trouillier, M. (2020). Global assessment of relationships between climate and tree growth. *Global Change Biology*, 26(6), 3212–3220. <https://doi.org/10.1111/gcb.15057>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

**CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE
POBLACIONES DEL COMPLEJO *Agave*
angustifolia (ASPARAGACEAE: AGAVOIDEAE)
EN LA REGIÓN NORTE DE GUERRERO,
MÉXICO**

**MORPHOMETRIC CHARACTERIZATION OF
POPULATIONS OF THE *Agave angustifolia*
COMPLEX (ASPARAGACEAE: AGAVOIDEAE)
IN THE NORTHERN REGION OF GUERRERO,
MEXICO**

**Huerta Zavala, J., A.J. García Mendoza, E. Hernández Castro, H.R. Segura Pacheco,
A. Damián Nava, F. Godínez Jaimes**

**CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE POBLACIONES DEL COMPLEJO *Agave*
angustifolia (ASPARAGACEAE: AGAVOIDEAE) EN LA REGIÓN NORTE DE GUERRERO,
MÉXICO**

**MORPHOMETRIC CHARACTERIZATION OF POPULATIONS OF THE *Agave angustifolia*
COMPLEX (ASPARAGACEAE: AGAVOIDEAE) IN THE NORTHERN REGION OF
GUERRERO, MEXICO**



Caracterización morfométrica de poblaciones del complejo *Agave angustifolia* (Asparagaceae: Agavoideae) en la región norte de Guerrero, México

Morphometric characterization of populations of the *Agave angustifolia* complex (Asparagaceae: Agavoideae) in the northern region of Guerrero, Mexico

Jorge Huerta Zavala, Abisaí Josué García Mendoza, Elías Hernández Castro, Héctor Ramón Segura Pacheco, Agustín Damián Nava y Flaviano Godínez Jaimes

CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE POBLACIONES DEL COMPLEJO *Agave angustifolia* (ASPARAGACEAE: AGAVOIDEAE) EN LA REGIÓN NORTE DE GUERRERO, MÉXICO

MORPHOMETRIC CHARACTERIZATION OF POPULATIONS OF THE *Agave angustifolia* COMPLEX (ASPARAGACEAE: AGAVOIDEAE) IN THE NORTHERN REGION OF GUERRERO, MEXICO

Jorge Huerta-Zavala <https://orcid.org/0000-0001-9382-8701>
Tesisista del Programa Doctorado en Sostenibilidad de los Recursos Agropecuarios

Abisaí Josué García-Mendoza <https://orcid.org/0000-0002-0284-5117>
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, Jardín Botánico. Coyoacán, Ciudad de México

Elias Hernández-Castro <https://orcid.org/0000-0001-6573-6236>
Universidad Autónoma de Guerrero, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Doctorado en Sostenibilidad de los Recursos Agropecuarios. Iguala de la Independencia, Guerrero, México

Héctor Ramón Segura-Pacheco <https://orcid.org/0000-0002-6232-9819>
Agustín Damián-Nava <https://orcid.org/0000-0002-1581-0407>
Universidad Autónoma de Guerrero, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Maestría en Ciencias Agropecuarias y Gestión Local. Iguala de la Independencia, Guerrero, México

Flaviano Godínez-Jaimes. Autor de correspondencia: fgodinezj@uagro.mx
<https://orcid.org/0000-0001-5531-8989>
Universidad Autónoma de Guerrero, Facultad de Matemáticas, Chilpancingo, Guerrero, México

RESUMEN: Dentro del género *Agave* L. el complejo *Agave angustifolia* es uno de los grupos de plantas más importantes desde el punto de vista económico y cultural, del cual se han descrito más de 20 especies. Sin embargo, han sido escasos los estudios que permiten entender las relaciones taxonómicas del grupo. El objetivo principal de este estudio fue caracterizar mediante métodos morfométricos individuos silvestres y cultivados de este complejo, identificando los caracteres que permitan su correcta identificación, con el fin de contribuir al entendimiento de este grupo y facilitar los procesos de certificación de la producción de agave-mezcal. Se realizaron 28 salidas de campo y se colectaron 172 ejemplares de la región norte de Guerrero y un municipio de la región centro, de agosto de 2016 a marzo de 2023. De cada ejemplar se evaluaron datos de 18 caracteres morfométricos para su posterior selección y análisis estadístico, mediante el Análisis Discriminante Lineal (ADL) donde se utilizaron nueve caracteres y el Análisis de Componentes Principales (ACP), en el cual se emplearon 12 caracteres. Se identificaron taxonómicamente 106 ejemplares de *A. angustifolia* var. *angustifolia* (61.63%), 41 ejemplares de *A. angustifolia* var. *rubescens* (23.84%) y 25 ejemplares de *A. rhodacantha* (14.53%), esta última especie resultó ser un nuevo registro para Guerrero. Los caracteres color de la hoja, altura de roseta, número de hojas por planta, ancho mayor de la hoja, número de dientes en un lado del margen de la hoja, distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano y ancho de la espina terminal, permitieron delimitar los taxones estudiados, además de que pueden ser utilizados en los trabajos de identificación de los agaves, un requisito necesario para el proceso de certificación del agave-mezcal y con ello dar valor agregado a sus productos. Las variedades de *A. angustifolia* presentaron traslapes en algunos ejemplares lo que refleja

la alta variabilidad fenotípica de ambos taxones. El ADL resultó ser una herramienta estadística útil para el entendimiento de las variables fenotípicas del complejo *A. angustifolia*. Este tipo de estudios debe complementarse con información edafoclimática, gradientes altitudinales, así como datos agroecológicos y genéticos.

Palabras clave: conservación, mezcal, complejo taxonómico.

ABSTRACT

Within the *Agave* genus, the *Agave angustifolia* complex is one of the most important groups of plants from an economic and cultural point of view wherein more than 20 species have been described. However, there have been few studies that allow us to understand the taxonomic relationships of the group. The main objective of this study was to characterize wild and cultivated individuals from this complex using morphometric methods, identifying the characters that allow their correct identification, to contribute to the understanding of this group and enable the certification processes of agave production and mezcal. Between August 2016 and March 2023, 28 field trips were carried out and 172 specimens were collected from the northern region of Guerrero and a municipality in the central region. Data on 18 morphometric characters were evaluated for each specimen for subsequent selection and statistical analysis, using Linear Discriminant Analysis (LDA) where nine characters were used and Principal Component Analysis (PCA), in which 12 characters were used. One hundred six specimens of *A. angustifolia* var. *angustifolia* were taxonomically identified (61.63%), 41 specimens of *A. angustifolia* var. *rubescens* (23.84%) and 25 specimens of *A. rhodacantha* (14.53%), this last species turned out to be a new record for Guerrero. Traits such as leaf color, rosette height, number of leaves per plant, greatest width of the leaf, number of teeth on one side of the leaf margin, distance from the base of the terminal spine to the nearest tooth and width of the terminal spine, allowed the delimitation of the taxa studied, in addition to being used in the identification work of agaves, a necessary requirement for the agave-mezcal certification process and thereby giving added value to its products. The varieties of *A. angustifolia* presented overlaps in some specimens, which reflects the high phenotypic variability of both taxa. The ADL proved to be a useful statistical tool for understanding the phenotypic variables of the *A. angustifolia* complex. This type of studies must be complemented with edaphoclimatic information, altitudinal gradients, as well as agroecological and genetic data.

Key words: conservation, mezcal, taxonomic complex.

INTRODUCCIÓN

El género *Agave* L. tradicionalmente se ha considerado parte de la familia Agavaceae (Dahlgren *et al.*, 1985) y recientemente con base en evidencias morfológicas y moleculares como parte de la familia Asparagaceae, subfamilia Agavoideae (APG IV *et al.*, 2016). Sin embargo, su ubicación a nivel familia aún es controvertida dada su alta heterogeneidad morfológica y molecular (Chase *et al.*, 2009; Judd *et al.*, 2016; Thiede, 2020). El género *Agave* es endémico del continente americano, se distribuye desde el sur de los Estados Unidos de América hasta Colombia y Venezuela, incluyendo todas las islas del Caribe (García-Mendoza, 2004). Actualmente se reconocen 210 especies, de las cuales 160 se encuentran en México y de ellas 130 son endémicas, lo que representa el 62% a nivel mundial y el 81% a nivel nacional (García-Mendoza *et al.*, 2022).

En México, las especies de *Agave* tienen gran importancia económica y cultural, ya que proporcionan numerosos productos útiles a las personas como: fibras, alimentos, bebidas fermentadas y destiladas, forraje, material de construcción, sustitutos del jabón y numerosas artesanías. Los grupos humanos establecidos en el actual territorio de México aprovecharon los agaves desde hace por lo menos diez mil años, domesticando varios de ellos (Flannery, 1986). De las diferentes especies utilizadas en el país, se encuentran poblaciones silvestres y manejadas, como las de *Agave angustifolia* Haw. y los taxones emparentados, los cuales en muchas ocasiones

son difíciles de ubicar taxonómicamente debido al manejo que los humanos les han dado; tal es el caso de los taxones considerados en este estudio.

Las poblaciones naturales de *Agave angustifolia* se localizan desde Sonora (Méjico) hasta Costa Rica (Gentry, 1982), y representan la especie con mayor distribución dentro del género. Sin embargo, estas poblaciones forman parte de un complejo taxonómico del cual se han descrito más de 20 especies (Fragoso-Gadea *et al.*, 2021; Gentry, 1982), entre otras *A. rhodacantha* Trel. Existen diversos estudios que han investigado las relaciones taxonómicas y los usos en el complejo (Barrientos-Rivera *et al.*, 2019; Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 1996; Colunga-GarcíaMarín y May-Pat, 1997; Fragoso-Gadea *et al.*, 2021; Gil-Vega *et al.*, 2006; Rivera-Lugo *et al.*, 2018; Rodríguez-Garay *et al.*, 2009; Trejo *et al.*, 2018; Vargas-Ponce *et al.*, 2009). En los sitios donde se encuentran, presentan una gran diversidad morfológica y de usos tradicionales, así como a nivel industrial. Son de gran importancia económica, tanto para la extracción de fibras como para la producción de bebidas alcohólicas, como el mezcal, el tequila y el bacanora (Fragoso-Gadea *et al.*, 2021; García-Mendoza *et al.*, 1993).

En la región norte del estado de Guerrero, las poblaciones consideradas en este complejo, incluido *Agave rhodacantha* (García-Mendoza *et al.*, 2022) son utilizadas para la producción de mezcal (Kirchmayr *et al.*, 2014). Sin embargo, los ejemplares empleados con este fin presentan una gran variabilidad de formas y tamaños, lo que da lugar a confusiones sobre su identidad taxonómica, además de que al certificar las parcelas de agave y caracterizar la materia prima, los productores recurren al uso de nombres locales, sin tener certeza de las especies usadas, lo que ha limitado el dar valor agregado al producto. El presente estudio tuvo como objetivo caracterizar individuos de poblaciones del complejo *A. angustifolia* en la región norte de Guerrero, utilizando técnicas morfométricas y así definir aquellos caracteres que faciliten su correcta identificación, con ello se espera contribuir en los procesos de identificación y certificación del agave utilizado para mezcal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica

La investigación se realizó en la zona montañosa de la región norte del estado de Guerrero, en los municipios de Atenango del Río, Buenavista de Cuéllar, Copalillo, Cuetzala del Progreso, Huitzuco de los Figueroa, Iguala de la Independencia, Ixcateopan de Cuauhtémoc, Taxco de Alarcón, Teloloapan, Tetipac y un municipio (Eduardo Neri) y una localidad de la región centro (La Venta), todos incluidos en la cuenca del río Balsas, con altitudes comprendidas entre 467-2,500 msnm. (Figura 1; INEGI, 2021b).

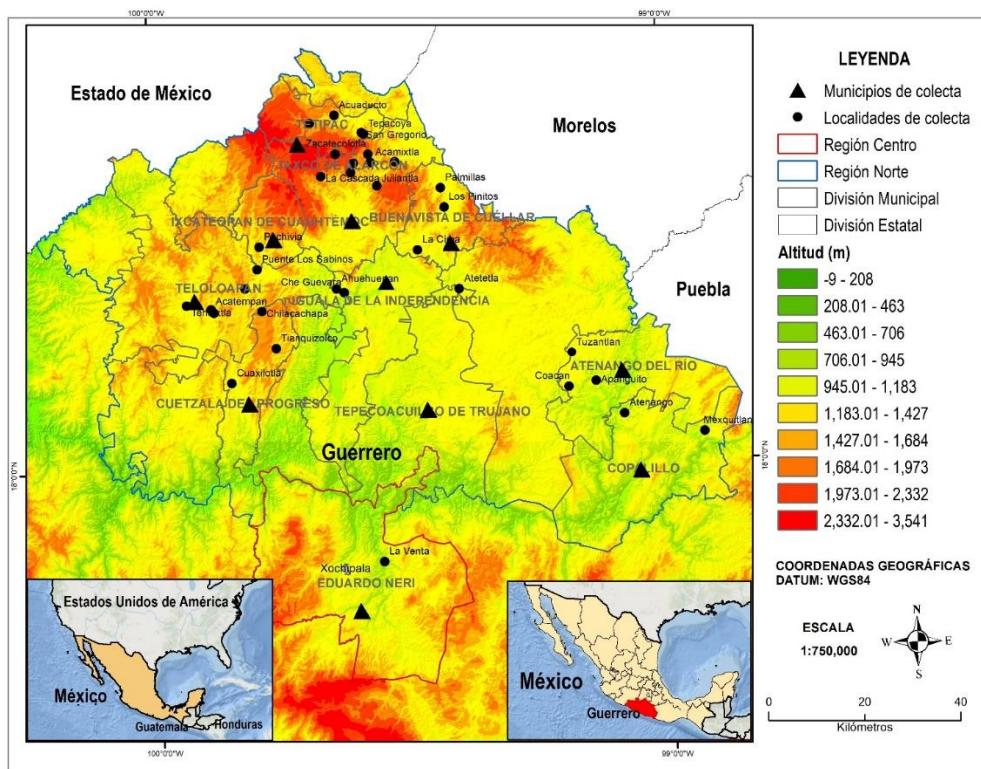


Figura 1. Ubicación de sitios de recolecta de ejemplares del complejo *Agave angustifolia*, en la región norte y centro de Guerrero.

Figure 1. Collection sites for specimens of the *Agave angustifolia* complex, in the Northern and Central Region of Guerrero.

Descripción ambiental

Dada la orografía y altitudes presentes en la región se tienen diversos tipos de clima como son: semiseco muy cálido (88,192 ha) y cálido subhúmedo (531,424 ha) presentes en altitudes menores a 1,100 m; semicálido subhúmedo (156,431 ha) en altitudes comprendidas entre 1,100 m y menores a 1,700 m y templado subhúmedo (81,521 ha) en altitudes superiores a 1,700 m (INEGI, 2020). La temperatura media anual oscila entre los 16 a 18 °C (8,236 ha) hasta 26 a 28 °C (102,548 ha), siendo frecuente el espectro comprendido entre 22 a 26 °C (555,911 ha; INEGI, 2020). Los rangos de precipitación van de 600 a 800 mm (35,895 ha), 800 a 1,200 mm (574,298 ha) y de 1,200 a 1,500 mm (245,799 ha; INEGI, 2020). Los principales ríos son: Amacuzac, Mezcalá, Cocula, Los Sabinos y San Juan, todos ellos tributarios del río Balsas (INEGI, 2021b). Las topoformas corresponden a sierras (729,799 ha), valles (42,570 ha) y lomeríos (26,551 ha; INEGI, 2001). Los principales tipos de roca son: caliza (279,987 ha), lutita-Arenisca (122,240 ha), metasedimentaria (122,026 ha) e ígnea extrusiva ácida (95,554 ha; INEGI, 2014). Los tipos de suelo predominantes son: Leptosol (404,130 ha), Regosol (211,649 ha), Phaeozem (100,355 ha) y Luvisol (74,149 ha; INEGI, 2014). Los principales usos del suelo y la vegetación son: vegetación secundaria arbustiva de selva baja caducifolia (290,432 ha), agricultura de temporal anual (162,599 ha), pastizal inducido (92,909 ha), vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (92,802 ha), vegetación secundaria arbórea de selva baja caducifolia (62,219 ha), selva baja caducifolia (35,851 ha), bosque de encino (25,401 ha) y vegetación secundaria arbustiva de bosque de táscale (16,172 ha; INEGI, 2021a).

Revisión bibliográfica

Se analizaron las publicaciones originales de cada taxón, así como las revisiones taxonómicas y monográficas que hay sobre este complejo de especies (Berger, 1915; García-Mendoza y Chiang, 2003; García-Mendoza *et al.*, 2022; Gentry, 1982), además se consultó vía internet la base de datos Tropicos.org (2024) del Missouri Botanical Garden. En la definición del complejo *A.*

angustifolia, se tomaron en cuenta los criterios propuestos por Gentry (1982) y retomados por Rivera-Lugo *et al.* (2018). Bajo esta delimitación se reconocieron para Guerrero los siguientes taxones silvestres y cultivados para la producción de mezcal: *Agave angustifolia* Haw. var. *angustifolia*, *Agave angustifolia* var. *rubescens* (Salm-Dyck) Gentry y *Agave rhodacantha* Trel. Durante los recorridos se observaron plantaciones de *A. tequilana* F.A.C. Weber y maguey espadín oaxaqueño (*Agave angustifolia* 'espaldín'), provenientes de los estados de Oaxaca, Guanajuato y Morelos que son usadas para la producción de mezcal. Sin embargo, dada la carencia de ejemplares maduros, dichos taxones fueron excluidos de la presente investigación.

Trabajo de campo y gabinete

Entre agosto de 2016 y marzo de 2023, se realizaron 28 salidas de campo, recolectando un total de 172 ejemplares silvestres y cultivados. Se seleccionaron ejemplares adultos procedentes de diversas localidades y climas, buscando la representatividad de la diversidad de las poblaciones y cultivos de cada taxón analizado. Los ejemplares se recolectaron en 10 municipios y 37 localidades de la región norte, así como en un municipio y una localidad de la región centro de Guerrero (Apéndice 1). Mediante el uso de claves especializadas de identificación (García-Mendoza, 2011; Gentry, 1982) y la comparación con especímenes de los herbarios de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, México, Ciudad de México (ENCB; Thiers, 2024) y el Herbario de la Universidad Nacional Autónoma de México, México, Ciudad de México (MEXU; Thiers, 2024), se identificaron taxonómicamente 106 ejemplares de *A. angustifolia* var. *angustifolia* (61.6%, Figura 2a), 41 ejemplares de *A. angustifolia* var. *rubescens* (23.9%, Figura 2b) y 25 ejemplares de *A. rhodacantha* (14.5%; Figura 2c; Apéndice 1), los cuales fueron depositados en los herbarios Jardín botánico de la Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo (UAGC, Thiers, 2024), ENCB y MEXU.



Figura 2. Ejemplares del complejo *Agave angustifolia*. a) *Agave angustifolia* var. *angustifolia*, Chilacachapa, b) *Agave angustifolia* var. *rubescens*, Mexquitlán y c) *Agave rhodacantha*, San Martín Pachivia.

Figure 2. Specimens of the *Agave angustifolia* complex. a) *Agave angustifolia* var. *angustifolia*, Chilacachapa, b) *Agave angustifolia* var. *rubescens*, Mexquitlán and c) *Agave rhodacantha*, San Martín Pachivia.

De cada ejemplar se tomaron 18 caracteres morfométricos y fenotípicos de tipo vegetativo (Apéndice 2). En campo, se midieron la altura y el diámetro de la roseta, así como la longitud de la hoja. Además, se recopilaron datos sobre el número de hojas por planta, el número de dientes en un lado del margen de la hoja, la forma, el color y la glausencia de la hoja, y la forma de los dientes laterales, registrándose los datos en una base de datos en el software Microsoft Excel®. Para el resto de las mediciones de los caracteres se empleó una modificación de la metodología propuesta por Serafin-Higuera *et al.* (2022) recolectándose tres hojas de cada ejemplar, a las cuales se les tomaron dos fotografías por hoja con una cámara digital Realme modelo RMX3741 de 200 megápxeles, con apertura f/1.7 y estabilización óptica de imagen (OIS), a una distancia de 1.20 cm entre la hoja y el trípode de la cámara, sin ningún acercamiento. Adicionalmente, se colocó una regla de aluminio de 30 cm marca Jands para contar con una escala de referencia. El procesamiento de las fotografías para obtener las medidas de cada carácter se realizó utilizando

el software libre ImageJ versión 1.46 r (Ferreira y Rasband, 2012), registrándose el promedio de tres mediciones por carácter por ejemplar en la base de datos de Microsoft Excel®.

Adicionalmente, a cada ejemplar se le tomaron datos como la altitud a la que se encontraba, tipo de vegetación contigua y los usos dados a cada taxón. Se excluyeron los caracteres florales ya que fueron pocos los ejemplares que se encontraban en floración, dado que la práctica para la cosecha de agaves mezcaleros consiste en el corte del pedúnculo floral (capado) antes de su maduración, con la finalidad de que el tallo concentre los azúcares y con ello, tener mejores rendimientos en la producción de mezcal (Barrera-Cobos *et al.*, 2023).

Análisis estadístico

Con las mediciones de los 18 caracteres de los 172 ejemplares recolectados, se creó una base de datos con 3,096 registros en el software Microsoft Excel®. Además, se incluyó la altitud sobre el nivel del mar de cada ejemplar y su nombre científico.

El análisis estadístico se realizó con el programa estadístico R (R Core Team, 2020). Se verificó la normalidad multivariada con el estadístico de Royston implementado en el paquete *MVN* (Korkmaz *et al.*, 2014), la homogeneidad de las matrices de covarianzas en los grupos con la prueba Box M implementada en la función *boxM* del paquete *biotools* (da Silva, 2021), y la multicolinealidad con los factores de inflación de varianzas implementados en la función *vif* del paquete *car* (Fox y Weisberg, 2019). Los resultados de estas pruebas fundamentaron el empleo del Análisis de Componentes Principales (ACP) y el Análisis Discriminante Lineal (ADL), los cuales han sido empleados por otros autores para el género *Agave* (Barrientos-Rivera *et al.*, 2019; Colunga-GarcíaMarín *et al.*, 1996; Figueiredo-Urbina *et al.*, 2021; Fragoso-Gadea *et al.*, 2021; Rivera-Lugo *et al.*, 2018; Rodríguez-Garay *et al.*, 2009; Trejo *et al.*, 2018). En el ADL y el ACP se incluyeron los datos de los 172 ejemplares. Los dos análisis estadísticos se basaron en la matriz de correlaciones debido a la notable diferencia entre las varianzas de los caracteres estudiados. Un paso necesario en el análisis estadístico fue seleccionar los caracteres más importantes que faciliten la identificación de los taxones. En el ADL la selección de caracteres se realizó con la función *eleaps* del paquete *subselect* (Orestes Cerdeira *et al.*, 2017), considerando los catorce caracteres cuantitativos y la altura sobre el nivel del mar. En este proceso se descartaron seis caracteres, los cuales fueron: diámetro de la roseta, longitud de la hoja, ancho en la base de la hoja, longitud de los dientes a la mitad de la hoja, distancia entre dientes y altura sobre el nivel del mar. Los caracteres usados en el ADL se muestran en la Tabla 1. Estos no mostraron distribución multivariada (Royston, $p < 0.001$), tampoco homogeneidad de las matrices de covarianzas en los grupos ($c^2(90) = 198.56$, $p < 0.001$) y no hubo evidencia de multicolinealidad (máximo de los nueve *vif* igual a 2.0). Lo anterior puede indicar que se debería usar un análisis discriminante cuadrático; sin embargo, se usó el análisis discriminante lineal por tres razones 1) es más fácil de entender, 2) dio resultados similares en la predicción de los ejemplares y 3) el análisis discriminante es bastante robusto a las violaciones de los supuestos de normalidad multivariada y homogeneidad de las matrices de covarianzas en los grupos (Backhaus *et al.*, 2023). Con excepción del largo de la base de la espina terminal y del ancho de la espina terminal las medias de los otros siete caracteres de los tres taxones no fueron estadísticamente iguales (Kruskal-Wallis, $p < 0.001$). Para el ACP, además de los caracteres seleccionados en el ADL, se usaron tres caracteres cualitativos a los cuales se les asignaron los siguientes valores: forma de las hojas (linear 1, lanceolada o linear lanceolada 3), color de la hoja (verde a glauco 1, verde a verde amarillo 3 y verde limón 5) y forma de los dientes laterales (rectos 1, antrorsos 3 y curvados 5, Tabla 3).

RESULTADOS

Análisis Discriminante Lineal

El ADL, con las dos funciones discriminantes lineales, permitió clasificar correctamente un 84.3% de todos los ejemplares. Además, se clasificó adecuadamente un 89.6% de *A. angustifolia* var. *angustifolia*, el 63.4% de *A. angustifolia* var. *rubescens* y el 96.0% de *A. rhodacantha*. En el ADL se observó que *A. angustifolia* var. *angustifolia* presenta problemas de clasificación en los

grupos definidos *a priori*, superponiéndose con el grupo de *A. angustifolia* var. *rubescens* por los caracteres altura de roseta, diámetro de roseta, número de hojas por planta y longitud de la hoja. La primera función discriminante lineal explica el 91.7% de la varianza total de los datos. En esta función discriminante lineal los caracteres más importantes fueron: número de hojas por planta y ancho mayor de la hoja. Ambos caracteres tienen un fuerte efecto positivo con la primera función discriminante lineal (Tabla 1). La segunda función discriminante lineal explica el 8.3% de la varianza total de los datos. En esta función discriminante lineal los caracteres más importantes fueron: distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano, el ancho de la espina terminal y el número de dientes en un lado del margen de la hoja. El primer carácter tiene un fuerte efecto negativo con la segunda función discriminante lineal y los otros un fuerte efecto positivo (Tabla 1).

Tabla 1. Coeficientes de los nueve caracteres en las dos funciones discriminantes.**Table 1.** Coefficients of the nine characters in the two discriminant functions.

| Caracteres | DL1 | DL2 |
|---|--------------|---------------|
| Altura de la roseta | 0.258 | -0.133 |
| Número de hojas por planta | 1.344 | -0.277 |
| Ancho mayor de la hoja | 0.478 | 0.120 |
| Distancia de la base a la parte más ancha de la hoja | -0.082 | -0.053 |
| Número de dientes en un lado del margen de la hoja | 0.150 | 0.545 |
| Ancho de los dientes a la mitad de la hoja | 0.092 | -0.205 |
| Largo espina terminal | -0.102 | -0.026 |
| Ancho de la espina terminal | -0.130 | 0.635 |
| Distancia de la espina terminal al diente más cercano | -0.180 | -0.925 |

DL1: función discriminante lineal 1, DL2: función discriminante lineal 2.

Al analizar los valores de cada individuo con respecto a las dos funciones discriminantes, se obtuvo una gráfica de dispersión fenotípica, donde se observó el agrupamiento de los ejemplares de los tres taxones analizados (Figura 3).

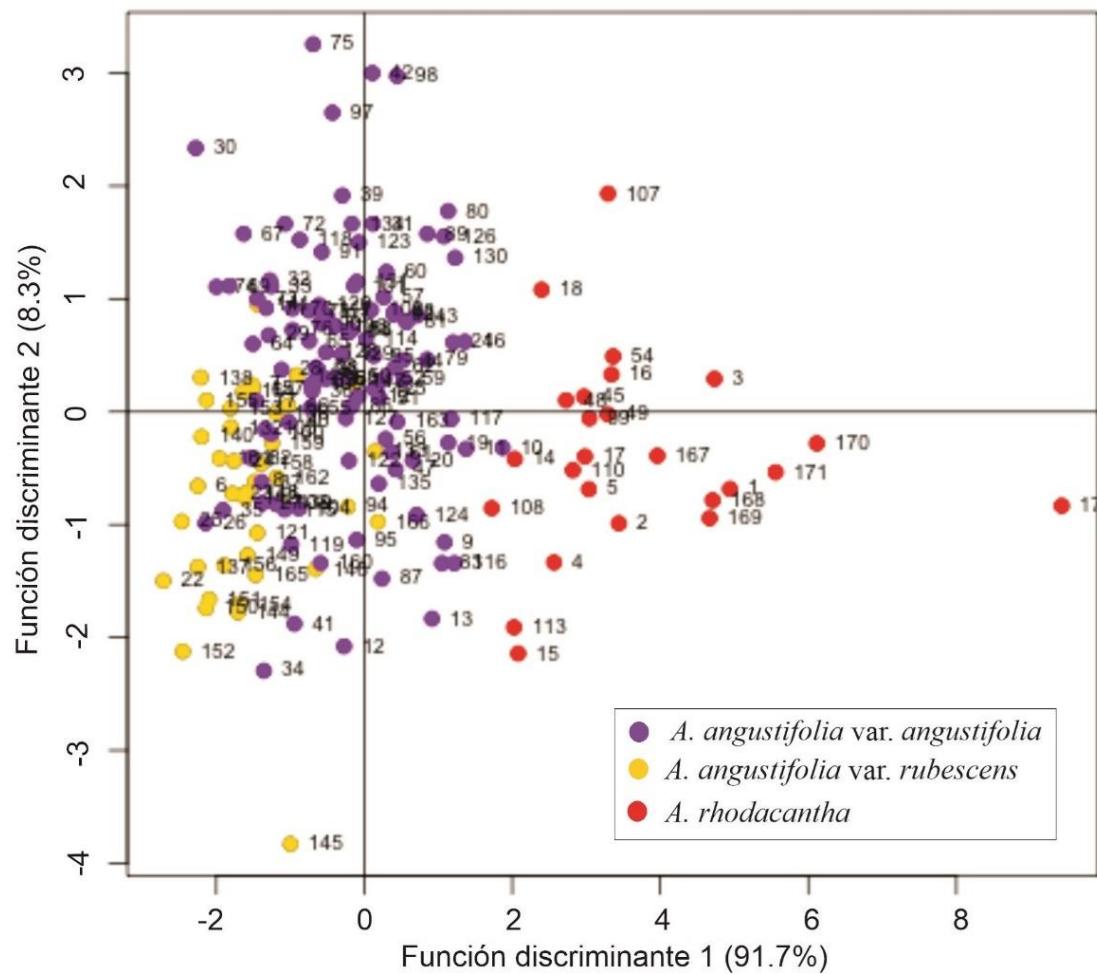


Figura 3. Dispersión de los datos con dos funciones discriminantes de las tendencias fenotípicas de los taxones del complejo *Agave angustifolia*.

Figure 3. Dispersion of the data with two discriminant functions of the phenotypic trends of the taxa of the *Agave angustifolia* complex.

La primera función discriminante (eje X) separó *A. rhodacantha* de *A. angustifolia* var. *rubescens* y de *A. angustifolia* var. *angustifolia* ya que *A. rhodacantha* tiene valores mayores en el número de hojas por planta ([min – máx] 100–270, $\bar{X}=131.4$) y ancho mayor de la hoja (4.8–10.3, $\bar{X}=7.7$ cm), en comparación con *A. angustifolia* var. *angustifolia* (27–10, $\bar{X}=57.7$ número de hojas y 2.0–9.2, $\bar{X}=5.1$ cm ancho mayor) y *A. angustifolia* var. *rubescens* (14–72, $\bar{X}=37.8$ número de hojas y 1.9–8.0, $\bar{X}=4.3$ cm ancho mayor). La segunda función discriminante (eje Y) muestra traslape de los tres taxones con valores mayores de *A. angustifolia* var. *angustifolia*, seguidos de *A. rhodacantha* y menores de *A. angustifolia* var. *rubescens*. Esto se debe a que en el carácter distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano tiene un fuerte efecto negativo en esta función discriminante el taxón *A. angustifolia* var. *angustifolia* con valores menores (1.0–13.2, $\bar{X}=5.4$ cm) comparados con *A. angustifolia* var. *rubescens* (2.5–16.5, $\bar{X}=7.9$ cm) y *A. rhodacantha* (1.2–11.8, $\bar{X}=6.2$ cm). Además, para el carácter ancho de la espina terminal que tiene un fuerte efecto positivo en esta función discriminante el taxón *A. angustifolia* var. *angustifolia* tiene los valores mayores (0.2–1.2, $\bar{X}=0.6$ cm) comparados con *A. angustifolia* var. *rubescens* (0.2–1.0, $\bar{X}=0.5$ cm) y *A. rhodacantha* (0.3–0.8, $\bar{X}=0.5$ cm).

Análisis de Componentes Principales

Con cuatro componentes principales se explicó un 72.8% de la variación en los datos. La varianza, desviación estándar, proporción de la varianza y proporción de la varianza acumulada de los primeros nueve componentes principales se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Componentes principales y su proporción de varianza explicada con el empleo de doce caracteres.

Table 2. Principal components and their proportion of variance explained with the use of twelve characters.

| Componente | Varianza | Desviación estándar | Proporción de la varianza | Proporción acumulada |
|------------|----------|---------------------|---------------------------|----------------------|
| CP1 | 4.10 | 2.02 | 34.13 | 34.13 |
| CP2 | 1.94 | 1.39 | 16.14 | 50.27 |
| CP3 | 1.55 | 1.24 | 12.88 | 63.15 |
| CP4 | 1.16 | 1.08 | 9.69 | 72.84 |
| CP5 | 0.85 | 0.92 | 7.08 | 79.92 |
| CP6 | 0.63 | 0.79 | 5.21 | 85.13 |
| CP7 | 0.48 | 0.69 | 4.01 | 89.14 |
| CP8 | 0.43 | 0.66 | 3.55 | 92.69 |
| CP9 | 0.35 | 0.59 | 2.94 | 95.64 |

El primer Componente Principal (CP) explica el 34.1% de toda la varianza (Figura 4), los caracteres con mayor contribución en este componente son: color de la hoja, altura de la roseta, número de hojas por planta, ancho mayor de la hoja, número de dientes en un lado del margen de la hoja y ancho de los dientes a la mitad de la hoja (Tabla 3). El primer carácter está correlacionado negativamente con este componente principal y los otros caracteres están correlacionados positivamente.

El segundo componente explica el 16.1% de toda la varianza (Figura 4) y los caracteres con mayor contribución son la distancia de la espina terminal al diente más cercano, forma de las hojas, largo de la espina terminal y color de la hoja (Tabla 3). El segundo carácter está correlacionado negativamente con este componente principal y los otros tres positivamente.

Tabla 3. Cargas de los componentes principales de los datos de los ejemplares estudiados.

Table 3. Loadings of the data's principal components of the studied specimens.

| Caracteres | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Altura de la roseta | 0.38 | 0.13 | 0.11 | 0.17 |
| Número de hojas por planta | 0.38 | -0.10 | 0.23 | -0.10 |
| Ancho mayor de la hoja | 0.38 | 0.10 | 0.02 | -0.19 |
| Distancia de la base a la parte más ancha de la hoja | 0.29 | 0.27 | -0.08 | 0.35 |
| Número de dientes en un lado del margen de la hoja | 0.31 | 0.00 | -0.04 | 0.55 |
| Ancho de los dientes a la mitad de la hoja | 0.30 | 0.07 | -0.05 | -0.57 |
| Largo espina terminal | 0.09 | 0.35 | -0.42 | 0.05 |
| Ancho de la espina terminal | 0.12 | 0.25 | -0.53 | -0.35 |
| Distancia de la espina terminal al diente más cercano | 0.01 | 0.54 | -0.02 | 0.14 |
| Forma de las hojas | 0.28 | -0.47 | -0.35 | 0.08 |
| Color de la hoja | -0.40 | 0.33 | 0.01 | 0.02 |
| Forma dientes laterales | 0.20 | 0.27 | 0.59 | -0.18 |

Tomando en cuenta los dos primeros componentes principales, que acumulan el 50.27% de toda la varianza, se analizó la dispersión y las tendencias fenotípicas de los taxones examinados en el sistema de coordenadas definido por los dos CP (Figura 4). En el CP1 hay ligero traslape de los tres taxones, pero se diferencia claramente a la izquierda el grupo de *A. angustifolia* var. *rubescens* con valores menores del CP1, (color de hojas verde limón y altura de roseta 70.0-162.0, $\bar{X}=113.6$ cm); al centro esta el taxón *A. angustifolia* var. *angustifolia* (con color de hojas verde amarillo y altura de roseta 45.0-178.9, $\bar{X}=123.8$ cm); y a la derecha sobreponiéndose con el anterior taxón se encuentra *A. rhodacantha*, con valores mayores del CP1 (color de hojas verde a glauco y altura de roseta 135.3-249.0, $\bar{X}=168.81$ cm).

En el CP2 existe un traslape de los tres taxones. En la parte inferior, es decir con valores menores del CP2, están los ejemplares de *A. angustifolia* var. *angustifolia* (con una distancia de la espina terminal al diente más cercano de 1.0-13.1, $\bar{X}=5.4$ cm y forma de la hoja lanceolada o linear lanceolada), al centro se encuentra el grupo de *A. rhodacantha* con valores intermedios de los caracteres más importantes del CP2 (distancia de la espina terminal al diente más cercano 1.1-11.8, $\bar{X}=6.1$ cm y forma de la hoja lanceolada o linear lanceolada) y en la parte superior, es decir con valores mayores del CP2, el taxón *A. angustifolia* var. *rubescens* (distancia de la espina terminal al diente más cercano 2.5-16.4, $\bar{X}=7.9$ cm y forma de la hoja linear).

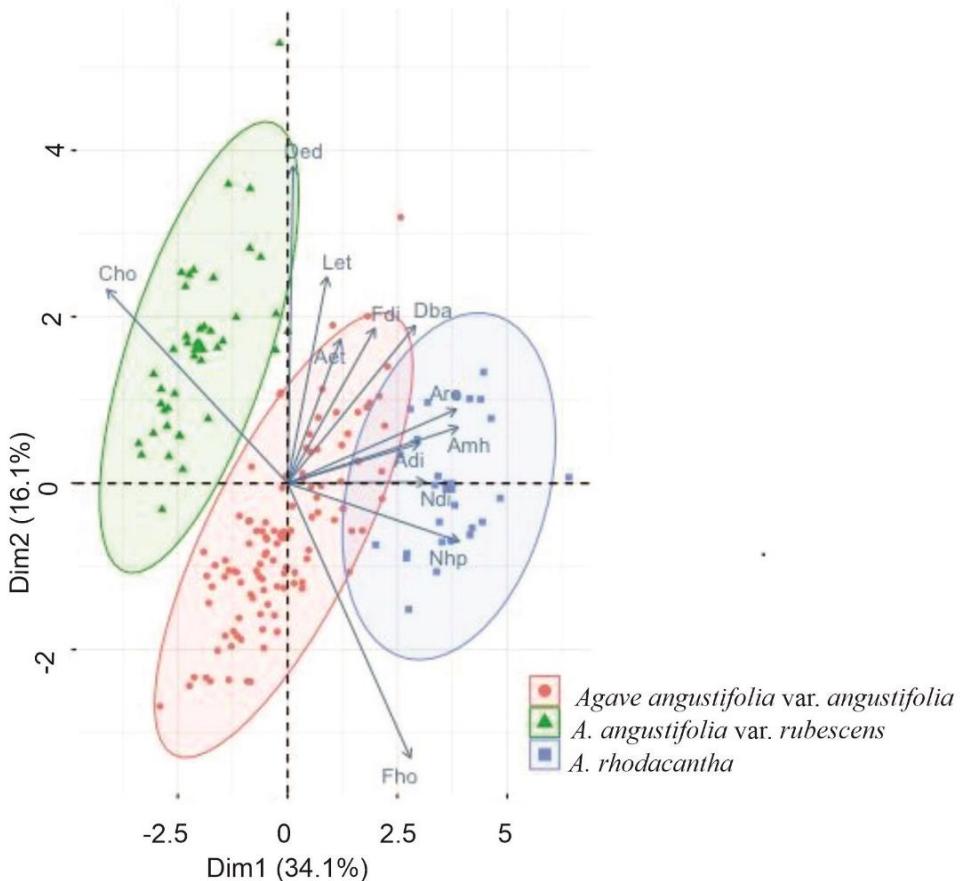


Figura 4. Dispersion de los datos en los dos primeros CP y tendencias fenotípicas de los taxones del complejo *Agave angustifolia*.

Figure 4. Dispersion of data in the first two PCs and phenotypic trends of the taxa of the *Agave angustifolia* complex.

DISCUSIÓN

Este estudio permitió identificar y confirmar la presencia de tres taxones del complejo *Agave angustifolia* silvestres y cultivados en la región norte de Guerrero, los cuales son: *A. angustifolia* var. *angustifolia*, *A. angustifolia* var. *rubescens* y *A. rhodacantha*, siendo esta última especie un nuevo registro para el estado de Guerrero. Al analizar el número de localidades en las cuales se encuentran estos taxones y el número de individuos de sus poblaciones, se observó que *A. angustifolia* var. *angustifolia* es el taxón más frecuente (presente en 25 localidades), encontrándose de manera silvestre y cultivado para la producción de mezcal, información que coincide con lo informado por (Barrientos-Rivera *et al.*, 2019), quienes mencionaron que esta especie presenta la mayor distribución del género. *Agave angustifolia* var. *rubescens* se encontró silvestre en 13 localidades y cultivado en una localidad. Su menor presencia puede deberse a lo restringido de sus poblaciones, además de ser una especie endémica de los estados de Guerrero, Jalisco y Oaxaca (García-Mendoza, 2011). Por el contrario, *Agave rhodacantha* fue el taxón más escaso, presente en cuatro localidades de forma cultivada para mezcal y en una silvestre; al respecto, García-Mendoza (2011) señaló lo escaso de ejemplares de herbario para su caracterización.

El ADL separó de manera clara (84.3% de discriminación) los tres taxones estudiados, con dos funciones discriminantes utilizando nueve caracteres; los que más información aportaron a la discriminación de los grupos fueron el número de hojas por planta y ancho mayor de la hoja, donde *A. rhodacantha* presentó los mayores valores (más de 100 hojas por planta y 7.7 cm de ancho mayor de hoja), *A. angustifolia* var. *angustifolia* mostró valores intermedios de estos caracteres y *A. angustifolia* var. *rubescens* presentó los valores más bajos de estos caracteres (37 hojas y 4.2 cm de ancho mayor de hoja). Los caracteres de la distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano, el ancho de la espina terminal y el número de dientes en un lado del margen de la hoja, permitieron complementar la separación de estos taxones. Estos resultados coinciden con trabajos similares como el realizado por Rivera-Lugo *et al.* (2018), quienes mencionaron que el análisis discriminante canónico demostró ser más útil para el complejo *A. angustifolia*, ya que con dos funciones explicaron el 80% de la varianza; además, señalaron que los caracteres número de dientes, largo y ancho de la espina terminal (los cuales también se emplearon en esta investigación), junto con el largo de bráctea, largo de la antera y proporción de semillas maduras, pueden ayudar a la separación de estos taxones. Figueredo-Urbina *et al.* (2021), en su estudio sobre diversidad morfológica y genética de magueyes en Hidalgo, mencionaron que con dos funciones discriminantes se explicaba el 96.03% de la varianza de los ejemplares estudiados, donde las funciones con los valores más altos estaban asociadas a la longitud de las hojas y la morfometría de la dentición. Por otra parte, Fragoso-Gadea *et al.* (2021) mencionaron que el análisis discriminante canónico permitió separar tres poblaciones de *A. angustifolia* de Sonora con dos funciones discriminantes y un 100% de discriminación, aunque las principales variables analizadas fueron diferentes (tono y saturación de color foliar y el grado de desarrollo de la inflorescencia), por lo cual es importante complementar este tipo de análisis con caracteres florales, situación que debe ser socializada con los productores de agave para que permitan la floración de ejemplares dentro de sus plantaciones y de las poblaciones silvestres (magueyeras).

En el ACP del presente estudio se requirió de al menos cuatro componentes para explicar el 72.8% de toda la varianza y el primer componente explicó el 34.13% del total de esta, requiriéndose 12 caracteres para obtener este porcentaje de varianza explicada, siendo los más importantes el color de la hoja, altura de roseta, número de hojas por planta, ancho mayor de la hoja y el número de dientes por un lado de la hoja. Rodríguez-Garay *et al.* (2009), en su estudio sobre diversidad morfológica y molecular de *Agave tequilana* Weber y *Agave angustifolia* var. *lineño* Rodríguez, utilizaron 13 variables y con tres componentes principales explicaron el 79. 9% de la variabilidad total y el componente uno explicó el 61.13%; las variables de mayor peso fueron: distancia entre la última espina laterales y apical, ancho de la hoja, número de hojas de la roseta (caracteres que también fueron utilizados en la presente investigación), así como el largo y ancho de dientes y número de dientes en 10 cm. Estos autores concluyeron que existe una variación morfológica intraespecífica más amplia en *A. angustifolia* que en *A. tequilana*, similar a lo encontrado en esta investigación para *A. angustifolia* var. *angustifolia* tanto en el número de

hojas, el ancho mayor de la hoja y el número de dientes por un lado de la hoja, cuyos valores mínimos pueden ser similares a los encontrados en *A. angustifolia* var. *rubescens* mientras que los valores máximos pueden ser similares a los de *A. rhodacantha*. Al respecto Rivera Lugo (2014), al realizar el análisis del complejo *A. angustifolia* en Oaxaca, utilizó ocho CP para explicar un 79.5% de la varianza y el primer CP solo explicó el 21% de la variación, utilizando caracteres como el número de hojas y número de dientes los cuales también fueron empleados en la presente investigación, además de incluir caracteres de la flor y los frutos (los cuales no se analizaron en la presente investigación), aunque empleó un menor número de ejemplares para su análisis (46). Barrientos-Rivera *et al.* (2019), en su estudio sobre la caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, analizaron 47 ejemplares de *A. angustifolia* (sacatoro), 10 ejemplares de *A. angustifolia* (espadín) y 10 ejemplares de *Agave cupreata* Trel & Berger (papalote), además dos localidades estudiadas por estos autores coincidieron con las analizadas en la presente investigación (Atetetla y Coacán). Al realizar el ACP utilizaron 20 variables y con seis componentes explicaron el 79% de la variación total en los datos; el componente uno aportó el 29.8% de la variación total y estuvo determinado principalmente por las variables forma, borde, color de la hoja y la longitud de la espina terminal, mientras el CP2 estuvo determinado por la uniformidad y el número de espinas terminales, resultados similares a lo encontrado en el presente estudio. Por último, Fragoso-Gadea *et al.* (2021) en su ACP para tres poblaciones de *A. angustifolia* de Sonora, utilizaron 29 variables y con cuatro componentes principales explicaron el 51.9% de la varianza de los datos. Sin embargo, los caracteres analizados por estos autores difieren de los utilizados en esta investigación, ya que emplearon como principales caracteres los grados brix (concentración de solutos presente en la sabia del tallo de cada ejemplar), relación peso seco/preso fresco del tallo y el grado de desarrollo de la inflorescencia.

Un factor limitante que afecta la correcta definición de los grupos tiene que ver con la escasez de ejemplares de *A. rhodacantha*, situación similar a la registrada por Rivera-Lugo *et al.* (2018), lo cual se debe en parte a lo fragmentado de la distribución y la escasez de individuos y poblaciones. En Guerrero, esta especie es muy apreciada y demandada para la producción de mezcal, conocido como ‘de pedregal’, en alusión a que crece en terrenos con rocas de tipo caliza. Además, destaca por el gran tamaño de su piña o tallo, que puede llegar a pesar hasta 150 kg, los altos rendimientos de mezcal obtenido y su sabor distintivo. Para ello, se corta el pedúnculo floral, lo que permite que los azúcares se concentren en el tallo, impidiendo así la formación de flores, frutos y semillas. Esta especie se encontró creciendo en la selva baja caducifolia y bosque de táscale, en altitudes comprendidas entre 943 a 1,754 m. Florece en los meses de mayo a julio y fructifica entre septiembre y noviembre. Estos datos coinciden parcialmente con lo informado por García-Mendoza (2011), quien mencionó que este taxón se le encuentra en el valle de Tehuacán – Cuicatlán en el bosque tropical caducifolio y matorral xerófilo entre los 1,780 y 2,080 m, florece de junio a julio y fructifica de septiembre a noviembre. Contrasta con lo informado por García-Mendoza *et al.* (2022) para ejemplares del estado de Sonora, donde se le encuentra en la selva baja caducifolia y matorral espinoso en altitudes comprendidas entre 200 a 700 m, florece en los meses de febrero a abril y fructifica en el mes de julio, estas diferencias se pueden deber en parte a los tipos de climas y los patrones de lluvias presentes en cada lugar (Williams-Linera y Meave del Castillo, 2002).

Hasta antes de este estudio, *Agave rhodacantha* solo se había encontrado en Sonora, Sinaloa, Nayarit, Jalisco, Durango y Oaxaca (Gentry, 1982; González-Elizondo *et al.*, 2009; Rivera Lugo, 2014; Vargas-Ponce *et al.*, 2009). Como resultado de este trabajo se citan ejemplares de cinco localidades de esta especie para Guerrero, por lo que es necesario garantizar su conservación a través de la implementación de programas de manejo forestal no maderable y propagación de individuos obtenidos por semilla, para garantizar su adecuado manejo a corto plazo.

Los análisis realizados en este trabajo confirmaron que *A. angustifolia* var. *angustifolia* es un taxón con alta variabilidad fenotípica, lo cual está relacionado con las condiciones edafoclimáticas y agroecológicas donde crecen y a la altitud a la que se encuentran (Barrientos-Rivera *et al.*, 2019; Fragoso-Gadea *et al.*, 2021; Rodríguez-Garay *et al.*, 2009). En la distribución se observaron ejemplares de tallas grandes (altura de roseta 178 cm, diámetro de roseta 344 cm) muy similares a *A. rhodacantha* que se encontraron principalmente en las plantaciones mezcaleras de Huitzuco, San Martín Pachivía y Tehuixtla; donde se puede inferir un proceso de

selección de características específicas por parte de los productores mezcaleros, similar al caso de las plantaciones de *A. angustifolia* y *A. rhodacantha* del Estado de Jalisco (Vargas-Ponce *et al.*, 2009). Por otra parte, también se observaron ejemplares de tallas pequeñas de *A. angustifolia* var. *angustifolia* (altura de roseta 45 cm, diámetro de roseta 62 cm) que se localizaron en sitios con poblaciones silvestres (localidades de los Municipios Teloloapan y Tetipac), donde tienen un manejo incipiente por las poblaciones humanas. El rango de altitud a la que se encontraron ejemplares de este taxón va de los 664 a 2,422 m, frecuentemente a los 1,300 m, su hábitat es la selva baja caducifolia, matorral xerófilo, pastizal inducido bosque de pino encino y bosque de táscate; florece en los meses de mayo a julio y fructifica en los meses de agosto a noviembre, información que coincide con lo informado por García-Mendoza (2011) sobre su rango altitudinal, hábitat y fenología para ejemplares estudiados en el Valle de Tehuacán – Cuicatlán. *A. angustifolia* var. *rubescens* también presenta una alta variabilidad fenotípica, lo cual puede explicarse en parte, a que habita lugares más cálidos de los municipios Iguala de la Independencia y Atenango del Río y en climas semicálidos (temperatura media anual entre 26 a 28 °C). Otros factores clave tienen que ver con su hábitat y su fenología. García-Mendoza (2011) mencionó que este taxón crece en el bosque tropical caducifolio, en elevaciones de 900 a 1,500 msnm, la floración se da de junio a agosto y la fructificación de agosto a noviembre. Sin embargo, en los ejemplares analizados en este estudio, se observó que estos crecen en altitudes de 664 a 1,679 m, la floración abarca desde septiembre hasta diciembre y la fructificación de diciembre a febrero, información que amplía el rango de tolerancia de la especie en función de las condiciones edafoclimáticas (Williams-Linera y Meave del Castillo, 2002) y agroecológicas de cada lugar. Por lo que, para estudios futuros, se sugiere el análisis de todas estas variables, así como de los estudios genéticos, los cuales permitirán definir si se trata de uno o más taxones.

Dada la importancia económica, ambiental y cultural que el complejo *A. angustifolia* tiene en el estado de Guerrero, es fundamental complementar estos estudios morfométricos, con trabajos relacionados con la agroecología y usos bioculturales, con la finalidad de proponer sistemas productivos que privilegien la diversidad genética, biológica y cultural de las especies.

Clave para identificar los taxones del complejo *A. angustifolia* en la región norte de Guerrero

1. Roseta 1.3-2.5 m altura, diámetro 1.7-3.4 m; más de 100 hojas por planta ;88.0-156.0 x 4.8-10.3 cm, glaucas o verdes*A. rhodacantha*.
1. Roseta 0.4-1.7 m altura, diámetro 0.6-3.4 m; 37-90 hojas por planta, 60.0-90.0 x 3.0-6.0 cm, verde a verde-amarillentas2.
2. Hojas 1.5-4.2 cm ancho en la parte media, lineares, margen con dientes 0.5-3.0 mm largo, distantes entre sí 1.0-2.5 cm a la mitad de la hoja, distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano 2.5 a 16.4 cm.....*A. angustifolia* var. *rubescens*.
2. Hojas 4.0-6.0 cm ancho en la parte media, lanceoladas, margen con dientes 3.0-5.0 mm largo, distantes entre sí 2.0-3.5 cm a la mitad de la hoja, distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano 1.0 a 13.8 cm.....*A. angustifolia* var. *angustifolia*.

CONCLUSIONES

Con técnicas morfométricas se caracterizaron individuos de poblaciones del complejo *A. angustifolia*, que en la región norte de Guerrero está representado por *A. angustifolia* var. *angustifolia*, *A. angustifolia* var. *rubescens* y *A. rhodacantha* siendo esta última especie un nuevo registro para Guerrero. Los caracteres: color de la hoja, altura de roseta, número de hojas por planta, ancho mayor de la hoja, número de dientes en un lado del margen de la hoja, distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano y ancho de la espina terminal, son útiles para la separación de los taxones del complejo *A. angustifolia*. Estos caracteres pueden ser utilizados por productores, técnicos y académicos en los trabajos de identificación de los agaves, un requisito necesario para el proceso de certificación del agave-mezcal y con ello dar valor agregado a sus productos. El ADL es una herramienta útil para el análisis de las poblaciones del complejo *A. angustifolia*.

Dada la escasez de ejemplares de *A. rhodacantha*, así como la importancia económica y cultural que tiene para los productores de mezcal, es necesario realizar estudios y planes de manejo para

el cultivo de la planta que permitan garantizar la conservación, propagación por semilla y manejo de las poblaciones silvestres y plantaciones de esta especie. Este tipo de estudios debe complementarse con información edafoclimática, gradientes altitudinales, así como datos agroecológicos y genéticos.

AGRADECIMIENTOS

A las comunidades magueyeras y mezcaleras de Guerrero por las facilidades dadas para la realización y conocimientos aportados para este estudio. Agradecemos a los maestros mezcaleros de San Martín Pachivia, Cándido Calixto Giles y Alejandro Ocampo Cheno (fallecidos), por su apoyo en esta investigación, permitiendo el acceso a sus plantaciones de *A. rhodacantha* y compartiendo su conocimiento sobre la cultura del mezcal. Al CONAHCYT por el apoyo parcial económico otorgado a través del proyecto 263188 de SEMARNAT- CONAHCYT, así como por la beca número 413487 otorgada al primer autor. A los revisores anónimos por sus sugerencias que enriquecieron el escrito.

LITERATURA CITADA

- APG IV, Moore, M., Olmstead, R., Perret, M., Skog, L., Smith, J., Tank, D., Vorontsova, M., & Weber, A. (2016). *An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV*. 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Backhaus, K., Erichson, B., Gensler, S., Weiber, R., & Weiber, T. (2023). *Multivariate analysis. An application oriented introduction* (Second edition, Vol. 10). Springer Books.
- Barrera-Cobos, S., Maimone-Celorio, M., Salomé- Castañeda, E., González-Canchola, A., y Herrera-Pérez, L. (2023). Análisis de la producción de mezcal en San Diego la mesa Tochimiltzingo, Puebla (reserva Sierra del Tentzo), México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 20(1), 66–91. <https://doi.org/10.22231/asyd.v19i4.1525>
- Barrientos-Rivera, G., Esparza-Ibarra, E. L., Segura-Pacheco, H. R., Talavera-Mendoza, O., Sampedro-Rosas, M. L., & Hernández-Castro, E. (2019). Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 655–668. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1554>
- Berger, A. (1915). Die Agaven. Beiträge zu einer Monographie. Mit 79 Abbildungen im Text und 2 Karten. *Die Agaven. Beiträge zu einer Monographie. Mit 79 Abbildungen im Text und 2 Karten, September*. <https://www.biodiversitylibrary.org/item/52969>
- Chase, M. W., Reveal, J. L., & Fay, M. F. (2009). A subfamilial classification for the expanded asparagalean families Amaryllidaceae, Asparagaceae and Xanthorrhoeaceae. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 132–136. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.2009.00999.x>
- Colunga-GarcíaMarín, P., Estrada-Loera, E., & May-Pat, F. (1996). Patterns of morphological variation, diversity, and domestication of wild and cultivated populations of *Agave* in Yucatan, Mexico. *American Journal of Botany*, 83(8), 1069–1082. <https://doi.org/10.2307/2445997>
- Colunga-GarcíaMarín, P., & May-Pat, F. (1997). Morphological variation of henequen (*Agave fourcroydes*, Agavaceae) germplasm and its wild ancestor (*A. angustifolia*) under uniform growth conditions: Diversity and domestication. *American Journal of Botany*, 84(11), 1449–1465. <https://doi.org/10.2307/2446608>
- da Silva, A. R. (2021). *biotools: Tools for Biometry and Applied Statistics in Agricultural Science. R package version 4.2*. <https://cran.r-project.org/package=biotools>
- Dahlgren, R. M., Clifford, H. T., & Yeo P. F. (1985). *The Families of the Monocotyledons. Structure, Evolution and Taxonomy* (Vol. 7). <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.1987.tb00937.x>
- Ferreira, T., & Rasband, W. (2012). *ImageJ User Guide, IJ 1.46r* (pp. 1–198). <https://imagej.net/ij/docs/guide/user-guide.pdf#page=10.36>

- Figueredo-Urbina, C. J., Álvarez-Ríos, G. D., García Montes, M. A., & Octavio Aguilar, P. (2021). Morphological and genetic diversity of traditional varieties of agave in Hidalgo State, Mexico. *PLoS ONE*, 16(7): e0254376. <https://doi.org/https://doi.org/10.1371/journal.pone.0254376>
- Flannery, K. V. (1986). *Guilá Naquitz, archaic foraging and early agriculture in Oaxaca, México*. Academic Press, Inc. <https://doi.org/10.4324/9781315427935>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R Companion to Applied Regression, Third edition*. Sage, Thousand Oaks CA. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>
- Fragoso-Gadea, T., Gutiérrez, A., Coronado, M. L., Terrazas, T., Ramos-Clamont, G., Vázquez-Moreno, L., Álvarez-Bajo, O., & Esqueda, M. (2021). Poblaciones silvestres de *Agave angustifolia* (Asparagaceae) de Sonora, México: variación morfológica y contenido de azúcares. *Acta Botanica Mexicana*, 128. <https://doi.org/10.21829/abm128.2021.1889>
- García-Mendoza. (2011). *Flora del Valle de Tehuacán-Cuicatlán, Agavaceae, Fascículo 88* (UNAM, Ed.). http://www.ibiologia.unam.mx/barra/publicaciones/floras_tehuacan/2012/F88_Agav.pdf
- García-Mendoza, A. J., Colunga-Garcia Marin, P., & Bye, R. (1993). Los usos del *Agave angustifolia* Haw., ancestro silvestre del henequén en su área de distribución geográfica. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 62(April 2015), 109–128. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4602.3200>
- García-Mendoza, A. J. (2004). Agaváceas. En A. J. García, M. J. Ordoñez, & M. Briones-Salas (Eds.), *Biodiversidad de Oaxaca* (pp. 159–169). Instituto de Biología. UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fund.
- García-Mendoza, A. J., & Chiang, F. (2003). The confusion of *Agave vivipara* L. and *A. angustifolia* Haw., two distinct taxa. *Brittonia*, 55, 82–87. <https://www.jstor.org/stable/3218419>
- García-Mendoza, A. J., Franco Martínez, I. S., & Sandoval Gutiérrez, D. (2022). El complejo taxonómico *Agave angustifolia*: restablecimiento y circunscripción del *Agave pacifica* en Sonora. En M. Esqueda, M. L. Coronado, A. Gutiérrez, & M. L. Robert (Eds.), *Ecología y biotecnología aplicadas al manejo sostenible del agave en Sonora* (pp. 15–34). Fontamara. <https://medium.com/@arifwicaksanaa/pengertian-use-case-a7e576e1b6bf>
- Gentry, H. S. (1982). *Agaves of Continental North American* (T. U. of A. Press, Ed.).
- Gil-Vega, K., Díaz, C., Nava-Cedillo, A., & Simpson, J. (2006). AFLP analysis of *Agave tequilana* varieties. *Plant Science*, 170(4), 904–909. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.12.014>
- González-Elizondo, M., Galván-Villanueva, R., López-Enriquez, I. L., Reséndiz-Rojas, L., & González Elizondo, M. S. (2009). *Agaves-magueyes, lechuguillas y noas-del Estado de Durango y sus alrededores*. CONABIO-Instituto Politécnico Nacional. <https://www.researchgate.net/publication/322243902>
- INEGI. (2001). *Conjunto de datos vectoriales Fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Provincias fisiográficas*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267575>
- INEGI. (2014). *Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional)*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/eda250s2gw>
- INEGI. (2020). *Climas y sus subproductos climáticos derivados*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825267568>
- INEGI. (2021a). *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII (continuo nacional)*. <http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/usv250s7gw>
- INEGI, (2021b). *Aspectos Geográficos, Guerrero*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_12.pdf
- Judd, W. S., Campbell, Ch. S., Kellogg, E. A., Stevens, P. F., & Donoghue, M. J. (2016). *Systematics: A Phylogenetic Approach. 4th ed* (4a edición). Sinauer Associates is an imprint of Oxford University Press.
- Kirchmayr, M., Arellano Plaza, Melchor, Estarrón Espinosa, M., & Gallardo Valdez, Juan, Gschaeidler Mathis, Anne Ch., López Ramírez, Julisa E., Navarro Hurtado, Alejandra, Prado Ramírez, Rogelio, Ramírez Romo, E. (2014). Manual para la estandarización de

Recibido:
4/junio/2024

Aceptado:
19/noviembre/2024

- los procesos de producción del mezcal guerrerense. En *Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C.* <https://centrosconacyt.mx/wp-content/uploads/2015/04/manualmezcalguerrerense.pdf>
- Korkmaz, S., Goksuluk, D., & Zararsiz, G. (2014). *MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality.* (pp. 151–162). The R Journal. <https://journal.r-project.org/archive/2014-2/korkmaz-goksuluk-zararsiz.pdf>
- Orestes Cerdeira, J., Duarte Silva, P., Cadima, J., & Minhoto, M. (2017). *Subselect: Selecting Variable Subsets. R package version 0.13.* <https://cran.r-project.org/package=subselect>.
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.* <https://www.R-project.org/>
- Rivera Lugo, M. (2014). *Variación morfológica y genética del complejo Agave angustifolia Haw., en el estado de Oaxaca* [Universidad Autónoma de México]. https://repositorio.unam.mx/contenidos/variacion-morfologica-y-genetica-del-complejo-agave-angustifolia-haw-en-el-estado-de-oaxaca-65883?c=1wwgnw&d=false&q=*&i=7&v=1&t=search_1&as=0
- Rivera-Lugo, M., García-Mendoza, A., Simpson, J., Solano, E., & Gil-Vega, K. (2018). Taxonomic implications of the morphological and genetic variation of cultivated and domesticated populations of the *Agave angustifolia* complex (Agavoideae, Asparagaceae) in Oaxaca, Mexico. *Plant Systematics and Evolution*, 304, 969–979. <https://doi.org/10.1007/s00606-018-1525-0>
- Rodríguez-Garay, B., Lomelí-Sención, J. A., Tapia-Campos, E., Gutiérrez-Mora, A., García-Galindo, J., Rodríguez-Domínguez, J. M., Urbina-López, D., & Vicente-Ramírez, I. (2009). Morphological and molecular diversity of *Agave tequilana* Weber var. Azul and *Agave angustifolia* Haw. var. *lineño*. *Industrial Crops and Products*, 29(1), 220–228. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.05.007>
- Serafin-Higuera, E. L., Antonio-Bautista, A., & Benavides-Mendoza, A. (2022). Morfología de *Dasylirion cedrosanum* y su correlación con imágenes en localidades del Sureste de Coahuila. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3198>
- Thiede, J. (2020). Agave Agavaceae. En U. Egli & R. Nyffeler (Eds.), *Illustrated handbook of succulent plants: Monocotyledons* (2nd ed., pp. 21–311). Springer-Verlag.
- Thiers B. (2024, octubre 2). *Index Herbariorum. NYBG Steere Herbarium.* <http://sweetgum.nybg.org/science/ih/>
- Trejo, L., Limones, V., Peña, G., Scheinvar, E., Vargas-Ponce, O., Zizumbo-Villarreal, D., & Colunga-GarcíaMarín, P. (2018). Genetic variation and relationships among agaves related to the production of Tequila and Mezcal in Jalisco. *Industrial Crops and Products*, 125, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.08.072>
- Tropicos.org. (2024, October 4). *Missouri Botanical Garden.* <http://www.tropicos.org>.
- Vargas-Ponce, O., Zizumbo-Villarreal, D., Martínez-Castillo, J., Coello-Coello, J., & Colunga-GarcíaMarín, P. (2009). Diversity and structure of landraces of agave grown for spirits under traditional agriculture: a comparison with wild populations of *A. Angustifolia* (Agavaceae) and commercial plantations of *A. tequilana*. *American Journal of Botany*, 96(2), 448–457. <https://doi.org/10.3732/ajb.0800176>
- Williams-Linera, G., & Meave del Castillo, J. A. (2002). Patrones fenológicos. En M. Guariguata & G. Kattan (Eds.), *Ecología y conservación de bosques neotropicales* (pp. 407–431). Editorial Libro Universitario Regional. https://www.researchgate.net/publication/281348224_Patrones_fenologicos#fullTextFileContent

Apéndice 1. Sitios de estudio y recolecta de ejemplares del complejo *Agave angustifolia*, en las regiones norte y centro de Guerrero. Colector Jorge Huerta Zavala.

Appendix 1. Study sites and collection of specimens of the *Agave angustifolia* complex, in the northern and central regions of Guerrero. Collector Jorge Huerta Zavala.

| No. | No. de colecta | Clave | Municipio | Localidad | Especie | msnm | Silvestre o cultivado |
|-----|----------------|-------------|-------------------------|------------------------|---|------|-----------------------|
| 1 | 6 | CoaRhoda1 | Atenango del Río | Coacan | <i>A. rhodacantha</i> | 943 | Cultivado |
| 2 | 7 | CoaRhoda2 | Atenango del Río | Coacan | <i>A. rhodacantha</i> | 943 | Cultivado |
| 3 | 8 | CoaRhoda3 | Atenango del Río | Coacan | <i>A. rhodacantha</i> | 943 | Cultivado |
| 4 | 9 | CoaRhoda4 | Atenango del Río | Coacan | <i>A. rhodacantha</i> | 943 | Cultivado |
| 5 | 10 | CoaRhoda5 | Atenango del Río | Coacan | <i>A. rhodacantha</i> | 943 | Cultivado |
| | | | | | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | | |
| 6 | 11 | CoaRub1 | Atenango del Río | Coacan - El Vado | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1041 | Silvestre |
| 7 | 12 | CoaRub2 | Atenango del Río | Coacan - El Vado | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1041 | Silvestre |
| 8 | 13 | CoaRub3 | Atenango del Río | Coacan - El Vado | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1041 | Silvestre |
| 9 | 14 | CoaAngus2 | Atenango del Río | Coacan -La Fábrica | <i>A. angustifolia</i> | 1008 | Cultivado |
| 10 | 15 | CoaAngus3 | Atenango del Río | Coacan -La Fábrica | <i>A. angustifolia</i> var. | 1008 | Cultivado |
| 11 | 16 | CoaAngus4 | Atenango del Río | Coacan -La Fábrica | <i>A. angustifolia</i> var. | 1008 | Cultivado |
| 12 | 17 | CoaAngus5 | Atenango del Río | Coacan -La Fábrica | <i>A. angustifolia</i> var. | 1008 | Cultivado |
| 13 | 18 | CoaAngus6 | Atenango del Río | Coacan -La Fábrica | <i>A. angustifolia</i> | 1008 | Cultivado |
| 14 | 19 | PachiRhoda1 | Ixcateopan de Cuauhémoc | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> | 1506 | Cultivado |
| 15 | 20 | PachiRhoda2 | Ixcateopan de Cuauhémoc | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> | 1506 | Cultivado |
| 16 | 21 | PachiRhoda3 | Ixcateopan de Cuauhémoc | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> | 1506 | Cultivado |
| 17 | 22 | PachiRhoda4 | Ixcateopan de Cuauhémoc | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> | 1506 | Cultivado |
| 18 | 23 | PachiRhoda5 | Cuauhémoc | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> | 1506 | Cultivado |
| 19 | 24 | PachiAngus1 | Teloloapan | Los Sabino | <i>A. angustifolia</i> var. | 1332 | Silvestre |
| 20 | 25 | PachiAngus2 | Teloloapan | Pachivia - Puente | <i>A. angustifolia</i> var. | 1332 | Silvestre |
| 21 | 26 | PachiAngus3 | Teloloapan | Los Sabino | <i>A. angustifolia</i> var. | 1332 | Silvestre |
| 22 | 35 | T-Rub 1 | Cuetzala del Progreso | Tianquizolco - Machito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1441 | Silvestre |
| 23 | 36 | T- Rub 2 | Cuetzala del Progreso | Tianquizolco - Machito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1441 | Silvestre |
| 24 | 37 | T- Rub 3 | Cuetzala del Progreso | Tianquizolco - Machito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1441 | Silvestre |
| 25 | 38 | T- Rub 4 | Cuetzala del Progreso | Tianquizolco - Machito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1441 | Silvestre |
| 26 | 50 | Mex1 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 745 | Silvestre |
| 27 | 51 | Mex2 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 745 | Silvestre |
| 28 | 52 | Mex3 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 745 | Silvestre |
| 29 | 53 | Mex4 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 790 | Silvestre |
| 30 | 54 | Mex5 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 790 | Silvestre |
| 31 | 55 | Mex6 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 790 | Silvestre |
| 32 | 56 | Mex7 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 790 | Silvestre |
| 33 | 57 | Mex8 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 871 | Silvestre |
| 34 | 58 | Mex9 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> | 871 | Silvestre |

| No. | No. de colecta | Clave | Municipio | Localidad | Especie | msnm | Silvestre o cultivado |
|-----|----------------|---------|---|---------------------------|--|------|-----------------------|
| 35 | 59 | Mex10 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 871 | Silvestre |
| 36 | 60 | Mex11 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 871 | Silvestre |
| 37 | 61 | Mex12 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 871 | Silvestre |
| 38 | 62 | Mex13 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 871 | Silvestre |
| 39 | 63 | Mex14 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 871 | Silvestre |
| 40 | 64 | Mex15 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 871 | Silvestre |
| 41 | 65 | Mex16 | Copalillo | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 862 | Silvestre |
| 42 | 66 | Mex17 | Copatillo Ixcateapan de Cuauhémoc | Mezquitlan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 862 | Silvestre |
| 43 | 67 | Pachil | Ixcateapan de Cuauhémoc | San Martín Pachivia | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1414 | Cultivado |
| 44 | 68 | Pachi2 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1414 | Cultivado |
| 45 | 69 | Pachi3 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 46 | 70 | Pachi4 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 47 | 71 | Pachi5 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> | 1414 | Cultivado |
| 48 | 72 | Pachi6 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> | 1414 | Cultivado |
| 49 | 73 | Pachi7 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 50 | 74 | Pachi8 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 51 | 75 | Pachi9 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 52 | 76 | Pachi10 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 53 | 77 | Pachi11 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> | 1414 | Cultivado |
| 54 | 78 | Pachi12 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>A. rhodacantha</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 55 | 79 | Pachi13 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 56 | 80 | Pachi14 | Cuauhémoc Ixcateapan de | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 57 | 81 | Pachi15 | Cuauhémoc | San Martín Pachivia | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1414 | Cultivado |
| 58 | 82 | Tepal | Tetipac | Tepacoya, San Gregorio | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1742 | Silvestre |
| 59 | 83 | Tepa2 | Tetipac | Tepacoya, San Gregorio | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1794 | Silvestre |
| 60 | 84 | Tepa3 | Tetipac | Tepacoya, San Gregorio | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1794 | Silvestre |
| 61 | 85 | Tepa4 | Tetipac | Tepacoya, San Gregorio | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1801 | Silvestre |
| 62 | 86 | Chapa1 | Teloloapan | Chapa | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1552 | Silvestre |
| 63 | 87 | Chapa2 | Teloloapan | Chapa | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1552 | Silvestre |
| 64 | 88 | Chapa3 | Teloloapan | Chapa | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1552 | Silvestre |
| 65 | 89 | Chapa4 | Teloloapan | Chapa | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1552 | Silvestre |
| 66 | 90 | Chapa5 | Teloloapan | Chapa | <i>rubescens</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1552 | Silvestre |
| 67 | 91 | Chapa6 | Teloloapan | Chapa | <i>angustifolia</i> <i>A. angustifolia</i> var. | 1552 | Silvestre |
| 68 | 92 | Chapa7 | Teloloapan | Chapa | <i>angustifolia</i> | 1552 | Silvestre |

| No. | No. de colecta | Clave | Municipio | Localidad | Especie | msnm | Silvestre o cultivado |
|-----|----------------|-------------------------|--------------------------|-------------|--|------|-----------------------|
| 69 | 93 | Chapa8 | Teloloapan | Chapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1552 | Silvestre |
| 70 | 94 | Chapa9 | Teloloapan | Chapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1552 | Silvestre |
| 71 | 95 | Chapa10 | Teloloapan | Chapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1552 | Silvestre |
| 72 | 96 | Chapa11 | Teloloapan | Chapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1552 | Silvestre |
| 73 | 97 | Chapa12 | Teloloapan | Chapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1552 | Silvestre |
| 74 | 98 | Ctaxco1 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1706 | Silvestre |
| 75 | 99 | Ctaxco2 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1706 | Silvestre |
| 76 | 100 | Ctaxco3 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1706 | Silvestre |
| 77 | 101 | Ctaxco4 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1706 | Silvestre |
| 78 | 102 | Ju1 | Taxco de Alarcón | Juliantla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1773 | Silvestre |
| 79 | 103 | Ju2 | Taxco de Alarcón | Juliantla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1773 | Silvestre |
| 80 | 104 | 2CT1 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1732 | Silvestre |
| 81 | 105 | 2CT2 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1732 | Silvestre |
| 82 | 106 | 2CT3 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1732 | Silvestre |
| 83 | 107 | 2CT4 | Taxco de Alarcón | Acamixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1732 | Silvestre |
| 84 | 108 | Atetetla1 | Huitzoco de los Figueroa | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 85 | 109 | Atetetla2 | Huitzoco de los Figueroa | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 86 | 110 | Atetetla3 | Huitzoco de los Figueroa | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 87 | 111 | Atetetla4 | Huitzoco de los Figueroa | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 88 | 112 | Atetetla5 | Huitzoco de los Figueroa | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 89 | 113 | Atetetla6 | Huitzoco de los Figueroa | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 90 | 114 | Atetetla7 | Huitzoco de los Figueroa | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 91 | 115 | Atetetla8 | Buenavista de Cuellar | Atetetla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 896 | Cultivado |
| 92 | 116 | Bue1 | Zacapalco | Zacapalco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1143 | Silvestre |
| 93 | 117 | Bue2 | Zacapalco | Zacapalco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1143 | Silvestre |
| 94 | 118 | Bue3 | Zacapalco | Zacapalco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1143 | Silvestre |
| 95 | 119 | Bue4 2,Taxco1 | Zacapalco | Zacapalco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1143 | Silvestre |
| 96 | 120 | Monte Taxco 2,Taxco2 | Taxco de Alarcón | Monte Taxco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1894 | Silvestre |
| 97 | 121 | Monte Taxco | Taxco de Alarcón | Monte Taxco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1894 | Silvestre |
| 98 | 122 | Malhuantla1 | Tetipac | Malhuantla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1754 | Silvestre |
| 99 | 123 | Malhuantla2 | Tetipac | Pregones | <i>A. rhodacantha</i> | 1754 | Silvestre |
| 100 | 124 | Acueducto1 | Tetipac | Acueducto | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1522 | Silvestre |
| 101 | 125 | 2,Tepacoya1 | Tetipac | Tepacoya | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1786 | Silvestre |
| 102 | 126 | 2,Tepacoya2 | Tetipac | Tepacoya | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1786 | Silvestre |

| No. | No. de colecta | Clave | Municipio | Localidad | Especie | msnm | Silvestre o cultivado |
|-----|----------------|--------------|----------------------------|----------------------------------|--|------|-----------------------|
| 103 | 127 | La Venta2 | Edurado Neri | La Venta | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 664 | Silvestre |
| 104 | 128 | La Venta3 | Edurado Neri | La Venta | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 664 | Silvestre |
| 105 | 129 | Tehuixtla1 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1169 | Cultivado |
| 106 | 130 | Tehuixtla2 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1169 | Cultivado |
| 107 | 131 | Tehuixtla3 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. rhodacantha</i> | 1169 | Cultivado |
| 108 | 132 | Tehuixtla4 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. rhodacantha</i> | 1169 | Cultivado |
| 109 | 133 | Tehuixtla5 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1169 | Cultivado |
| 110 | 134 | Tehuixtla6 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. rhodacantha</i> | 1169 | Cultivado |
| 111 | 135 | Tehuixtla7 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1169 | Cultivado |
| 112 | 136 | Tehuixtla8 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. angustifolia</i> | 1169 | Cultivado |
| 113 | 137 | Tehuixtla9 | Teloloapan | Tehuixtla | <i>A. rhodacantha</i> | 1169 | Cultivado |
| 114 | 138 | La Cascada1 | Taxco de Alarcón | La Cascada | <i>A. angustifolia</i> | 1891 | Cultivado |
| 115 | 139 | 3Taxco1 | Taxco de Alarcón | Carretera cuota Taxco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1894 | Silvestre |
| 116 | 140 | 3Taxco2 | Taxco de Alarcón | Zacapalco | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1894 | Silvestre |
| 117 | 141 | 3Taxco3 | Taxco de Alarcón | Pedro Martín | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1894 | Cultivado |
| 118 | 142 | 3Taxco4 | Taxco de Alarcón | Pedro Martín | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1894 | Cultivado |
| 119 | 143 | 3Taxco5 | Taxco de Alarcón | Pedro Martín | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1894 | Cultivado |
| 120 | 144 | 3Taxco6 | Taxco de Alarcón | Zacatecolotla | <i>A. angustifolia</i> | 1894 | Silvestre |
| 121 | 145 | 2Che1 | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 947 | Silvestre |
| 122 | 146 | 2Che2 | Iguala de la Independencia | Cuetzala del Cuetzala | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 947 | Silvestre |
| 123 | 147 | Chi1 | Progreso | Chilacachapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1744 | Silvestre |
| 124 | 148 | Chi2 | Cuetzala del Progreso | Chilacachapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1744 | Silvestre |
| 125 | 149 | Chi3 | Cuetzala del Progreso | Chilacachapa | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1744 | Silvestre |
| 126 | 150 | Chi4 | Cuetzala del Progreso | Zihuatel | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1744 | Silvestre |
| 127 | 151 | Chi5 | Cuetzala del Progreso | Zihuatel | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1744 | Silvestre |
| 128 | 152 | Chi6 | Cuetzala del Agua | Zihuatel | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1744 | Silvestre |
| 129 | 153 | Escondida1 | Taxco de Alarcón | Agua escondida | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 2422 | Cultivado |
| 130 | 154 | Escondida2 | Taxco de Alarcón | Agua escondida | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 2422 | Cultivado |
| 131 | 155 | 2 La Cascada | 1 Taxco de Alarcón | La Cascada | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1891 | Cultivado |
| 132 | 156 | Coacan1 | Atenango del Río | Entrada Coacan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1041 | Silvestre |
| 133 | 157 | Acatempan1 | Teloloapan | Acatempan | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 1481 | Silvestre |
| 134 | 158 | Acatempan2 | Teloloapan | Huerta Grande | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1481 | Silvestre |
| 135 | 159 | Acatempan3 | Teloloapan | Huerta Grande | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 1481 | Silvestre |
| 136 | 160 | Apango 1 | Atenango del Río | Apanguito Mezquitlan - El Puente | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 137 | 161 | 3Mex2 | Copalillo | Puente | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 678 | Silvestre |
| 138 | 162 | Atenango 1 | Atenango del Río | Atenango del Rio | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |

| No. | No. de colecta | Clave | Municipio | Localidad | Especie | msnm | Silvestre o cultivado |
|-----|----------------|----------------|--|---------------------|--|------|-----------------------|
| 139 | 163 | Atenango 2 | Atenango del Río | Atenango del Río | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 140 | 164 | Atenango 4 | Atenango del Río | Atenango del Río | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 141 | 165 | Atenango 5 | Atenango del Río | Atenango del Río | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 142 | 166 | Atenango 6 | Atenango del Río | Atenango del Río | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 143 | 167 | Cuaxilotla 1 | Cuetzala del Progreso | Cuaxilotla | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 144 | 168 | 2Atenango A1 | Atenango del Río | Atenango - Basurero | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 145 | 169 | 2Atenango A2 | Atenango del Río | Atenango - Basurero | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 146 | 170 | 2Atenango B1 | Atenango del Río | Atenango - Basurero | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 147 | 171 | 2Atenango B2 | Atenango del Río | Atenango - Basurero | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 693 | Silvestre |
| 148 | 172 | 2Apango 1 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 149 | 173 | 2Apango 2 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 150 | 174 | 2Apango 3 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 151 | 175 | 2Apango 4 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 152 | 176 | 2Apango 5 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 153 | 177 | 2Apango 6 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 154 | 178 | 2Apango 7 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 155 | 179 | 2Apango 8 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 156 | 180 | 2Apango 9 | Atenango del Río | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 157 | 181 | 2Apango 10 | Atenango del Río Iguala de la Independencia | Apanguito | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 751 | Silvestre |
| 158 | 182 | 3Che1a | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 947 | Silvestre |
| 159 | 183 | 3Che2b | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 947 | Silvestre |
| 160 | 184 | 3Che3c | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 947 | Silvestre |
| 161 | 185 | 3Che4d | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 947 | Silvestre |
| 162 | 186 | 3Che5e | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 947 | Silvestre |
| 163 | 187 | 3Che6f | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>angustifolia</i> | 947 | Silvestre |
| 164 | 188 | 3Che7g | Iguala de la Independencia | Che Guevara | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 947 | Silvestre |
| 165 | 189 | La Venta1 | Edurado Neri Cuetzala del Progreso | La Venta | <i>A. angustifolia</i> var. <i>rubescens</i> | 664 | Silvestre |
| 166 | 190 | Tianquizolco 1 | Tianquizolco Progreso | Tianquizolco | <i>rubescens</i> | 1679 | Cultivado |
| 167 | 220 | Tuza rhoda 1 | Atenango del Río | Tuzantlan | <i>A. rhodacantha</i> | 985 | Cultivado |
| 168 | 221 | Tuza rhoda 2 | Atenango del Río | Tuzantlan | <i>A. rhodacantha</i> | 985 | Cultivado |
| 169 | 222 | Tuza rhoda 3 | Atenango del Río | Tuzantlan | <i>A. rhodacantha</i> | 985 | Cultivado |
| 170 | 223 | Tuza rhoda 4 | Atenango del Río | Tuzantlan | <i>A. rhodacantha</i> | 985 | Cultivado |
| 171 | 224 | Tuza rhoda 5 | Atenango del Río | Tuzantlan | <i>A. rhodacantha</i> | 985 | Cultivado |
| 172 | 225 | Tuza rhoda 6 | Atenango del Río | Tuzantlan | <i>A. rhodacantha</i> | 985 | Cultivado |

Apéndice 2. Carácteres vegetativos analizados en ejemplares pertenecientes al complejo *A. angustifolia*.**Appendix 2.** Vegetative characters analyzed in specimens belonging to the *A. angustifolia* complex.

| No. | Carácter | Tipo de carácter | Valor numérico |
|-----|---|------------------|--|
| 1 | Altura de la roseta (Aro) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 2 | Diámetro de la roseta (Dro) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 3 | No. de hojas por planta (Nhp) | Cuantitativo | Número |
| 4 | Longitud de la hoja (promedio de 3 hojas, Lho) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 5 | Ancho en la base de la hoja (promedio de 3 hojas, Abh) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 6 | Ancho mayor de la hoja (promedio de 3 hojas, Amh) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 7 | Distancia de la base a la parte más ancha de la hoja (promedio de 3 hojas, Dba) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 8 | No. de dientes en un lado del margen de la hoja (promedio de 3 hojas, Ndi) | Cuantitativo | Número |
| 9 | Longitud de los dientes a la mitad de la hoja (promedio de 3 hojas, Ldi) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 10 | Ancho de los dientes a la mitad de la hoja (promedio de 3 hojas, Adi) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 11 | Distancia entre dientes (promedio de 3 hojas, Ddi) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 12 | Largo espina terminal (promedio de 3 hojas, Let) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 13 | Ancho de la espina terminal (promedio de 3 hojas, Aet) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 14 | Distancia de la base de la espina terminal al diente más cercano (promedio de 3 hojas, Ded) | Cuantitativo | Medida en cm |
| 15 | Forma de la hoja (Fho) | Cualitativo | linear 1, lanceolada o linear lanceolada 3 |
| 16 | Glaescencia (Gla) | Cualitativo | Ausente 1, medianamente presente 3 |
| 17 | Color de la hoja (Cho) | Cualitativo | Verde a glauco 1, verde a verde amarilloso 3 y verde limón 5 |
| 18 | Forma dientes laterales (Fdi) | Cualitativo | Rectos 1, Antrorsos 3 y curvados 5 |

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

EVALUACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO DEL ARBUSTO SÁMOTA (*Coursetia glandulosa* A. Gray) A PARTIR DE SEMILLAS, BAJO DIFERENTES CONDICIONES EN TERRENO ÁRIDO DEGRADADO DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

EVALUATION OF THE ESTABLISHMENT OF THE SÁMOTA BUSH (*Coursetia glandulosa* A. Gray) FROM SEEDS, UNDER DIFFERENT CONDITIONS IN DEGRADED ARID LAND OF HERMOSILLO, SONORA, MEXICO

Celaya Michel, H., D.M. Mc Caughey Espinoza, J.R. Ruelas Islas, M.A. Barrera Silva y M.E. Rentería Martínez

EVALUACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO DEL ARBUSTO SÁMOTA (*Coursetia glandulosa* A. Gray) A PARTIR DE SEMILLAS, BAJO DIFERENTES CONDICIONES EN TERRENO ÁRIDO DEGRADADO DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

EVALUATION OF THE ESTABLISHMENT OF THE SÁMOTA BUSH (*Coursetia glandulosa* A. Gray) FROM SEEDS, UNDER DIFFERENT CONDITIONS IN DEGRADED ARID LAND OF HERMOSILLO, SONORA, MEXICO



Evaluación del establecimiento del arbusto sámota (*Coursetia glandulosa* A. Gray) a partir de semillas, bajo diferentes condiciones en terreno árido degradado de Hermosillo, Sonora, México**Evaluation of the establishment of the sámota bush (*Coursetia glandulosa* A. Gray) from seeds, under different conditions in degraded arid land of Hermosillo, Sonora, Mexico**

Hernán Celaya Michel, Diana Miriam Mc Caughey Espinoza, Jesús del Rosario Ruelas Islas, Miguel Angel Barrera Silva, María Eugenia Rentería Martínez

EVALUACIÓN DEL ESTABLECIMIENTO DEL ARBUSTO SÁMOTA (*Coursetia glandulosa* A. Gray) A PARTIR DE SEMILLAS, BAJO DIFERENTES CONDICIONES EN TERRENO ÁRIDO DEGRADADO DE HERMOSILLO, SONORA, MÉXICO

EVALUATION OF THE ESTABLISHMENT OF THE SÁMOTA BUSH (*Coursetia glandulosa* A. Gray) FROM SEEDS, UNDER DIFFERENT CONDITIONS IN DEGRADED ARID LAND OF HERMOSILLO, SONORA, MEXICO

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 141-148. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polbotanica.59.8](https://doi.org/10.18387/polbotanica.59.8)

Hernán Celaya-Michel Autor de correspondencia: hernan.celaya@unison.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3814-3894>

Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora,
Km 21 Carr. Bahía de Kino, CP. 83000. Hermosillo, Sonora, México

Diana Miriam Mc Caughey-Espinoza <https://orcid.org/0000-0003-2988-8245>

Departamento de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Universidad de Sonora Boulevard Luis Donaldo Colosio y Reforma, CP. 83000. Hermosillo Sonora, México

Jesús del Rosario Ruelas-Islas <https://orcid.org/0000-0002-8833-6929>

Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Universidad Autónoma de Sinaloa, C.P.
81110. Ahome Sinaloa, México.

Miguel Angel Barrera-Silva <https://orcid.org/0000-0002-9537-2768>

María Eugenia Rentería-Martínez <https://orcid.org/0000-0003-0212-1626>

Departamento de Agricultura y Ganadería, Universidad de Sonora,
Km 21 Carr. Bahía de Kino, CP. 83000. Hermosillo, Sonora, México

RESUMEN: El objetivo de este trabajo fue evaluar la germinación de las semillas del arbusto forrajero nativo *Coursetia glandulosa* sembradas en diferentes condiciones de terreno degradado y como control en suelo agrícola con riego por goteo en Hermosillo, Sonora, México, además de evaluar la sobrevivencia, y crecimiento de plántulas después del primer año post germinación. Se sembraron 100 semillas en cada parche de suelo degradado con 4 tratamientos: suelo desnudo, suelo desnudo + ramas de poda, bajo árbol y con malla plástica protectora. Los tratamientos en campo estuvieron a expensas de las precipitaciones. Las semillas del tratamiento control, en ecosistema agrícola, tuvieron riego por goteo. Los resultados a un año post germinación, muestran que la mayor germinación fue en el tratamiento control con riego y de los parches de suelo desnudo con protección de malla (44% y 40% de germinación respectivamente, $\chi^2 = 76.34$, $p = 0.0032$). La supervivencia al año fue mayor en el ecosistema agrícola con 86.36 % ($\chi^2 = 41.02$, $p = 0.0001$) seguida de 50% en el suelo desnudo protegido con malla y 20 % en el suelo desnudo cubierto con ramas, no se tuvo sobrevivencia al año de las plantas que nacieron bajo árbol y en suelo desnudo. El crecimiento de las plantas tanto en altura como en el ancho del dosel foliar fue mayor en el tratamiento control bajo riego, superando al año a los 150 cm y 145 cm respectivamente ($p < 0.0001$). Mientras que en el ecosistema degradado tanto con malla como con ramas los crecimientos fueron inferiores a los 42 cm de alto y 10 cm de ancho. El establecimiento de *C. glandulosa* en terrenos degradados áridos del noroeste de México, está muy por debajo de su potencial, limitado por la disponibilidad de agua en el suelo y la herbivoría.

Palabras clave: desertificación; ganadería; manejo de ranchos; sucesión ecológica.

ABSTRACT: The objective of this work was to evaluate the germination of seeds of the native forage shrub *Coursetia glandulosa* planted in different conditions of degraded soil and as a control in agricultural soil with drip irrigation in Hermosillo, Sonora, Mexico, in addition to evaluating the survival and growth of seedlings after the first year post

germination. 100 seeds were planted in each patch of degraded soil with 4 treatments: bare soil, bare soil + pruning branches, under a tree and with a protective plastic mesh. The treatments in the field were dependent on rainfall. The seeds of the control treatment, in an agricultural ecosystem, were drip irrigated. The results one year after germination show that the highest germination was in the control treatment with irrigation and in the bare soil patches with mesh protection (44% and 40% germination respectively, $\chi^2 = 76.34$, $p = 0.0032$). Survival at one year was higher in the agricultural ecosystem with 86.36 % ($\chi^2 = 41.02$, $p = 0.0001$) followed by 50% in the bare soil protected with mesh and 20 % in the bare soil covered with branches. There was no survival at one year of the plants that were born under a tree and on bare soil. Plant growth in both height and width of the leaf canopy was higher in the control treatment under irrigation, exceeding 150 cm and 145 cm respectively at one year ($p < 0.0001$). While in the degraded ecosystem with both mesh and branches, growth was less than 42 cm high and 10 cm wide. The establishment of *C. glandulosa* in arid degraded lands of northwestern Mexico is well below its potential, limited by the availability of water in the soil and herbivory.

Key words: desertification; livestock; ranch management; ecological succession.

INTRODUCCIÓN

Los terrenos degradados se están incrementando en el mundo, desde hace varias décadas y esto representa un reto muy fuerte para la humanidad, por el papel de los ecosistemas en brindar servicios a la humanidad (D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K. F., Ravi, S., & Runyan, C. W., 2013). Cuando la degradación de los suelos avanza se le denomina desertificación y se hace más difícil revertirla (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Las zonas áridas son particularmente vulnerables a la desecación al presentar precipitación escasa y variable, lo que conlleva a la degradación de terrenos y a la desertificación, asociada a disturbios tanto naturales como causados por el ser humano, incluido el sobrepastoreo de ganado (Abella, S. R., O'Brien, K. L., & Weesner, M. W., 2015).

La ganadería de bovinos en México tiene varios siglos de existir, a partir de la introducción de animales domésticos por los colonizadores europeos (Camou, 1998). Uno de los principales problemas que se han reconocido después de varios siglos en la ganadería, es el sobre pastoreo, el cual puede asociarse a sequías y llevar a corto o mediano plazo a la degradación de terrenos (Holechek J.L., Pieper R.D., & Herbel C.H., 1995). La recuperación de los ecosistemas ganaderos áridos mediante una sucesión ecológica es variable y multifactorial, limitada por las sequias y la herbivoría (Allen, E. B., Roundy, B. A., McArthur, E. D., & Haley J. S., 1995). Es muy importante la recuperación de los terrenos con degradación y desertificación, sea evaluada en las diferentes regiones (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

C. glandulosa tiene varios nombres comunes como sámota, samo prieto, chino, coussamo, couzano, y chipile (Celaya-Michel, H., Hinojo-Hinojo, C., Celaya-Rosas, M., Valdez-Zamudio, D., & Rueda-Puente, E. O., 2020). Pertenece a la familia Fabaceae. Es un arbusto de uno a cinco metros de alto, no presenta espinas, tiene ramas flexibles, las hojas son de 2 a 5 cm de largo, y las flores son de 11 a 13 milímetros de largo, blancas o amarillo claro, frutos: vaina larga, delgada, constreñida entre las semillas, de 2-11 cm de largo, 5-7 mm de ancho, glandular estipitada con márgenes sinuosos (Turner, R. M., Bowers, J. E., & Burgess, T. L., 2005).

La distribución de la especie *C. glandulosa* abarca desde Arizona, en Estados Unidos, a Sonora, Sinaloa, Jalisco, Guerrero, y Oaxaca, entre otros estados de México (Felger, R. S., Johnson, M. B., & Wilson, M. F., 2001). En el desierto sonorense, la especie crece en zonas de escorrentía y en pendientes rocosas. La especie presenta una producción abundante de semillas y su germinación ocurre con la presencia de lluvias en la época de verano, en terrenos conservados, teniendo programas de pastoreo o bien agostaderos inactivos (Turner, R. M., Bowers, J. E., & Burgess, T. L., 2005).

Existen reportes donde mencionan que la etnia de los seris (konkaak / comca'ac). Esta etnia aprovecha su madera, para la elaboración de herramientas, entre ellas arcos, y también usos medicinales para el tratamiento de resfriados, fiebres, y tuberculosis (Turner, R. M., Bowers, J. E., & Burgess, T. L., 2005). Además, ha sido descrita como una planta forrajera para el ganado

doméstico y fauna, con un contenido de proteína cruda en sus hojas alrededor del 15% (Velázquez J., 1997).

Dada la importancia de *C. glandulosa* para los productores ganaderos en el noroeste de México, por sus atributos forrajeros, ha habido intentos por recuperar sus poblaciones mediante el trasplante de individuos generados en vivero (Martín-Rivera, M., y otros, 2001) (Martín, R. M. H., Ibarra, F. F. A., & Moreno, M. S., 2017) (Celaya-Michel, H., y otros, 2019). Sin embargo, no se encontró información con respecto al porcentaje de germinación y sobrevivencia en terrenos degradados.

Por lo anteriormente mencionado es necesario tener información de especies nativas con potencial de uso para restauración de ecosistemas de zonas áridas y semiáridas, para contrarrestar la problemática ambiental actual, a la vez de contar con un recurso forrajero (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la germinación, sobrevivencia y crecimiento en el primer año de *C. glandulosa*, a partir de semillas sembradas directamente sin tratamiento pregerminativo en diferentes condiciones de terreno degradado, con y sin protección contra la herbivoría y agrícola con riegos en Hermosillo Sonora, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubicó en el campus de la Universidad de Sonora (Hermosillo, Sonora), en el área de experimentación del Departamento de Agricultura y Ganadería (DAG), la cual consta de 244 hectáreas de terreno agrícola y ganadero a 21 km de la ciudad de Hermosillo, Sonora México, en las coordenadas 29°01'13" LN y 111°08'05" LO, y altitud de 191 msnm, en la Universidad de Sonora. El sitio tiene el tipo de suelo dominante es arenoso franco (WRB, 2015). El clima regional es seco y cálido, con una temperatura promedio anual de 23.1 °C, las temperaturas máximas del mes de junio son de 49 °C, y mínimas en febrero de -3.5 °C (CONAGUA, 2014). Las mayores precipitaciones se presentan en verano (julio y agosto; (INEGI, 2014), como parte del monzón de Norteamérica. La precipitación promedio anual es 378 mm (CESAVE-SIAFESON, 2022).

El área de estudio seleccionada se encuentra con suelo degradado, erosionado y compactado (determinado con la metodología de la línea de Canfield, en un 70% de suelo; (Canfield, 1941). Lo anterior, debido a desmontes, sobre pastoreo de bovinos y sequias. Los herbívoros pequeños como: liebre (*Lepus californicus*) y juancito o ardillón de cola redonda (*Xerospermophilus tereticaudus*) están presentes en el área de estudio.

La colecta de semilla *Coursetia glandulosa* se llevó a cabo con el permiso de colecta científica ante la SEMARNAT. El peso promedio por semilla fue de 0.528 gramos. Las semillas son descritas como reniformes (forma de riñón), con un tamaño que varía entre 6 a 8 mm de largo y presentan un color pardo-amarillento. Las semillas de *C. glandulosa* presentan una latencia moderada, de impermeabilidad de su testa, requiriendo condiciones adecuadas de humedad y temperatura para iniciar el proceso de germinación (Felger, R. S., Johnson, M. B., & Wilson, M. F., 2001) (Turner, R. M., Bowers, J. E., & Burgess, T. L., 2005).

Se evaluaron las variables germinación (emergencia de la plántula), sobrevivencia (a los 365 días), y crecimiento (altura máxima a 365 días, utilizando un flexómetro). Se sembraron 100 semillas (se consideró cada semilla una repetición) de *C. glandulosa* por parche de las diferentes características de terrenos “degradado” y “agrícola”, en una superficie de 1 metro cuadrado por parche. El suelo se preparó manualmente con la herramienta llamada “el pico” y las semillas se sembraron a una profundidad de 3 mm, cubriendolas con suelo del lugar (Bonner, F. T. & Karrfalt, R. P., 2008). Las siembras se realizaron en mayo, antes de la temporada de lluvias de verano de 2021, colocando las semillas al voleo en el metro cuadrado.

El concepto ecológico “parche”, fue utilizado para delimitar visualmente la estructura del paisaje con condiciones homogéneas de suelo, plantas y microclima (Whitford, 2002). La selección de parches degradados en este trabajo fue considerando áreas de suelo desnudo, donde no hubiera habido crecimiento de plantas anuales, perennes y carecieran de mantillo. En ecosistemas degradados se utilizaron: parches de suelo desnudo, suelo desnudo agregando ramas completas de poda (para generar un microclima), bajo árbol (*Parkinsonia microphylla* Torr.), y con malla

plástica formada de cuadrados de 1 cm² (para limitar el ingreso de herbívoros pequeños como liebres, conejos, ratones, ratas, lagartijas, etc.).

Para contrastar las limitantes de agua del terreno degradado, se sembraron semillas de *C. glandulosa* en suelo de uso agrícola con riego por goteo, dentro de una parcela que consiste en un rectángulo de 3.35 hectáreas del DAG, el cual está protegido por malla de alambre formada por cuadrados de 5.7 cm² de cada lado y de dos metros de alto, con lo cual se limita el ingreso a la mayor parte de animales domésticos y fauna. Durante el año de estudio, la lámina de riego aplicada fue de 20 mm por semana, y el riego semanal se suspendió cuando se presentaron acumulados de precipitación semanal de 20 mm o más.

Las variables de respuesta evaluadas fueron: germinación (%), sobrevivencia (%) y crecimiento (altura de la planta y ancho del dosel en centímetros) durante un año. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa JMP versión 5 (SAS, 2000). Con los datos de germinación y sobrevivencia se elaboraron tablas de contingencia con la prueba de ji cuadrada (χ^2) (Infante, G. S. & Zarate de Lara, G. P., 2000) Infante y Zarate de Lara, 2000). El crecimiento en altura de las plantas los 365 días, se contrastó mediante análisis de varianza, previo análisis de normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk. La prueba a posteriori utilizada fue Tukey-Kramer. En todos los casos se estableció una significancia estadística menor o igual al 5% ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS

Los resultados de germinación muestran que las semillas de *C. glandulosa* en suelo agrícola con riego germinaron más que las semillas colocadas en el resto de los parches de suelo degradado (44 % de germinación, $\chi^2 = 76.341$, $p = 0.0001$; Cuadro 1). En suelo degradado con malla se tuvo una germinación de 40 %, mientras que en los tratamientos ramas, bajo árbol y suelo desnudo solo el 20, 6 y 5 %, respectivamente.

Las plantas de *C. glandulosa* en suelo agrícola tuvieron una sobrevivencia alta del 86 % al año ($\chi^2 = 41.02$, $p = 0.0001$), mientras que las plantas en suelo degradado con malla y ramas fue de 50 y 20 %. Las plantas bajo árbol y en suelo desnudo no lograron llegar con vida a los 365 días.

Cuadro 1. Germinación y sobrevivencia anual de semillas de *C. glandulosa*, en parches de ecosistema degradado y en suelo agrícola. Germinación $\chi^2 = 76.341$, $p = 0.0001$. Sobrevivencia $\chi^2 = 41.02$, $p = 0.0001$.

Table 1. Germination and annual survival of *C. glandulosa* seeds in degraded ecosystem patches and in agricultural soil. Germination $\chi^2 = 76.341$, $p = 0.0001$. Survival $\chi^2 = 41.02$, $p = 0.0001$.

| Ecosistema | Características | Germinación (%) | Sobrevivencia (%) |
|------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| Degrado | Desnudo | 5.00 | 0.00 |
| Degrado | Ramas | 20.00 | 20.00 |
| Degrado | Bajo árbol | 6.00 | 0.00 |
| Degrado | Malla | 40.00 | 50.00 |
| Agrícola | Riego | 44.00 | 86.36 |

Las plantas en el suelo agrícola tuvieron riegos periódicos, lo cual explica su alta sobrevivencia (86%) tal como es de esperarse; lo relevante del estudio es que en el suelo del ecosistema degradado la protección con malla (50%) y ramas (20%) favoreció una sobrevivencia a diferencia del tratamiento bajo árbol y suelo desnudo sin sobrevivencia.

Durante el periodo de estudio de mayo de 2021 a diciembre de 2022, las precipitaciones pluviales (Cuadro 2) fueron nulas de enero a mayo de 2022, es decir no hubo lluvias de invierno, retardo la sobrevivencia de las plantas bajo estudio. Para futuros trabajos valdría la pena explorar cuanto de los tratamientos malla plástica o con ramas contribuyen a la sobrevivencia como protección contra herbivoría o por un posible efecto de microclima.

Cuadro 2. Precipitación (mm) mensual en el área de estudio de la costa de Hermosillo, de 2021 a 2022. Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora (CESAVE-SIAFESON, 2022).

Table 2. Monthly precipitation (mm) in the study area of the Hermosillo coast, from 2021 to 2022. Network of Automatic Meteorological Stations of Sonora (CESAVE-SIAFESON, 2022).

| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Total |
|-------------|------|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|------|-----|-----|------|-------|
| 2021 | 41.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 10.0 | 114.4 | 65.8 | 32.3 | 0.0 | 5.1 | 48.4 | 317.1 |
| 2022 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 11.0 | 78.4 | 192.4 | 64.6 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 352.4 |

La altura de las plantas al año de *C. glandulosa* fue mayor en suelo agrícola con riego por goteo (150 cm; $p < 0.0001$; Cuadro 3) a los 365 días que las plantas con malla y ramas (41 cm, 34 cm). Los resultados de ancho del dosel también fueron mayores para las plantas en suelo agrícola (145 cm; $p < 0.0001$; Cuadro 3).

Cuadro 3. Media y desviación estándar (DE) de altura y ancho del dosel de plantas de *C. glandulosa* al año de edad, en parches de ecosistema degradado y agrícola.

Table 3. Mean and standard deviation (SD) of canopy height and width of *C. glandulosa* plants at one year of age, in patches of degraded and agricultural ecosystems.

| Ecosistema | Características | Altura (cm) | DE | Ancho (cm) | DE |
|------------|-----------------|-------------|-------|------------|--------|
| Degrado | Ramas | 34.57 | 3.66 | B | 8.82 |
| Degrado | Malla | 41.75 | 5.76 | B | 9.10 |
| Agrícola | Riego | 150.61 | 16.01 | A | 145.49 |

Medias de tratamientos con letra diferente (A o B) entre ecosistemas indican diferencia significativa ($P < 0.0001$).

DISCUSIÓN

Otras especies de árboles nativos del Desierto Sonorense como *Guaiacum coulteri*, *Olneya tesota*, *Parkinsonia florida*, *Parkinsonia microphylla*, y *Prosopis velutina* se han germinado en suelo agrícola de 1 al 29% sólo con las lluvias, y de 15 a 85% cuando se aplicó riego (Ochoa-Meza, A., y otros, 2022), en nuestros datos fue una germinación de 5 a 40% para tratamientos en suelo degradado, y 44% en suelo agrícola con riego (Cuadro 1).

La sobrevivencia de plantas nuevas en el Desierto Sonorense, se ha reportado como baja, por altas tasas de mortalidad de las plántulas durante el primer año (Bowers, J. E., Turner, R. M., & Burgess, T. L., 2004). Un estudio previo en el Desierto Sonorense de trasplante de plantas de *C. glandulosa* reporta una sobrevivencia de 8 % en suelo desnudo y 35 % en zonas de acumulación de agua (Martín *et al.*, 2017); en otro trabajo, después de 4 épocas de verano, la sobrevivencia fue de 25 % (Martín, R. M. H., Ibarra, F. F. A., & Moreno, M. S., 2017). Mientras que, en la costa de Hermosillo, *C. glandulosa* registró una sobrevivencia del 90 % con riego por goteo durante el primer año; y en los 17 años posteriores pasó de 9 plantas a 20, mostrando colonización en el sitio (Celaya-Michel, H., y otros, 2019). La diferencia de nuestro estudio fue que se evaluó la sobrevivencia de semillas germinadas en el sitio degradado con resultados de 0 a 50 % y 86 % en suelo agrícola con riego, en vez de trasplante de plantas generadas en vivero que menciona la literatura.

El crecimiento de plantas en los desiertos es lento, limitado por las precipitaciones, herbivoría y disponibilidad de nutrientes del suelo (Whitford, 2002). Martín y colaboradores (Martín, R. M. H., Ibarra, F. F. A., & Moreno, M. S., 2017) trasplantaron *C. glandulosa* de vivero y a los dos años la altura encontrada fue de 155 cm en zonas de acumulación de agua, y 68 cm en terrenos

planos. En un estudio la altura de plantas adultas a los 17 años post trasplante de *C. glandulosa* fue de 4.88 metros (Celaya-Michel, H., y otros, 2019).

En nuestros datos el crecimiento al año fue de 34 a 41 cm para las plantas de los tratamientos en terreno degradado a comparación con 150 cm en suelo agrícola y con riego por goteo (Cuadro 3). Lo anterior puede indicar el potencial de crecimiento que tiene la especie, con mayor disponibilidad de agua.

CONCLUSIONES

Las condiciones de humedad de los terrenos áridos degradados del noroeste de México limitan la germinación de *C. glandulosa*. La protección de herbivoría, con malla y ramas de poda, favorece la sobrevivencia al año de nuevas plantas de esta especie. El crecimiento de *C. glandulosa* en condiciones naturales en terreno degradado es lento y alejado del potencial de crecimiento a cuando se adiciona riego. Es necesario continuar investigando alternativas de establecimiento de árboles y arbustos nativos para recuperar terrenos degradados, que permitan recuperar servicios ecosistémicos para la humanidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora, Departamento de Agricultura y Ganadería, por el apoyo para la realización del presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Abella, S. R., O'Brien, K. L., & Weesner, M. W. (2015). Revegetating Disturbance in National Parks: Reestablishing Native Plants in Saguaro National Park, Sonoran Desert. *Natural Areas Journal*, 18-25.
- Allen, E. B., Roundy, B. A., McArthur, E. D., & Haley J. S. (1995). Restoration ecology: limits and possibilities in arid and semiarid lands. En B. A. Roundy, E. D. McArthur, J. S. Haley, & c. Mann David K., *Proceedings of the Wildland Shrub and Arid Land Restoration Symposium* (págs. 7-15). Las Vegas, NV.: USDA Forest Service Intermountain Research Station.
- Bonner, F. T., & Karrfalt, R. P. (2008). *The woody plant seed manual* (Vol. Handbook No. 727). Washington, DC.: US Department of Agriculture, Forest Service.
- Bowers, J. E., Turner, R. M., & Burgess, T. L. (2004). Temporal and spatial patterns in emergence and early survival of perennial plants in the Sonoran Desert. *Bowers, J. E., Turner, R. M., & Burgess, T. L. (2004). Temporal and spatial patterPlant Ecology*, Bowers, J. E., Turner, R. M., & Burgess, T. L. (2004). Temporal and spatial patterns in 107–119.
- Camou, H. E. (1998). *De rancheros, poquitos, orejanos y criollos: los productores ganaderos de Sonora y el mercado internacional*. Zamora, Michoacán, México.: El Colegio de Michoacán AC.
- Canfield, R. H. (1941). Application of the line interception method in sampling range vegetation. *Journal of Forestry*, 388-394.
- Celaya-Michel, H., Hinojo-Hinojo, C., Celaya-Rosas, M., Valdez-Zamudio, D., & Rueda-Puente, E. O. (2020). *Plantas nativas más comunes de las zonas áridas de Sonora*. Celaya-Michel, H., Hinojo-Hinojo, C., Celaya-Rosas, M., Valdez-Zamudio, D., y Rueda-Puente, E. O. (2020). Plantas nativas más comunes de las Hermosillo Sonora. Universidad de Sonora. Colección de Textos académicos. Hermosillo Sonora. 255 p.
- Celaya-Michel, H., Mc Caughey-Espinoza, D. M., Rodríguez, J. C., Bautista-Olivas, A. L., Castellanos-Villegas, A. E., Hinojo-Hinojo, C., & Barrera-Silva, M. (2019). Post-transplant performance of 17 native wood fodder species from Sonora, Mexico. *Agrociencia*, 371-380.

Recibido:
25/julio/2024

Aceptado:
17/diciembre/2024

- CESAVE-SIAFESON. (2022). *Red de Estaciones Meteorológicas Automáticas de Sonora*. Obtenido de <https://www.siafeson.com/remas/>
- CONAGUA. (2014). *Estadísticas del Agua en México, edición 2014*. México, D. F.: SEMARNAT-CONAGUA.
- D'Odorico, P., Bhattachan, A., Davis, K. F., Ravi, S., & Runyan, C. W. (2013). Global desertification: Drivers and feedbacks. *Advances in water resources*, 326-344.
- Felger, R. S., Johnson, M. B., & Wilson, M. F. (2001). *The trees of Sonora, Mexico*. New York: Oxford University Press.
- Holechek J.L., Pieper R.D., & Herbel C.H. (1995). *Range Management, Principles and Practices*. Englewood Cliffs, NJ, USA.: Prentice Hall.
- INEGI. (2014). *Anuario estadístico y geográfico de Sonora 2014*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Infante, G. S., & Zarate de Lara, G. P. (2000). *Infante, G. S.Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario* (Vol. Sexta reimpresión). México: Editorial Trillas.
- Martín, R. M. H., Ibarra, F. F. A., & Moreno, M. S.,. (2017). Transplanting brush species for the rehabilitation of Sonoran Desert degraded rangelands in Mexico. *Grassland science in Europe*, 363.
- Martín-Rivera, M., Ibarra-Flores, F., Guthery, F. S., Kublesky, W. P., Camou-Luders, G., Fimbres-Preciado J., & Johnson-Gordon, D. (2001). Habitat improvement for wildlife in north-central Sonora, Mexico. En M. I.-F.-L.-P.-G. Martín-Rivera, *Shrubland ecosystem genetics and biodiversity: proceedings* (págs. Shrubland ecosystem genetics and biodiversity: proceedings; 2000 June 13-15; Provo, UT. Proc. RMRS-P-21. Og356-360). Provo, UT.: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. .
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: opportunities and challenges for business and industry*. Washington, D. C.: World Resources Institute.
- Ochoa-Meza, A., Montiel-González, C., Ruelas-Islas, J. D. R., Barrera-Silva, M. A., Valdez-Domínguez, R. D., & Celaya-Michel, H. (2022). Germination and growth of the Sonoran Desert native trees under different agricultural conditions. *Agroproductividad*.
- SAS. (2000). *SAS statistical software* (Vol. Version 5). Cary, NC, USA: SAS Institute.
- Turner, R. M., Bowers, J. E., & Burgess, T. L. (2005). *Sonoran Desert plants: an ecological atlas*. Tucson, AZ.: University of Arizona Press.
- Velázquez J., C. (1997). *Importancia y Valor Nutricional de las Especies Forrajeras de Sonora*. Hermosillo, México.: UniSon.
- Whitford, W. G. (2002). *Ecology of Desert Ecosystems*. San Diego, CA, USA: Elsevier Science Ltd. London, UK.
- WRB, I. (2015). *World reference base for soil resources 2014, update 2015*. Rome, Italy: FAO.

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

IMPACTO DE LA PODA TEMPRANA EN EL CRECIMIENTO Y FORMA DE *Brosimum alicastrum* Sw.

IMPACT OF EARLY PRUNING ON GROWTH AND SHAPE OF *Brosimum alicastrum* Sw.

Tadeo Noble, A.E.; A. Santillán Fernández; J. Bautista Ortega y S. Paredes Ríos
IMPACTO DE LA PODA TEMPRANA EN EL CRECIMIENTO Y FORMA DE
Brosimum alicastrum Sw.
IMPACT OF EARLY PRUNING ON GROWTH AND SHAPE OF *Brosimum alicastrum* Sw.



Impacto de la poda temprana en el crecimiento y forma de *Brosimum alicastrum* Sw.**Impact of early pruning on growth and shape of *Brosimum alicastrum* Sw.**

Tadeo Noble, A.E.;
A. Santillán Fernández;
J. Bautista Ortega
y S. Paredes Ríos

**IMPACTO DE LA PODA
TEMPRANA EN EL
CRECIMIENTO Y FORMA
DE *Brosimum alicastrum* Sw.**

**IMPACT OF EARLY
PRUNING ON GROWTH
AND SHAPE OF *Brosimum
alicastrum* Sw.**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 149-158. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.9

Alfredo Esteban Tadeo Noble <https://orcid.org/0000-0001-7694-7477>
Alberto Santillán Fernández. Autor para correspondencia: santillan.alberto@colpos.mx
<https://orcid.org/0000-0001-9465-1979>

*IxM CONAHCyT y Colegio de Postgraduados Campus Campeche.
Sihochac, Champotón, Campeche, México. C.P. 24450*

Jaime Bautista Ortega <https://orcid.org/0000-0002-3763-8986>
*Colegio de Postgraduados Campus Campeche.
Sihochac, Champotón, Campeche, México. C.P. 24450.*

Sixto Paredes Ríos <https://orcid.org/0009-0000-2480-1054>
*División de Ingeniería Forestal, Tecnológico Nacional de México/
Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, Av. Tecnológico S/N,
Colonia El Huasteco, Puebla C.P. 73049, México*

RESUMEN: La poda adecuada de los individuos de *Brosimum alicastrum* en vivero es esencial para fomentar un crecimiento saludable y equilibrado de las plantas jóvenes. Se llevó a cabo un estudio comparativo de variables dasométricas en plántulas de seis meses. Se utilizaron 172 individuos divididos al azar en dos grupos, con y sin poda del meristemo apical. Se registraron medidas como altura total, altura y longitud de rebrotes, y número de rebrotes por tratamiento. Además, se estimaron la relación biomasa seca aérea y subterránea con una submuestra de diez individuos por tratamiento. Para la altura total, altura y longitud del rebrote, biomasa seca aérea y radical se realizó una prueba t de Student para muestras independientes y para corroborar la independencia de los tratamientos en los individuos con rebrotes se aplicó una prueba de Chi-Cuadrada. Los resultados revelaron que no hubo diferencias significativas en la altura total, relación de la biomasa seca aérea y subterránea entre los grupos. La presencia de rebrotes no se vio afectada por el tratamiento aplicado. La longitud promedio de los rebrotos alcanzados por individuos con poda es mayor que los sin poda.

Palabras clave: rebrote, silvicultura, Nuez Maya, viveros forestales.

ABSTRACT: Proper pruning of *Brosimum alicastrum* individuals in the nursery is essential to promote healthy and balanced growth of young plants. A comparative study of dasometric variables was conducted on six-month-old seedlings. A total of 172 individuals were randomly divided into two groups, with and without apical meristem pruning. Measurements such as total height, height and length of sprout, and number of sprouts per treatment were recorded. Additionally, the aboveground and underground dry biomass ratio was estimated with a subsample of ten individuals per treatment. For total height, height and length of sprout, aboveground and root dry biomass, a Student's t-test for independent samples was performed, and to corroborate the independence of treatments in individuals with sprouts, a Chi-Square test was applied. The results revealed no significant differences in total height, aboveground and underground dry biomass ratio between the groups. The presence of sprouts was not affected by the applied treatment. The average length of sprouts achieved by pruned individuals is greater than that of unpruned ones.

Key words: sprout, silviculture, Maya Nut, forest nurseries.

INTRODUCCIÓN

El árbol de ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.) es una especie fundamental en los ecosistemas de selva de las dos costas mexicanas, no solo por su papel ecológico, sino también por su valor cultural y alimenticio para las comunidades mayas (Mapes & Basurto, 2016; Pennington & Sarukhan, 2005). Es una especie que proporciona nutrientes y sirve de alimento tanto para humanos como para animales de cría (Subiria-Cueto *et al.*, 2019; Peters & Pardo-Tejeda, 1982). Se encuentra en las áreas traseras conocidas como traspasos o exteriores de las viviendas de las familias mayas, quienes tienen la costumbre de utilizar todas sus partes (hojas, tallo, semillas, fruto y látex) (Pennington & Sarukhan, 2005; Canto Ramírez, 2015; Pardo-Tejada & Sánchez-Muñoz, 1978). Existen diferentes estudios que abordan investigación referente al árbol de ramón en México, sobre los nichos climáticos donde se puede desarrollar la especie (Santillán Fernández *et al.*, 2021a) y particularmente sobre aspectos de reproducción sexual y asexual de la especie (Santillán Fernández *et al.*, 2021b), así como, el efecto de la corta frecuente del rebrote para la producción y calidad de hoja (Mendoza-Castillo *et al.*, 2000).

La poda temprana es una práctica habitual en el manejo de árboles frutales y forestales (Mika *et al.*, 1991; Basave Villalobos *et al.*, 2014), pero su impacto en el crecimiento y la forma de *Brosimum alicastrum* Sw aún no se ha investigado a profundidad (Alvarado Ricalde, 2022). Dentro de las investigaciones realizadas en temas de poda temprana en fase de vivero, no se reportan estudios para esta especie. No obstante, en otras especies forestales tropicales se han realizado ensayos para mejorar la calidad de plantas de *Caesalpinea coriaria* (Jacq.) Willd (Basave Villalobos *et al.*, 2021); mejorar la tasa de supervivencia y crecimiento en plantas de *Nothofagus nervosa* (Phil.) Dim. et Mil. establecidas en campo abierto (Donoso *et al.*, 2009); mejorar la producción de biomasa y la forma de crecimiento en *Jatropha curcas* L. (Rajaona *et al.*, 2011) y en especies forestales de coníferas se han realizado experimentos tratando de uniformizar la talla, mejorar la relación aérea/radical, la supervivencia y adaptación en campo (Nepamuceno Martínez *et al.*, 1994).

El presente estudio tuvo como objetivo, determinar el efecto de la poda temprana en la etapa de vivero de plántulas de *Brosimum alicastrum* Sw., con un enfoque particular en la biomasa tanto de la parte aérea como de la raíz, así como en la producción temprana de rebrotes para proporcionar información relevante para su manejo y aprovechamiento sostenible. Bajo el supuesto que la aplicación de poda temprana en las plantas en fase de vivero no modifica las características dasométricas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el vivero del Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza (ITsvc), en Villa Lázaro Cárdenas, Venustiano Carranza, Puebla. Se ubica en 20° 47' 20" latitud N y 97° 69' 86" longitud O, a 361 msnm. El clima de la región es cálido húmedo según la clasificación de Köppen, presenta una temperatura media anual que varía entre 18° y 22 °C. con lluvias en verano (García, 2004), el germoplasma se colectó en el ejido Noh Bec, Quintana Roo, con características climáticas similares.

Tratamientos, diseño de muestreo y registro de datos

Se realizó siembra directa en bolsas de polietileno de 15 cm de alto x 25 cm de largo, con sustrato de composición: agrolita (30%), vermiculita (30%) y suelo (40%). Se seleccionaron 172 individuos de cuatro meses de edad, separados de forma aleatoria en dos grupos de 86 individuos (n), a los que se aplicó como tratamiento: poda de tallo principal, considerando el corte por debajo de tres hojas a partir del ápice a la base, misma que corresponde al área no lignificada de la planta, en general a los 30 cm de la base a la punta, con el que se pretende producir un rebrote obligado. Para el resto de los individuos que se tomaron como grupo de control no se aplicó poda y se evaluó su desarrollo de forma normal bajo condiciones de vivero.

A los dos meses del corte apical, se registraron las medidas de altura total de la planta (AT, cm), altura del rebrote (ATR, cm) estimado a partir de la base del pilón hasta la altura de la bifurcación, y el largo de la rama del rebrote (LR, cm) (Figura 1).

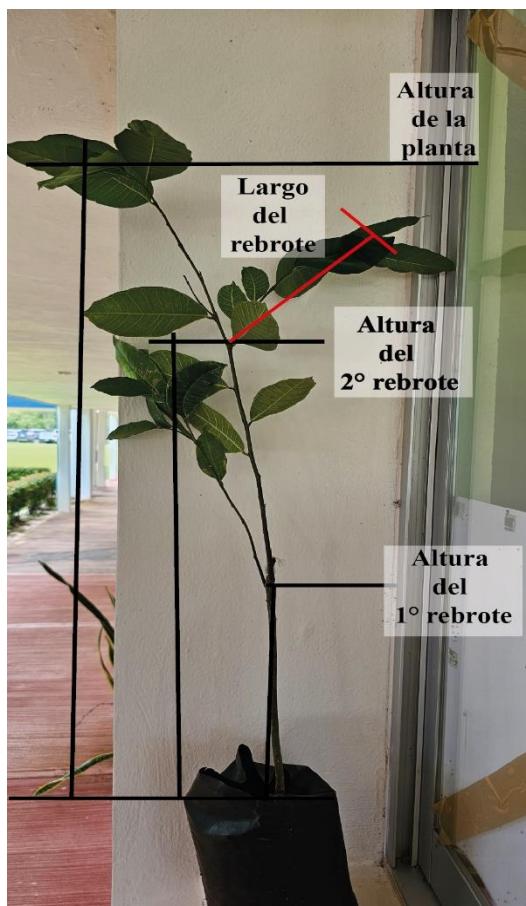


Figura 1. Esquema de las variables de medición a los individuos de *Brosimum alicastrum* Sw.

Figure 1. Scheme of the measurement variables for individuals of *Brosimum alicastrum* Sw.

Se seleccionaron de forma aleatoria 10 individuos de cada tratamiento, se separaron por componentes de la planta: raíz, tallo y hoja, se deshidrataron en un horno a 70° C, hasta lograr un peso constante (gr, 0.000), durante 60 horas (Gyenge *et al.*, 2009; Rueda-Sánchez *et al.*, 2014), se tomó el peso seco, utilizando una báscula analítica.

Se estimó la relación de la biomasa seca aérea (tallos y hojas) y biomasa seca subterránea (raíz) (Muñoz Flores *et al.*, 2015; Rueda-Sánchez *et al.*, 2014), con base en la fórmula siguiente:

$$RBS\ A/S = \frac{BSA}{BSS}$$

Donde:

RBS A/S: Relación de la biomasa seca aérea y subterránea,

BSA: Biomasa seca aérea (gr),

BSS: Biomasa seca subterránea (gr)

Análisis de la información

Se evaluaron las variables de altura total de la planta, altura de aparición del rebrote, longitud del rebrote, y biomasa seca (BS), en esta última, tanto de la parte aérea como de la parte subterránea. Para verificar la normalidad de estos datos, se aplicó la prueba de Kolmogórov-Smirnov (Field *et al.*, 2012) y se aplicó la prueba de t de Student para poblaciones independientes con el objetivo de comparar los grupos de estudio bajo un nivel de confianza del 95%, y evaluar las diferencias entre las muestras (Sáenz *et al.*, 2010; Villalón-Mendoza, 2016), usando el programa RSTUDIO. Se llevó a cabo una prueba de Chi cuadrada para analizar la variable categórica 'presencia de rebrote' para determinar si existe una relación independiente entre el rebrote y el tratamiento aplicado (Dawson-Saunders & Trapp, 1993; López Martell *et al.*, 2018).

RESULTADOS

Altura total

De acuerdo con la prueba t de Student no se muestran diferencias estadísticas ($p>0.05$), en la altura total de los tratamientos de poda temprana (Figura 2).

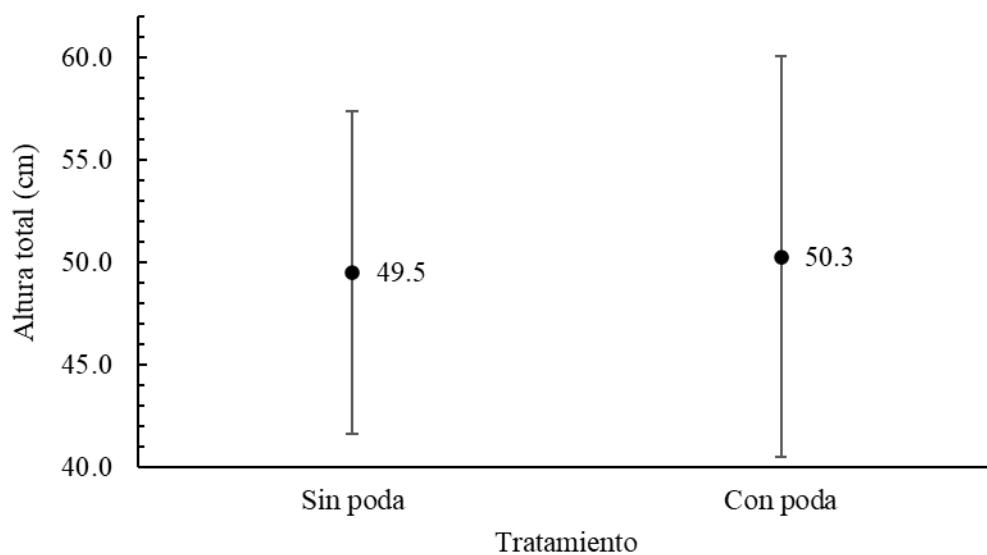


Figura 2. Comparación de la altura de los individuos de *Brosimum alicastrum* Sw. entre tratamientos

Figure 2. Comparison of the height of *Brosimum alicastrum* Sw. individuals between treatments

Relación de la biomasa aérea y subterránea

La biomasa seca promedio fue menor en los individuos con poda, tanto para las hojas, como para la raíz, y son muy similares en los valores para tallo, pero, no muestran diferencias significativas ($p>0.05$). La BS de la raíz es muy similar a los valores promedios de la BS de la hoja, no existen diferencias entre las partes de la especie con o sin poda ($p>0.05$) (Figura 3).

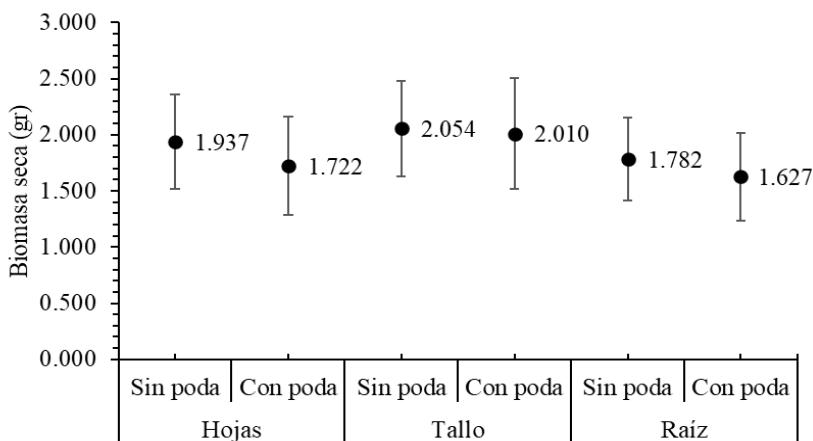


Figura 3. Comparación de la biomasa seca por componente de individuos de *Brosimum alicastrum* Sw.

Figure 3. Comparison of dry biomass by component of individuals of *Brosimum alicastrum* Sw.

La relación de la BS aérea y subterránea se expresa mejor en los individuos sin poda, dado de que su valor es ligeramente menor en comparación a los individuos con poda, sin diferencias significativas ($p>0.05$) (Figura 4).

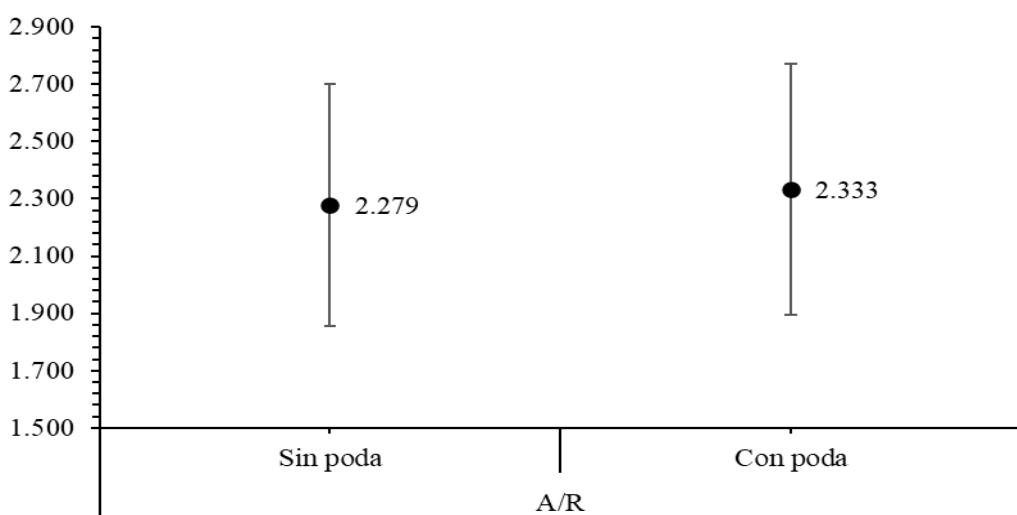


Figura 4. Comparación de la relación entre la biomasa seca aérea y subterránea de individuos de *Brosimum alicastrum* Sw.

Figure 4. Comparison of the relationship between aerial and underground dry biomass of individuals of *Brosimum alicastrum* Sw.

Presencia de rebrote altura y elongación

La presencia de rebrotos, fue estadísticamente semejante, para los tratamientos aplicados de poda temprana, la producción de rebrotos es independiente del tratamiento aplicado para la formación de brotes ($X^2= 2.1627$, $p=0.1414$). Un tercio de los individuos de *B. alicastrum* mostraron rebrotos, sin importar la condición o tratamiento. De los individuos podados, 36.5% registraron entre 2 y 3 rebrotos por planta. Los individuos podados con solo un rebrote se considera que recuperaron su eje principal y que no reaccionaron al tratamiento (Figura 5).

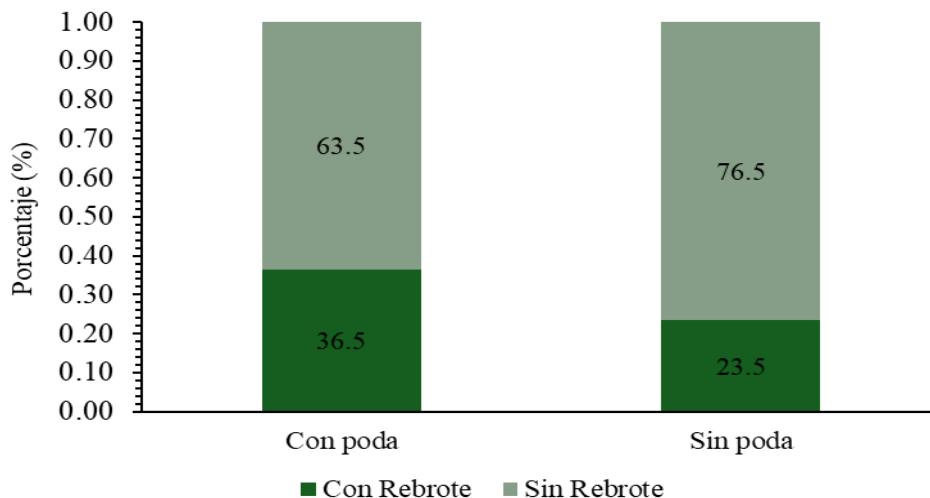


Figura 5. Porcentaje de individuos con rebrote de *Brosimum alicastrum* Sw.
Figure 5. Percentage of individuals with sprout of *Brosimum alicastrum* Sw.

La altura del primer rebrote fue similar entre ambos tratamientos ($p>0.05$), los individuos sin poda presentaron una altura de rebrote a 32.0 cm y los individuos con poda se presentó el rebrote obligado a los 30.0 cm, esto sugiere que la especie rebrota de manera natural a esa altura o tiempo y se puede considerar realizar la poda un poco de tiempo después de los 4 meses. A diferencia de la altura al primer rebrote, el largo del primer rebrote fue significativa ($p<0.05$), por lo que los individuos con poda alcanzaron mayor elongación (19.01 cm) que los individuos sin poda (11.73 cm).

El segundo rebrote de los individuos con poda se reporta a los 24.2 cm de altura, con una longitud promedio de 13.5 cm. En los individuos sin poda, la segunda aparición de brotes ocurre hasta los 33.1 cm y el largo de los rebrotos fue de 9.7 cm. Al comparar el segundo rebrote, se presenta diferencia significativa ($p<0.05$) para las dos variables.

DISCUSIÓN

La altura de los individuos de *B. alicastrum* es muy cercana a lo que reportan individuos de un año de edad producidos en vivero con fines de establecimiento (Hernández-González *et al.*, 2015) y un poco mayor a lo que menciona Peters (1989) y Rueda-Sánchez *et al.* (2014). La poda tradicional en *B. alicastrum* ralentiza el crecimiento al reducir su capacidad fotosintética y aumenta el riesgo de infestaciones de plagas y enfermedades, también provoca daños mecánicos y deformaciones a la forma y arquitectura de la copa (Alvarado Ricalde, 2022). Sin embargo, la poda temprana, no muestra efectos en las características dasométricas de los individuos, por lo que no se sugiere como actividad cultural en plantas jóvenes en fase de vivero (Basave Villalobos *et al.*, 2014), aun cuando el propósito de la poda temprana sea comenzar a modificar la estructura inicial de los individuos con propósitos de cosecha de follaje.

En la producción de plantas forestales en viveros, se ha propuesto que la poda aérea o de tallo tiene potencial como práctica cultural, para mejorar la calidad de la planta para obras de reforestación (Duryea, 1984; Duryea, 1990); no se sugiere para las plantas de *B. alicastrum* de cinco meses ya que no respondieron de manera adecuada a los propósitos de modificar la estructura arquitectónica de la especie, su aplicación llega a ser efectiva como práctica cultural en individuos de mayor edad (Hernández-González *et al.*, 2015). La divergencia entre lo obtenido en *B. alicastrum* sugiere un efecto diferencial de la poda entre especies, el cual se atribuye a los distintos patrones de crecimiento y ramificación que son controlados por mecanismos de dominancia y control apical (Taiz & Zeiger, 2006), pero si mostraron una

recuperación sustancial del peso seco (Alcalá *et al.*, 2001; Basave Villalobos *et al.*, 2021). La respuesta efectiva esperada se refleja con la poda de individuos adultos que, al modificar su estructura, son capaces de generar un aumento notable de biomasa aérea.

Rueda-Sánchez *et al.* (2014) presentan valores semejantes de la relación BSA/BSS (2.3), en individuos de *B. alicastrum* de tres meses de edad, por lo que recomiendan alargar su estadía en el vivero unos meses más para mejorar esta condición.

CONCLUSIONES

La prueba de poda temprana no mostró diferencia estadística en la altura total, ni en los valores de biomasa de los componentes de la planta. La poda temprana no mejora la calidad de planta, ni influye en la mejora de sus características dasométricas cuando tiene seis meses en vivero, pero confirma la buena respuesta en la recuperación de biomasa aérea y lignificación temprana del tallo.

La presencia de rebrotes no se vio afectada por los tratamientos de poda, ya que es independiente del tratamiento aplicado. La fuerte dominancia apical se evidenció en el crecimiento vigoroso del meristemo apical, lo cual permitió que la mayoría de los individuos podados recuperaran su eje principal, generando así únicamente un rebrote.

LITERATURA CITADA

- Alcalá, V. M. C., Ortega, M. L., Hernández, V. A. G., Hernández, J. V., Colinas, M. T., & Monter, Á. V. J. A. (2001). Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* Engelm. En respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. 35(6), 599-607.
- Alvarado Ricalde, G. A. (2022). *Estudio de viabilidad para la producción y comercialización de la semilla del árbol del ramón en el Estado de Quintana Roo*. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo. Chetumal, Quintana Roo.
- Basave Villalobos, E., Cetina Alcalá, V. M., López López, M. Á., Ramírez Herrera, C., Trejo, C., & Conde Martínez, V. (2021). La poda aérea como práctica cultural en vivero para *Caesalpinea coriaria* (Jacq.) Willd. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 12(63), 138-152.
- Basave Villalobos, E., López López, M. Á., Cetina Alcalá, V. M., Aldrete, A., & Almaraz Suárez, J. J. (2014). Prácticas culturales en vivero que influyen en la calidad de planta de *Enterolobium cyclocarpum*. *Bosque*, 35(3), 301-309. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002014000300005>
- Canto Ramírez, E. A. (2015). *Análisis de la diversidad genética del Ramón (*Brosimum alicastrum*) en los estados de Yucatán y Campeche*. Instituto tecnológico de Conkal.
- Dawson-Saunders, B., & Trapp, R. G. (1993). *Bioestadística médica*. El Manual Moderno Mexico.
- Donoso, P. J., Soto, D. P., & Gerdin, V. (2009). Efectos de la poda de tallo y fertilización de liberación controlada en vivero sobre el comportamiento de plántulas de *Nothofagus nervosa* en terreno *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 48-53. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002009000100007>
- Duryea, M. L. (1984). Nursery cultural practices: impacts on seedling quality. *Forestry nursery manual: production of bareroot seedlings*, 143-164.
- Duryea, M. L. (1990). Nursery Fertilization and Top Pruning of Slash Pine Seedlings. *Southern Journal of Applied Forestry*, 14(2), 73-76. <https://doi.org/10.1093/sjaf/14.2.73>
- Field, A., Miles, J., & Field, Z. (2012). *Discovering statistics using R*. Sage publications.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gyenge, J., Fernández, M. E., Sarasola, M., de Urquiza, M., & Schlichter, T. (2009). Ecuaciones para la estimación de biomasa aérea y volumen de fuste de algunas especies leñosas nativas en el valle del río Foyel, NO de la Patagonia argentina.

- Bosque (*Valdivia*), 30, 95-101.
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002009000200005&nrm=iso
- Hernández-González, O., Vergara-Yoisura, S., & Larqué-Saavedra, A. (2015). Primeras etapas de crecimiento de *Brosimum alicastrum* Sw. en Yucatán. *J Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(27), 38-49.
- López Martell, A., Fernández Concepción, R. R., & González Menéndez, M. J. R. C. d. C. F. (2018). Producción de biomasa aérea de *Bambusa vulgaris* Schrader ex Wendland en siete localidades de la provincia Granma. 6(3), 300-310.
- Mapes, C., & Basurto, F. (2016). Biodiversity and edible plants of Mexico. In R. Lira, A. Casas, & J. Blancas (Eds.), *Ethnobotany of Mexico: Interactions of people plants in Mesoamerica* (pp. 83-131). Springer.
- Mendoza-Castillo, H., Tzec-Sima, G., & Solorio-Sánchez, F. (2000). Efecto de las frecuencias de rebrote sobre la producción y calidad del follaje del árbol "Ramón"(*Brosimum alicastrum* Swartz). *Livestock Research for Rural Development*, 12(4), 1-5.
- Mika, A., Grochowska, M., & Karaszewska, A. (1991). Effect of pruning of young apple trees on content of nutrients and growth regulators in relation to fruit bud formation. I International Symposium on Training and Pruning of Fruit Trees 322,
- Muñoz Flores, H. J., Sáenz Reyes, J. T., Coria Avalos, V. M., García Magaña, J. d. J., Hernández Ramos, J., & Manzanilla Quijada, G. E. (2015). Calidad de planta en el vivero forestal La Dieta, Municipio Zitácuaro, Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(27), 72-89.
- Nepamuceno Martínez, F., De la Garza López de Lara, M. d. P., & Cuevas Rangel, R. A. (1994). Poda apical de plantas de *Pinus ayacahuite* var. *veitchii* Shaw en vivero. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 19(76), 3-14. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1030>
- Pardo-Tejada, E., & Sánchez-Muñoz, C. (1978). *Brosimum alicastrum: Recurso silvestre tropical desaprovechado*. Instituto de Investigaciones Sobre Recursos Bióticos, AC
- Pennington, T., & Sarukhan, J. (2005). *Árboles tropicales de México: manual para la identificación de las principales especies*. Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial.
- Peters, C. M. (1989). Reproduction, growth and the population dynamics of *Brosimum alicastrum* Sw. in a moist tropical forest of central Veracruz Yale University. New Haven, Usa.
- Peters, C. M., & Pardo-Tejeda, E. (1982). *Brosimum alicastrum* (Moraceae): uses and potential in Mexico. *Economic Botany*, 36(2), 166-175.
- Rajaona, Arisoa M., Brueck, H., & Asch, F. (2011). Effect of pruning history on growth and dry mass partitioning of jatropha on a plantation site in Madagascar. *Biomass and Bioenergy*, 35(12), 4892-4900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.017>
- Rueda-Sánchez, A., Benavides-Solorio, J. d. D., Saenz-Reyez, J., Muñoz Flores, H. J., Prieto-Ruiz, J. Á., & Orozco Gutiérrez, G. (2014). Calidad de planta producida en los viveros forestales de Nayarit. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(22), 58-73.
- Sáenz, R., Villaseñor, R., Muñoz, F., Rueda, A., & Prieto, R. (2010). Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. *Folleto Técnico*, 17, 48-48.
- Santillán Fernández, A., Calva Castillo, A., Vásquez Bautista, N., Huicab Pech, Z. G., Larqué Saavedra, A., & Bautista Ortega, J. (2021a). Balance hidro-climático de *Brosimum alicastrum* Sw. y su variabilidad ante escenarios de cambio climático en la Península De Yucatán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 44(1), 41-49. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.1.41>
- Santillán Fernández, A., Santiago Santes, O. V., Espinosa Grande, E., Huicab Pech, Z. G., Larqué Saavedra, F. A., & Bautista Ortega, J. (2021b). Propagación sexual y asexual de *Brosimum alicastrum* Swartz en Campeche, México. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 34(2), 105-116. <https://doi.org/10.17163/lgr.n34.2021.07>
- Subiria-Cueto, R., Larqué-Saavedra, A., Reyes-Vega, M. L., de la Rosa, L. A., Santana-Contreras, L. E., Gaytán-Martínez, M., Vázquez-Flores, A. A., Rodrigo-García, J.,

Recibido:
17/abril/2024

Aceptado:
7/noviembre/2024

Corral-Avitia, A. Y., Núñez-Gastélum, J. A., & Martínez-Ruiz, N. R. (2019). *Brosimum alicastrum* Sw. (Ramón): An Alternative to Improve the Nutritional Properties and Functional Potential of the Wheat Flour Tortilla. *Foods*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/foods8120613>

Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal* (Vol. 10). Universitat Jaume I.

Villalón-Mendoza, H. (2016). Indicadores de calidad de la planta de *Quercus canby* Trel. (encino) en vivero forestal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(1), 46-52. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlnr/article/view/250/185>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL ARBOLADO DE ALINEACIÓN EN XALAPA, VERACRUZ, MÉXICO

ASSESSMENT OF STREET TREES AND THEIR ECOSYSTEM SERVICES IN XALAPA, VERACRUZ, MEXICO

García Valencia, A., O. Sánchez Sánchez, A. Ramírez Soto y C.R. Ramos Palacios
DIAGNÓSTICO Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL ARBOLADO DE
ALINEACIÓN EN XALAPA, VERACRUZ, MÉXICO
ASSESSMENT OF STREET TREES AND THEIR ECOSYSTEM SERVICES IN
XALAPA, VERACRUZ, MEXICO



Diagnóstico y servicios ecosistémicos del arbolado de alineación en Xalapa, Veracruz, México**Assessment of street trees and their ecosystem services in Xalapa, Veracruz, Mexico**

Arturo García Valencia,
Odilón Sánchez Sánchez,
Aníbal Ramírez Soto, Carlos
Renato Ramos Palacios

**DIAGNÓSTICO Y
SERVICIOS
ECOSISTÉMICOS DEL
ARBOLADO DE
ALINEACIÓN EN XALAPA,
VERACRUZ, MÉXICO**

**ASSESSMENT OF STREET
TREES AND THEIR
ECOSYSTEM SERVICES IN
XALAPA, VERACRUZ,
MEXICO**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 159-180. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polibotanica.59.10](https://doi.org/10.18387/polibotanica.59.10)

Arturo García Valencia <https://orcid.org/0009-0002-7177-1139>

*Universidad Veracruzana, Facultad de Biología. Maestría en Ciencias Biológicas.
Círculo Presidentes 91010 Xalapa-Enríquez, Veracruz de Ignacio de la Llave, México*

Odilón Sánchez Sánchez. Autor de correspondencia: odsanchez@uv.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4296-1646>

*Universidad Veracruzana Centro de Investigaciones Tropicales, José María Morelos
44, Zona Centro, C.P. 91000. Xalapa Enríquez, Ver. México*

Aníbal Ramírez Soto <https://orcid.org/0009-0006-5591-5672>
Red de Viveros de Biodiversidad, C.P. 91500. Coatepec, Ver. México

Carlos Renato Ramos Palacios <https://orcid.org/0000-0002-3390-364x>

*Facultad del Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Niño Artillero 150,
Zona Universitaria, C.P. 78290, San Luis Potosí, S.L.P, México*

RESUMEN: Desde una perspectiva social, económica y ecológica, el arbolado urbano es un componente esencial en las ciudades. Este estudio evaluó la composición, distribución y provisión de servicios ecosistémicos (SE) de las especies arbóreas ubicadas en avenidas y calles públicas de Xalapa, Veracruz, abarcando zonas con distintos niveles de vulnerabilidad socioambiental. A través del programa *i-Tree Eco v6*, se analizaron los SE proporcionados por el arbolado a lo largo de 25 kilómetros de ejes viales, donde se registraron 1,411 árboles pertenecientes a 98 especies, predominando las especies introducidas (59%). Las especies más comunes fueron *Liquidambar styraciflua*, *Ficus benjamina* y *Fraxinus uhdei*. La valoración económica anual de los SE aportados por el arbolado de alineación ascendió a MXN 366,866.42, la remoción de contaminantes aportó el mayor valor con MXN 283,597.00. La prestación de SE fue significativamente diferente entre zonas con distintos niveles de vulnerabilidad socioambiental, siendo las zonas más vulnerables las que presentaron una menor capacidad para mitigar la contaminación atmosférica. Estos resultados enfatizan la necesidad de estrategias de gestión urbana que promuevan la conservación y expansión del arbolado de alineación, considerando tanto su valor ecológico como su aporte a la calidad de vida de los habitantes de la ciudad.

Palabras clave: dasonomía urbana, beneficios ambientales, valoración económica, gestión urbana.

ABSTRACT: From a social, economic, and ecological perspective, urban trees are an essential component of cities. This study evaluated the composition, distribution, and provision of ecosystem services by tree species located along avenues and public streets in Xalapa, Veracruz, encompassing areas with varying levels of socio-environmental vulnerability. Using the *i-Tree Eco v6* software, the ecosystem services provided by the trees along 25 kilometers of roadways were analyzed, with a total of 1,411 trees recorded, representing 98 species, with introduced species predominating (59%). The most common species were *Liquidambar styraciflua*, *Ficus benjamina*, and *Fraxinus uhdei*. The annual economic valuation of the ecosystem services provided by the street trees amounted to MXN 366,866.42, with air pollutant removal contributing the highest value at MXN 283,597.00. The provision of ecosystem services varied significantly across areas with different levels of socio-environmental vulnerability, with the most vulnerable

areas showing a reduced capacity to mitigate air pollution. These results highlight the need for urban management strategies that promote the conservation and expansion of street trees, considering both their ecological value and their contribution to the quality of life of city inhabitants.

Key words: urban forestry, environmental benefits, economic valuation, urban management.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento vertiginoso de las áreas urbanas a nivel global plantea desafíos importantes en términos de calidad de vida, sostenibilidad ambiental y gestión de los recursos naturales. Actualmente, más del 55% de la población humana reside en zonas urbanas y se proyecta que esta cifra aumentará significativamente en los próximos años (United Nations, 2018). Este proceso de urbanización acelerada conlleva una serie de problemas asociados, como la degradación ambiental, la mala calidad del aire, el aumento de las islas de calor (fenómeno urbano donde las temperaturas son significativamente más altas que en áreas rurales circundantes), los riesgos de inundaciones y la escasez de espacios verdes para la recreación y el esparcimiento (Escobedo, Kroeger, & Wagner, *Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices*, 2011) (Borelli, Chen, Conigliaro, & Salbitano, 2017) (Borelli, Conigliaro, & Pineda, *Los bosques urbanos en el contexto global*, 2018) (Boucher, Kroeger, McDonald, Wang, & Zhang, 2018).

En este contexto, los árboles en los espacios urbanos juegan un papel crucial en la provisión de SE, entendidos como los beneficios que los ecosistemas proporcionan a las personas. Estos servicios incluyen la mejora de la calidad del aire, la regulación térmica, la promoción de la biodiversidad, el bienestar humano, la mitigación de inundaciones, el aumento de la plusvalía de las propiedades y el fomento del sentido de comunidad (Brazel, Chow, Declet-Barreto, Harlan, & Martin, 2013) (de Vries, Groenewegen, Spreeuwenberg, & van Dillen, 2013) (Greenfield, Hoehn, Lapoint, & Nowak, 2013) (Bajnath, Bhatt, Gairola, Govender, & Ramdhani, 2015). Diversas investigaciones han demostrado que los beneficios económicos y sociales derivados del arbolado urbano pueden superar con creces los costos asociados a su mantenimiento, subrayando la necesidad de integrar estos valores en la planificación urbana para maximizar el retorno de la inversión en infraestructura verde (Calaza Martínez, Cariñanos, Escobedo Montoya, Schwab, & Tovar, 2018) (Tang, Guofan, & Groffman, 2024).

En la ciudad de Xalapa los programas de reforestación han sido una estrategia clave para enfrentar los desafíos asociados con el crecimiento urbano. Con una población de más de 480,000 habitantes, la ciudad cuenta con una rica diversidad de especies leñosas distribuidas en sus espacios públicos. Sin embargo, la gestión del arbolado presenta dificultades, particularmente en zonas con alta vulnerabilidad socioambiental, donde se ha observado una menor capacidad para proporcionar SE como la mitigación de la contaminación atmosférica (Falfán & MacGregor-Fors, 2016). La vulnerabilidad socioambiental es un factor clave en la planificación y manejo del arbolado urbano. Su análisis facilita una comprensión más profunda de los impactos diferenciados en los distintos sectores de la ciudad (Gómez-Baggethun & Barton, 2013). No obstante, muchas ciudades carecen de inventarios actualizados que evalúen no solo la cantidad de árboles, sino también el valor de los SE que brindan, lo que limita la implementación de estrategias de manejo efectivas. Disponer de esta información es crucial para identificar conflictos, necesidades y oportunidades de mejora en la gestión del arbolado (Molina-Pelegrín, Puig-Pérez, Riquenes-Valdés, & Sosa-López, 2011) (Koeser, Hauer, Norris, & Krouse, 2013). El presente trabajo evalúa la composición y distribución del arbolado de alineación en Xalapa y cuantifica los SE que proporciona mediante el programa *i-Tree Eco v6*. Además, se analiza la influencia de la vulnerabilidad socioambiental en la provisión de estos servicios, para una planificación y gestión más sostenible del arbolado urbano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la ciudad de Xalapa, Veracruz, una ciudad con una población de 480,841 habitantes, lo que representa el 6.15% de la población del estado. La zona urbana abarca una superficie de 64 km², con un rango altitudinal que varía entre 1,100 y 1,600 m. Su clima es semicálido húmedo con lluvias abundantes en verano al sureste y templado húmedo con lluvias todo el año al noroeste. La precipitación media anual es de 1368.2 mm. La temperatura media anual oscila entre 18-24°C. La vegetación natural predominante corresponde al bosque mesófilo de montaña. Las áreas urbanas se encuentran en lomerío de basalto y sierra volcánica, con suelos dominantes de Andosol y Regosol, que anteriormente estaban ocupados por agricultura, bosques y pastizales (Castillo-Campos, 1991) (Gómez-Columna & Soto-Esparza, 1993) (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009)

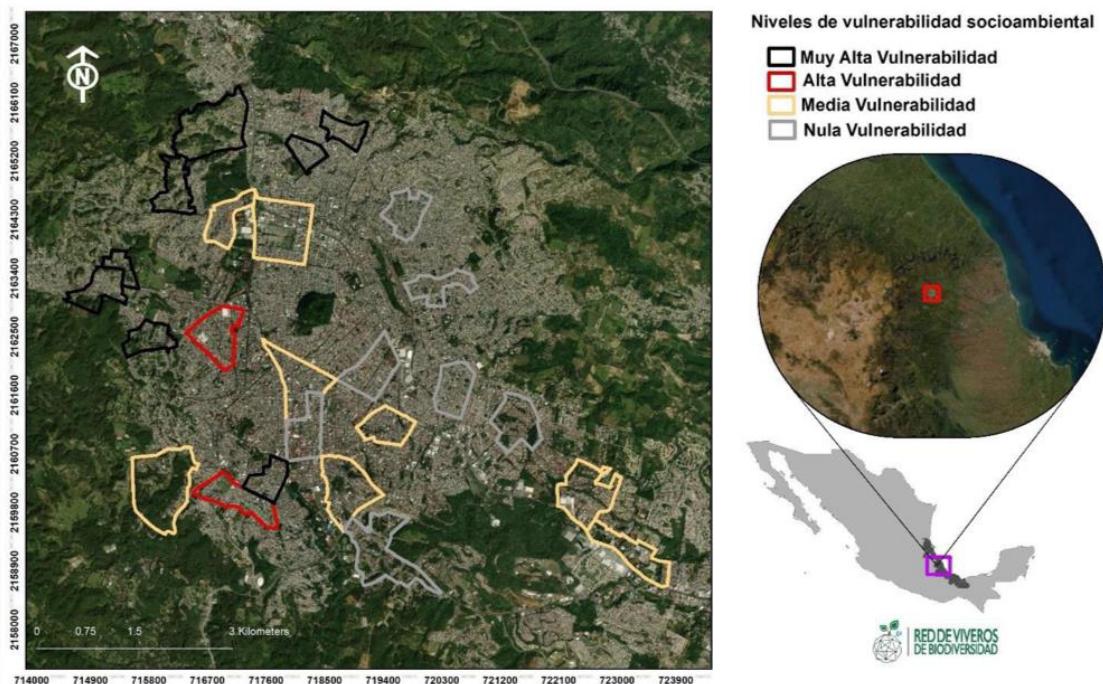
Selección de los sitios de muestreo

La selección de los sitios de muestreo se realizó utilizando las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) de la ciudad de Xalapa. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) una AGEB urbana es un área geográfica ocupada por conjuntos de manzanas perfectamente delimitadas y son asignadas al interior de las localidades urbanas, que corresponden a aquellas con población mayor o igual que 2,500 habitantes. Las AGEB se clasifican con base en la información del Censo de Población y Vivienda publicado por el INEGI y son reportadas por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). Esta clasificación utiliza variables climáticas y ecológicas para delimitar las zonas donde las personas, sus sistemas productivos y ecosistemas están más expuestos ante la acumulación de estos peligros y variables sociales y económicas para evaluar la vulnerabilidad socioeconómica a través de indicadores de vivienda (servicios y bienes), salud, discapacidad, población, educación-tecnología, género y economía (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social , 2020). Con base en dichas variables las AGEB determinan cinco niveles de vulnerabilidad socioambiental: muy alta, alta, media, baja y nula. En este contexto, el CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social , 2020) reportó para la ciudad de Xalapa en el año 2020 182 AGEB, de las cuales 58 con muy alta vulnerabilidad, 17 con alta vulnerabilidad, 58 con vulnerabilidad media y 49 con nula vulnerabilidad.

Tomando como base esta información se seleccionaron los sitios de muestreo utilizando un método modificado basado en Benavides-Meza y Villalón-Rojas (Benavides Meza & Villalón Rojas, 1992), que consistió en una selección aleatoria del 15% de las AGEB de la ciudad de Xalapa teniendo en cuenta cada uno de los niveles de vulnerabilidad, resultando ocho con muy alta vulnerabilidad, dos con alta vulnerabilidad, ocho con vulnerabilidad media y siete con vulnerabilidad nula.

La proporción de AGEB seleccionadas de cada categoría fue diseñada para reflejar el tamaño relativo de cada grupo y evitar sobrerepresentaciones. En cada AGEB seleccionada se trazaron cuatro transectos de 250 metros, abarcando tanto banquetas como camellones de las principales vías. La Figura 1 muestra la distribución espacial de las zonas de vulnerabilidad socioambiental donde se realizaron los muestreos.

Área de Estudio



Obtención de datos

Para un total acumulado de 25 km de ejes viales, se midieron todos los individuos arbóreos en cada transecto de 250 m, considerando las siguientes variables: altura total, diámetro normal (DAP \geq 2.5 cm a 1.30 cm partiendo de la base del tronco), altura de la copa viva, altura a la base de la copa, ancho de copa, porcentaje de copa ausente, porcentaje de luz en la copa, salud de la copa. También se midieron el ancho de las banquetas y los camellones. La identificación de especies se realizó mediante claves taxonómicas y muestras botánicas que fueron cotejadas con ejemplares del Herbario XAL del Instituto de Ecología en Xalapa, Veracruz. Las alturas se midieron con telémetro o flexómetro, el DAP con cinta diamétrica y las longitudes con longímetro y flexómetro.

Valoración de servicios ecosistémicos

Para calcular la provisión de SE proporcionados por el arbolado, que incluyen eliminación de contaminantes por monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de sulfuro (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y material particulado menor a 2.5 micrones (PM2.5); captura y almacenamiento de carbono (biomasa y secuestro de carbono); producción de oxígeno (basada en el secuestro de carbono) y escurrimiento evitado (precipitación interceptada por el arbolado), se utilizó el programa *i-Tree Eco v6* (USDA Forest Service, Davey Tree Expert Company, 2020), que es un conjunto de herramientas diseñadas por el Servicio Forestal de los Estados Unidos de América para cuantificar los servicios ambientales que proporciona el arbolado urbano y su impacto ambiental, social y económico (Lin, Kroll, & Nowak, 2020).

Con las variables obtenidas en los transectos para cada uno de los árboles se organizó una base de datos codificada para ser reconocida por el programa *i-Tree Eco v6*, el cual realiza los cálculos específicos para cada uno de los SE a través de componentes de análisis propios y por los precios estandarizados para cada uno de los servicios determinados. En este caso la valoración económica consideró los precios por tonelada métrica establecidos para México en 2022. El precio de la tonelada métrica (t) de CO fue de MXN 32,197, por t de O₃ MXN 431,943, por t de NO₂ MXN 64,515, por t de SO₂ MXN 23,505 y por t de PM2.5 MXN 14,993,790 (Hernández-Castán, Cuesta

Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023). En este estudio para convertir el precio de los SE en moneda extranjera (USD) se debe utilizar el tipo de cambio promedio de 2022, de MXN 20.12 por dólar estadounidense.

Para llevar a cabo el cálculo del almacenamiento de carbono en los árboles *i-Tree Eco* utiliza ecuaciones alométricas de (Jenkins, Chojnacky, Heath, & Birdsey, 2003) y (Nowak & Crane, 2002). Estas ecuaciones relacionan dimensiones físicas del árbol, como el DAP y la altura total, con su biomasa total, que incluye tanto la biomasa aérea (tronco, ramas, hojas) como la biomasa subterránea (raíces) y permiten estimar la biomasa en peso seco de los árboles. Para convertir esta biomasa en carbono almacenado, se utiliza un factor de conversión de 0.5, ya que aproximadamente el 50% de la biomasa seca de un árbol está compuesta por carbono, el uso del factor de 0.5 para estimaciones generales de carbono en árboles se sustenta en el trabajo de Birdsey (1992). El programa también asigna un valor económico al carbono almacenado. En este estudio, se utilizó el precio del carbono de MXN 870 por tonelada métrica, basado en datos del mercado del carbono en los Estados Unidos.

La producción de oxígeno se estimó indirectamente por *i-Tree Eco* a partir del cálculo de secuestro de carbono utilizando la siguiente relación: liberación neta de O₂ (kg/año) = secuestro neto de C (kg/año) x 32/12. La proporción 32/12 proviene del peso molecular del oxígeno (32 g/mol) frente al carbono (12 g/mol) (Nowak & Crane, 2002).

El escurrimiento superficial evitado se estimó a través de *i-Tree Eco* el cual utiliza datos sobre la capacidad de los árboles para interceptar el agua de lluvia y la cantidad promedio de precipitación en un año determinado, para este estudio se consideró el año 2022. En este caso, el promedio nacional para Estados Unidos se utilizó como base para calcular este valor, el cual luego se convierte a la moneda local (MXN) utilizando el tipo de cambio correspondiente. La tasa de MXN 44.91 por m³ de agua se calculó basándose en los costos promedio de gestión del agua en México (Peper, *et al.*, 2007).

Análisis estadístico

Se utilizó el programa Minitab® Statistical Software ver. 19 para realizar estadística descriptiva de los datos de especies leñosas sobre los ejes viales en las diferentes zonas de vulnerabilidad socioambiental, reportando medias y errores estándar. Se empleó el programa Past ver. 3 (Hammer, Harper, & Ryan, 2001) para estimar el índice de diversidad de Shannon-Weaver (H) (Shannon & Weaver, 1949) y el índice de Simpson (Magurran, 2004) como estimadores de la diversidad de especies, así como el índice de Chao-1 como estimador de la abundancia de especies (Chao, 1984). Estos índices se calcularon para el arbolado en general de Xalapa, así como para las diferentes condiciones de vulnerabilidad socioambiental y situaciones viales (banqueta y camellón).

Se realizó una prueba de Mann-Whitney (Conover, 1999) para verificar si existen diferencias significativas en el DAP, la altura y el ancho de copa de los árboles entre la banqueta y el camellón. La razón para comparar estos dos entornos se basa en la hipótesis de que las condiciones de crecimiento para los árboles pueden ser significativamente diferentes entre estos dos tipos de infraestructura urbana.

Se llevó a cabo un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para determinar si existen diferencias significativas entre el DAP, la altura, el ancho de copa de los árboles, el ancho de la banqueta y los camellones en las diferentes zonas de vulnerabilidad socioambiental. Antes de realizar el ANOVA, se verificaron los supuestos de normalidad de varianzas. Para comprobar la normalidad de los datos, se utilizó la prueba de Shapiro & Wilk (1965). Una vez que el ANOVA identificó diferencias significativas, se aplicó la prueba post-hoc de Tukey, que permite realizar comparaciones múltiples entre las diferentes zonas de vulnerabilidad para identificar específicamente cuáles de ellas presentan diferencias significativas entre sí.

RESULTADOS

Composición del arbolado

Se registró un total de 1411 árboles en los ejes viales estudiados, del total 998 se registró en banquetas y 413 en camellones. Se identificaron 98 especies, pertenecientes a 73 géneros y 44 familias. El 59% de las especies son introducidas. De las 40 especies nativas encontradas para México 33 son propias del bosque mesófilo de montaña o se encuentran adaptadas a este ambiente (Rzedowski, 1996) (Gual Díaz, 2024),

Cuadro 1. Listado de especies del arbolado de alineación evaluado en la ciudad de Xalapa, Veracruz (ordenado alfabéticamente de acuerdo a las familias).

Table 1. List of street tree species evaluated in the city of Xalapa, Veracruz (ordered alphabetically by family).

| Familia | Nombre científico | Introducida | Nativa | # Ind. |
|---------------|---|-------------|--------|--------|
| Adoxaceae | <i>Sambucus nigra</i> L. | X | | 2 |
| Altingiaceae | <i>Liquidambar styraciflua</i> L.* | | X | 210 |
| Anacardiaceae | <i>Mangifera indica</i> L. | X | | 3 |
| Annonaceae | <i>Annona cherimola</i> Mill. | X | | 1 |
| Annonaceae | <i>Annona muricata</i> L. | | X | 3 |
| Apocynaceae | <i>Nerium oleander</i> L. | X | | 19 |
| Araliaceae | <i>Dendropanax arboreus</i> (L.) Decne. & Planch.* | | X | 4 |
| Araliaceae | <i>Oreopanax xalapensis</i> (Kunth) Decne. & Planch.* | | X | 1 |
| Araliaceae | <i>Oreopanax capitatus</i> (Jacq.) Decne. & Planch.* | | X | 2 |
| Araucaceae | <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol.) Kuntze. | X | | 3 |
| Araucaceae | <i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco. | X | | 5 |
| Arecaceae | <i>Adonidia merrillii</i> (Becc.) Becc. | X | | 12 |
| Arecaceae | <i>Dypsis lutescens</i> (H. Wendl.) Beentje & Dransf. | X | | 9 |
| Arecaceae | <i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman. | X | | 29 |
| Arecaceae | <i>Washingtonia robusta</i> H. Wendl. | | X | 2 |
| Asparagaceae | <i>Beaucarnea recurvata</i> Lem. | | X | 4 |
| Asparagaceae | <i>Dracaena fragrans</i> (L.) Ker Gawl. | X | | 7 |
| Asparagaceae | <i>Yucca gloriosa</i> L. | X | | 1 |
| Asparagaceae | <i>Yucca guatemalensis</i> Baker. | | X | 5 |
| Asparagaceae | <i>Yucca</i> sp | | | 5 |
| Betulaceae | <i>Carpinus caroliniana</i> Walter.* | | X | 1 |
| Bignoniaceae | <i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don. | X | | 66 |
| Bignoniaceae | <i>Spathodea campanulata</i> P. Beauv. | X | | 22 |
| Bignoniaceae | <i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) DC.* | | X | 2 |
| Boraginaceae | <i>Ehretia tinifolia</i> L.* | | X | 2 |
| Burseraceae | <i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.* | | X | 4 |
| Caricaceae | <i>Carica papaya</i> L.* | | X | 4 |
| Casuarinaceae | <i>Casuarina equisetifolia</i> L. | X | | 20 |
| Celastraceae | <i>Zinowiewia integerrima</i> (Turcz.) Turcz.* | | X | 1 |
| Combretaceae | <i>Terminalia catappa</i> L. | X | | 2 |
| Compositae | <i>Vernonanthura phosphorica</i> (Vell.) H.Rob. | X | | 1 |
| Cupressaceae | <i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl | | X | 8 |
| Cupressaceae | <i>Cupressus lusitanica</i> Mill.* | | X | 18 |

| Familia | Nombre científico | Introducida | Nativa | # Ind. |
|----------------|---|-------------|--------|--------|
| Cupressaceae | <i>Cupressus lusitanica</i> var. <i>benthamii</i> (Endl.) | X | | 13 |
| Cupressaceae | <i>Cupressus macrocarpa</i> Hartw. | X | | 14 |
| Cupressaceae | <i>Cupressus sempervirens</i> L. | X | | 95 |
| Cupressaceae | <i>Juniperus chinensis</i> L. | X | | 2 |
| Euphorbiaceae | <i>Alchornea latifolia</i> Sw. | | X | 2 |
| Euphorbiaceae | <i>Cnidoscolus aconitifolius</i> (Mill.) I.M.Johnst.* | | X | 3 |
| Euphorbiaceae | <i>Euphorbia cotinifolia</i> L. | X | | 3 |
| Euphorbiaceae | <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd. ex Klotzsch.* | | X | 2 |
| Lauraceae | <i>Persea americana</i> Mill.* | | X | 32 |
| Lauraceae | <i>Persea schiedeana</i> Nees.* | | X | 1 |
| Leguminosae | <i>Bauhinia variegata</i> L. | X | | 53 |
| Leguminosae | <i>Cassia fistula</i> L. | X | | 1 |
| Leguminosae | <i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf. | X | | 5 |
| Leguminosae | <i>Erythrina americana</i> Mill.* | | X | 2 |
| Leguminosae | <i>Inga jinicuil</i> Schltld. & Cham. ex G.Don.* | | X | 8 |
| Leguminosae | <i>Senna didymobotrya</i> (Fresen.) H.S.Irwin & | X | | 3 |
| Lythraceae | <i>Lagerstroemia indica</i> L. | X | | 2 |
| Lythraceae | <i>Punica granatum</i> L. | X | | 3 |
| Magnoliaceae | <i>Magnolia grandiflora</i> L. | X | | 4 |
| Malvaceae | <i>Heliocarpus donnellsmithii</i> Rose.* | | X | 2 |
| Malvaceae | <i>Hibiscus rosa-sinensis</i> L. | X | | 15 |
| Malvaceae | <i>Malvaviscus arboreus</i> Dill. ex Cav.* | | X | 4 |
| Meliaceae | <i>Trichilia havanensis</i> Jacq.* | | X | 13 |
| Moraceae | <i>Artocarpus heterophyllus</i> Lam. | X | | 1 |
| Moraceae | <i>Ficus benjamina</i> L. | X | | 153 |
| Moraceae | <i>Ficus microcarpa</i> L.f. | X | | 7 |
| Myrtaceae | <i>Luma apiculata</i> (DC.) Burret | X | | 2 |
| Myrtaceae | <i>Psidium guajava</i> L.* | | X | 24 |
| Myrtaceae | <i>Syzygium paniculatum</i> Gaertn. | X | | 2 |
| Myrtaceae | <i>Pimenta dioica</i> (L.) Merr. | X | | 1 |
| Nyctaginaceae | <i>Bougainvillea glabra</i> Choisy | X | | 10 |
| Nyctaginaceae | <i>Bougainvillea spectabilis</i> Willd. | X | | 6 |
| Oleaceae | <i>Fraxinus excelsior</i> L. | X | | 1 |
| Oleaceae | <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh.* | | X | 130 |
| Oleaceae | <i>Ligustrum lucidum</i> W.T.Aiton | X | | 25 |
| Papaveraceae | <i>Bocconia frutescens</i> L.* | | X | 5 |
| Platanaceae | <i>Platanus mexicana</i> Moric.* | | X | 65 |
| Pinaceae | <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltld. & Cham.* | | X | 3 |
| Piperaceae | <i>Piper auritum</i> Kunth.* | | X | 3 |
| Pittosporaceae | <i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton. | X | | 2 |
| Proteaceae | <i>Grevillea robusta</i> A.Cunn. ex R.Br. | X | | 21 |
| Proteaceae | <i>Macadamia integrifolia</i> Maiden & Betche. | X | | 4 |
| Rosaceae | <i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl. | X | | 34 |
| Rosaceae | <i>Prunus persica</i> (L.) Batsch | X | | 16 |

| Familia | Nombre científico | Introducida | Nativa | # Ind. |
|-------------|--|-------------|--------|--------|
| Rosaceae | <i>Prunus serotina</i> Ehrh.* | | X | 2 |
| Rubiaceae | <i>Coffea arabica</i> L. | X | | 9 |
| Rutaceae | <i>Casimiroa edulis</i> La Llave.* | | X | 1 |
| Rutaceae | <i>Citrus x aurantifolia</i> (Christm.) Swingle. | X | | 12 |
| Rutaceae | <i>Citrus x aurantium</i> L. | X | | 19 |
| Rutaceae | <i>Citrus x limon</i> (L.) Osbeck. | X | | 11 |
| Rutaceae | <i>Citrus x limonia</i> (L.) Osbeck | X | | 3 |
| Rutaceae | <i>Citrus medica</i> L. | X | | 4 |
| Rutaceae | <i>Citrus reticulata</i> Blanco. | X | | 18 |
| Rutaceae | <i>Citrus x sinensis</i> (L.) Osbeck. | X | | 24 |
| Rutaceae | <i>Citrus x paradisi</i> Macfad. | X | | 1 |
| Sabiaceae | <i>Meliosma alba</i> (Schltdl.) Walp.* | | X | 1 |
| Solanaceae | <i>Brunfelsia americana</i> L. | | X | 2 |
| Solanaceae | <i>Brugmansia arborea</i> (L.) Sweet. | X | | 7 |
| Solanaceae | <i>Brugmansia suaveolens</i> (Humb. & Bonpl. ex Humb.) | X | | 1 |
| Solanaceae | <i>Cestrum nocturnum</i> L.* | X | | 2 |
| Solanaceae | <i>Solanum mauritianum</i> Scop. | X | | 2 |
| Ulmaceae | <i>Ulmus mexicana</i> (Liebm.) Planch.* | | X | 7 |
| Ulmaceae | <i>Ulmus parviflora</i> Jacq. | X | | 1 |
| Theaceae | <i>Camellia japonica</i> L. | X | | 2 |
| Verbenaceae | <i>Duranta erecta</i> L.* | | X | 7 |

*Especies propias del bosque mesófilo de montaña (BMM)

Con las variables medidas en campo y mediante la aplicación del programa i Tree Eco v6 se estimó que el arbolado de los ejes viales estudiados cubre una superficie total de 6.75 hectáreas y proporciona 17.01 hectáreas de área foliar, reflejando una amplia distribución entre las zonas analizadas. Las especies dominantes en términos de área foliar son *L. styraciflua*, *F. uhdei* y *F. benjamina*. Las cinco especies más comunes fueron: *L. styraciflua*, *F. benjamina*, *F. uhdei*, *C. sempervirens* y *P. mexicana* (Figura 2).

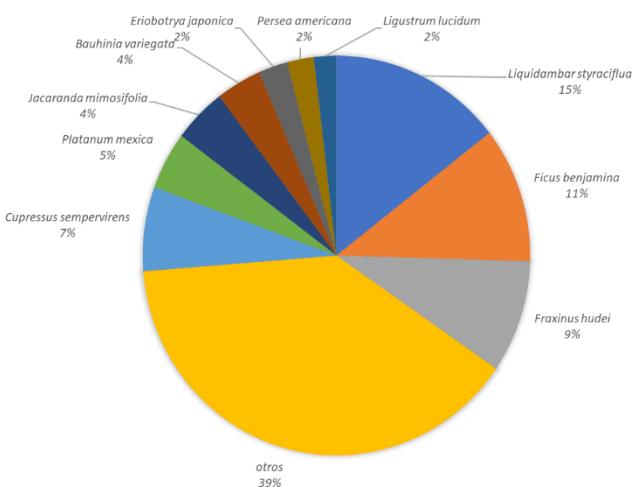


Figura 2. Composición de especies del arbolado de alineación en la ciudad de Xalapa, Veracruz.

Figure 2. Species composition of street trees in the city of Xalapa, Veracruz.

Riqueza, abundancia y diversidad de especies

En cuanto a su ubicación y de manera general, el arbolado que se registró en las banquetas presentó una mayor diversidad de especies (Shannon 3.6, Simpson 0.95) y una mayor abundancia estimada (Chao-1: 118 taxa) en comparación con los camellones (Shannon 2.6, Simpson 0.87, Chao-1: 61 taxa). Este resultado indica que los camellones podrían ser objeto de una mejor gestión para incrementar su diversidad y, en consecuencia, su capacidad para ofrecer SE. De los árboles situados en banqueta es posible encontrar 39 ± 8 árboles/km. En las zonas de alta vulnerabilidad se registraron 108 ± 27 árboles/km, en zonas con vulnerabilidad media 54 ± 13 árboles/km, en zonas de vulnerabilidad nula 24 ± 12 árboles/km y en zonas de muy alta vulnerabilidad 21 ± 5 árboles/km. De acuerdo con los resultados reportados en el Cuadro 2, la cantidad de especies y el número de individuos varían entre las zonas con diferente nivel de vulnerabilidad. Las zonas de media vulnerabilidad presentan la mayor riqueza de especies (75) y abundancia (709 individuos). Esto sugiere que estas zonas pueden estar en una situación intermedia, donde las condiciones ambientales o de manejo favorecen una mayor diversidad de especies en comparación con zonas de muy alta o nula vulnerabilidad.

Cuadro 2. Índices de diversidad comparando zonas con diferente nivel de vulnerabilidad socioambiental**Table 2.** Diversity indices comparing areas with different levels of socio-environmental vulnerability.

| Nivel de vulnerabilidad | AGEB | Especies | N | Shannon H | Simpson | Chao 1 |
|-------------------------|------|----------|------|-----------|---------|--------|
| Muy alta | 8 | 48 | 217 | 3.26 | 0.93 | 63 |
| Alta | 2 | 50 | 218 | 2.86 | 0.85 | 78 |
| Media | 8 | 75 | 709 | 3.06 | 0.89 | 133 |
| Nula | 7 | 60 | 267 | 3.30 | 0.92 | 81 |
| Xalapa | 25 | 98 | 1411 | 3.50 | 0.94 | 140 |

AGEB (Áreas Geoestadísticas Básicas). N (Número de individuos)

En contraste, la zona de alta vulnerabilidad tiene una baja riqueza de especies (50) y abundancia (218), lo que podría indicar condiciones más restrictivas para el crecimiento de un arbolado más diverso, posiblemente debido a factores socioeconómicos o de infraestructura. Con relación al índice de Shannon, que mide la diversidad considerando tanto la riqueza como la equitatividad de las especies, es mayor en las zonas de nula vulnerabilidad (3.30) y muy alta vulnerabilidad (3.26), y menor en la zona de alta vulnerabilidad (2.86). Esto indica que las zonas de nula y muy alta vulnerabilidad tienen una distribución de especies más equitativa, lo que podría sugerir que, aunque tengan menos especies, estas están más equilibradas en términos de abundancia. El índice de Simpson, que mide la dominancia de especies, muestra un patrón similar. Las zonas de muy alta (0.93) y nula vulnerabilidad (0.92) tienen valores altos, lo que indica una menor dominancia de unas pocas especies y, por tanto, una comunidad más equitativa en comparación con la zona de alta vulnerabilidad (0.85). El estimador de Chao 1 predice una mayor riqueza potencial de especies en las zonas de media vulnerabilidad (133) y Xalapa en general (140), lo que sugiere que estas áreas podrían albergar una mayor diversidad si se consideraran especies menos frecuentes o submuestreadas. La zona de alta vulnerabilidad tiene el valor de Chao 1 más bajo (78), lo que refuerza la idea de que esta área es la menos diversa y podría estar experimentando condiciones desfavorables para la diversidad de especies. Estos resultados indican que las zonas de media vulnerabilidad tienen la mayor riqueza de especies y abundancia, lo que podría convertirlas en áreas prioritarias para la conservación y gestión. Las zonas de alta vulnerabilidad, con menor diversidad y abundancia, podrían necesitar intervenciones específicas para mejorar las condiciones que favorezcan la diversidad. Las zonas de nula y muy alta vulnerabilidad, a pesar de tener menos especies, muestran una mayor equitatividad en la distribución de las especies, lo que también es valioso desde una perspectiva de conservación. Estos hallazgos tienen implicaciones directas para la gestión del arbolado de alineación, sugiriendo la necesidad de estrategias diferenciadas para fomentar la diversidad en zonas más vulnerables.

Características dasométricas del arbolado

Las características dasométricas (diámetro, altura y ancho de copa) del arbolado en banquetas y camellones mostraron variaciones significativas según el nivel de vulnerabilidad socioambiental. En promedio, los árboles en las zonas de vulnerabilidad media y nula presentaron mayores valores de diámetro, altura y ancho de copa en comparación con las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad. Además, los árboles ubicados en camellones mostraron consistentemente mayores valores en todas las características dasométricas en comparación con los árboles situados en banquetas. El diámetro promedio del arbolado fue mayor en las zonas de vulnerabilidad media (26.52 ± 1.45 cm) y nula (23.47 ± 2.03 cm), mientras que en las zonas de alta (15.03 ± 1.02 cm) y muy alta vulnerabilidad (14.28 ± 1.42 cm) se observaron diámetros significativamente menores ($F=16.07$, $p<0.001$). En cuanto a la altura promedio, los valores más altos se encontraron en las zonas de vulnerabilidad media (9.29 ± 0.38 m) y nula (8.97 ± 0.55 m), con diferencias significativas respecto a las zonas de alta (6.63 ± 0.29 m) y muy alta vulnerabilidad (5.28 ± 0.31 m) ($F=17.64$, $p<0.001$). El ancho de copa también siguió un patrón similar, siendo mayor en las zonas de vulnerabilidad nula (6.59 ± 0.45 m) y media (6.33 ± 0.23 m), y menor en las zonas de alta (3.03 ± 0.21 m) y muy alta vulnerabilidad (4.26 ± 0.32 m) ($F=36.66$, $p<0.001$). Los árboles en camellones presentaron diámetros (31.33 ± 1.32 cm), alturas (13.1 ± 0.46 m) y anchos de copa (8.54 ± 0.32 m) significativamente mayores que los árboles en banquetas (diámetro: 21.79 ± 0.8 cm; altura: 7.98 ± 0.21 m; ancho de copa: 5.2 ± 0.15 m) según las pruebas estadísticas aplicadas ($p<0.001$). Esto sugiere que las mejores condiciones espaciales y de recursos en los camellones favorecen un mayor desarrollo del arbolado en comparación con las banquetas (Cuadro 3).

Cuadro 3. Características dasométricas del arbolado de alineación comparando zonas con diferente nivel de vulnerabilidad socioambiental.

Table 3. Dendrometric characteristics of street trees comparing areas with different levels of socio-environmental vulnerability.

| Nivel de vulnerabilidad y ubicación | Diámetro (cm) | Altura (m) | Ancho de copa (m) |
|-------------------------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| Nula | 23.47 ± 2.03 | 8.97 ± 0.55 | 6.59 ± 0.45 |
| Media | 26.52 ± 1.45 | 9.29 ± 0.38 | 6.33 ± 0.23 |
| Alta | 15.03 ± 1.02 | 6.63 ± 0.29 | 3.03 ± 0.21 |
| Muy alta | 14.28 ± 1.42 | 5.28 ± 0.31 | 4.26 ± 0.32 |
| Camellón | 31.33 ± 1.32 | 13.1 ± 0.46 | 8.54 ± 0.32 |
| Banqueta | 21.79 ± 0.8 | 7.98 ± 0.21 | 5.2 ± 0.15 |

Servicios ecosistémicos y valoración económica

Mediante la aplicación del programa *i-Tree Eco v6* se estimó que el total de los árboles analizados eliminan anualmente 351.07 kg de contaminantes del aire, incluyendo ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y material particulado menor a 2.5 micrones (PM2.5). El valor económico estimado de este servicio se calculó en MXN 283,597.00/año (USD 14,094.68/año). Los mayores aportes a este valor provienen de la eliminación de PM2.5 y O₃, lo que refleja tanto la capacidad del arbolado para mitigar contaminantes clave como la variabilidad en el valor económico asociado a la eliminación de estos compuestos (Figura 3). Las especies que más contribuyen a mejorar la calidad del aire son *L. styraciflua*, *F. uhdei*, *F. benjamina*, *J. mimosifolia* y *P. mexicana*. Esta contribución se debe principalmente a su abundancia en las áreas evaluadas, ya que el programa *i-Tree Eco v6* realiza sus estimaciones basándose en la cantidad y distribución de los árboles, más que en características fisiológicas específicas de las especies. De manera individual especies como *C. edulis*, *H. donnellsmithii*, *M. alba*, *C. caroliniana*, *G. robusta* y *D. regia* también son eficientes para mitigar contaminantes atmosféricos. Esta eficiencia se

calculó en función de sus atributos estructurales, como el tamaño del árbol y su área foliar, lo que permitió al programa *i-Tree Eco v6* evaluar su capacidad para interceptar y absorber contaminantes de manera independiente, sin depender de su abundancia relativa.

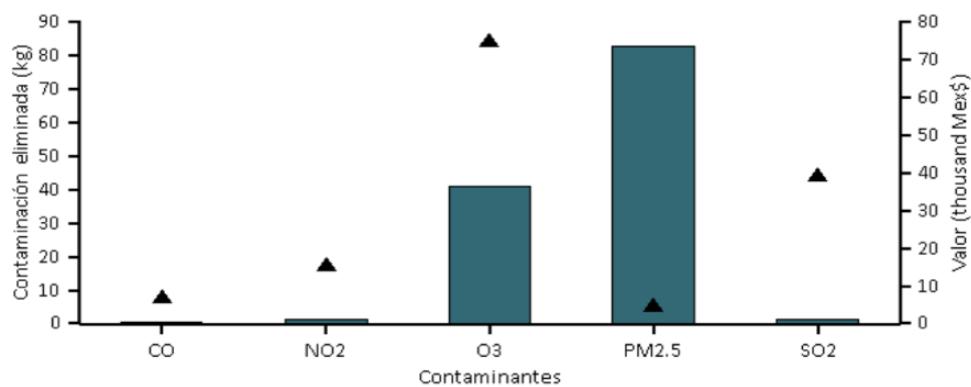


Figura 3. Eliminación anual de contaminantes por el arbolado de alineación de la ciudad de Xalapa, Veracruz, y valor económico de este servicio ecosistémico. En el eje X se encuentran los tipos de contaminantes, en el eje Y izquierdo, las barras representan la cantidad de contaminación eliminada (kg), mientras que, en el eje Y derecho, los triángulos representan el valor económico por la eliminación de cada contaminante.

Figure 3. Annual pollutant removal by street trees in the city of Xalapa, Veracruz, and the economic value of this ecosystem service. The X-axis shows the types of pollutants, the left Y-axis shows the amount of pollution removed (kg) represented by bars, while the right Y-axis shows the economic value of pollutant removal, represented by triangles.

El análisis de los SE proporcionados por el arbolado urbano en zonas con diferentes niveles de vulnerabilidad socioambiental mostró que la zona de vulnerabilidad media es la que brinda mayores beneficios ambientales (Cuadro 4). Esta zona removió 205.89 kg de contaminantes del aire al año, principalmente gracias a *L. styraciflua*, *F. uhdei* y *J. mimosifolia*, cuya contribución se relaciona más con su abundancia que con rasgos específicos de sus hojas. El programa *i-Tree Eco v6* realiza sus estimaciones basándose en la cantidad y distribución de los árboles, lo que explica el predominio de estas especies en los resultados. En la zona de vulnerabilidad nula, *F. benjamina*, *L. styraciflua* y *F. uhdei* fueron las especies que más contribuyeron a la remoción de contaminantes, mientras que en la zona de alta vulnerabilidad destacaron *P. mexicana*, *C. sempervirens* y *G. robusta*. En la zona de muy alta vulnerabilidad, las especies más efectivas fueron *P. mexicana*, *F. benjamina* y *B. variegata*. La zona de vulnerabilidad media también lideró en términos de secuestro de carbono (13.99 t/año), almacenamiento de carbono (211.73 t) e interceptación de aguas pluviales (924.27 m³/año), con una valoración económica de MXN 186,327.46 netos y MXN 233,220.37 anuales. En contraste, las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad presentaron menores valores en todos los indicadores, reflejando la necesidad de intervenciones para mejorar la calidad y densidad del arbolado y, por ende, los SE.

Cuadro 4. Servicios ecosistémicos y valoración económica de las diferentes zonas de vulnerabilidad socioambiental.

Table 4. Ecosystem services and economic valuation across different socio-environmental vulnerability zones.

| Tipo deservicio | Servicios ecosistémicos | Muy alta | Alta | Media | Nula |
|-----------------|---|-------------|-------------|--------------|-------------|
| A | Secuestro anual de Carbono (t/año) | 1.5 | 3.02 | 13.99 | 3.38 |
| N | Almacenamiento de Carbono (t) | 23.5 | 34.3 | 211.73 | 112.6 |
| A | Remoción de Contaminantes atmosféricos(kg/año) | 33.3 | 14.39 | 205.89 | 97.47 |
| A | Interceptación de aguas pluviales (m ³ /año) | 107.63 | 59.81 | 924.27 | 340.18 |
| | Valoración de servicio Neto (MX) | \$20,019.01 | \$28,997.13 | \$186,327.46 | \$97,149.4 |
| | Valoración de servicios Anual (MX) | \$20,266 | \$17,356.56 | \$233,220.37 | \$96,023.49 |

A: anual, N: neto; t= toneladas

Secuestro y almacenamiento de carbono

El secuestro bruto de carbono registrado fue de 21.89 toneladas por año, con un valor económico estimado en MXN 19,007/año. Este valor relativamente bajo se debe a que el programa *i-Tree Eco v6* utiliza precios estandarizados basados en parámetros económicos internacionales, que pueden no reflejar completamente las condiciones económicas locales. Las especies que más carbono secuestran son *F. uhdei*, *L. styraciflua*, *F. benjamina*, *P. mexicana* y *J. Mimosifolia* lo que se relaciona con su abundancia en las zonas estudiadas (Figura 4 A). Por otro lado, el almacenamiento total de carbono se estimó en 382 t, con un valor económico de MXN 332,493. La mayor parte del carbono almacenado se encuentra en estas mismas especies dominantes, con una mayor contribución al almacenamiento de carbono por parte de *F. uhdei* y *L. styraciflua* (Figura 4 B). Si consideramos la distribución del secuestro y almacenamiento de carbono por zonas de vulnerabilidad, más del 50% del secuestro anual de carbono (13.99 t) ocurrió en las áreas de vulnerabilidad media. Igualmente, en estas zonas se concentró la mayor cantidad de carbono almacenado (211.73 t). A nivel individual, especies menos abundantes como *M. alba*, *C. edulis*, *H. donnellsmithii*, *U. mexicana*, *C. lusitanica* var. *benthamii*, *C. equisetifolia* y *E. tinifolia* también demostraron una alta eficiencia en el secuestro y almacenamiento de carbono, lo que se atribuye a sus características estructurales (tamaño y área foliar).

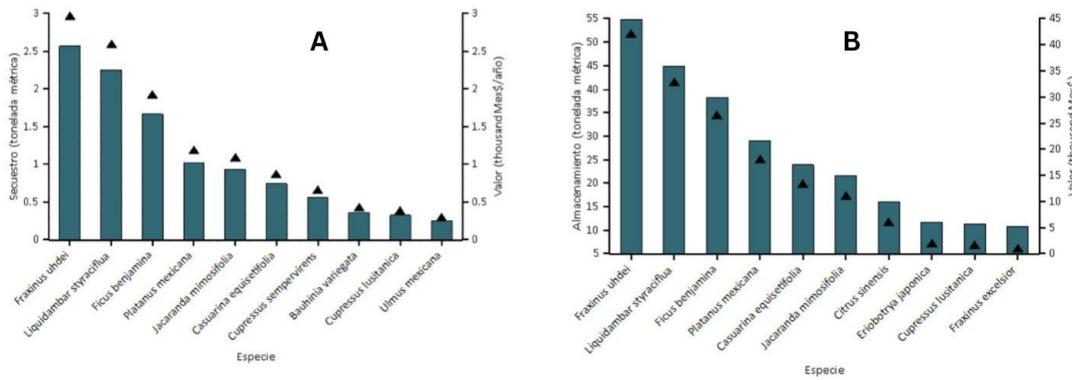


Figura 4. Captura y almacenamiento de carbono por las principales especies del arbolado de alineación de la ciudad de Xalapa, Veracruz. Panel A Captura anual de carbono en toneladas métricas (barras) y su valor económico asociado en miles de MXN (triángulos). Panel B Almacenamiento total de carbono en toneladas métricas (barras) y su valor económico asociado en miles de MXN (triángulos). Las especies están ordenadas en cada panel de acuerdo con la cantidad de carbono secuestrado o almacenado.

Figure 4. Carbon sequestration and storage by the main street tree species in the city of Xalapa, Veracruz. Panel A: Annual carbon sequestration in metric tons (bars) and its associated economic value in thousands of MXN (triangles). Panel B: Total carbon storage in metric tons (bars) and its associated economic value in thousands of MXN (triangles). The species in each panel are ordered according to the amount of carbon sequestered or stored.

Producción de oxígeno

Se estimó que los árboles analizados en el estudio producen un total de 58.38 toneladas de oxígeno al año. No obstante, no se presentaron diferencias claras entre las distintas zonas de vulnerabilidad para este servicio ecosistémico. Aunque el programa estima la cantidad de oxígeno que los árboles producen anualmente, no asigna un valor monetario a este servicio debido a que en la metodología de *i-Tree Eco v6* (USDA Forest Service, Davey Tree Expert Company, 2020), el oxígeno es considerado un recurso abundante y su provisión por los árboles urbanos representa una pequeña proporción del total producido por otros ecosistemas.

Escurrimiento de agua evitado

El arbolado medido en este estudio ayuda a reducir los escurrimientos de 1,431.9 m³ de agua al año, con un valor económico estimado de MXN 64,263/año (Figura 5). Este servicio es más efectivo en zonas de media vulnerabilidad, donde el arbolado intercepta 924.27 m³ de agua al año. El conjunto de especies que más contribuyen a este servicio son *F. benjamina*, *L. styraciflua*, *F. uhdei* y *J. mimosifolia*. A nivel individual, especies como *H. donnellsmithii*, *P. mexicana*, *M. alba*, *U. mexicana*, *C. lusitanica* var. *benthamii* y *E. tinifolia* también son útiles para evitar escurrimientos. En este sentido es importante destacar que las estimaciones de escurrimiento evitado están basadas en los modelos proporcionados por *i-Tree Eco v6*, los cuales consideran principalmente las características estructurales de los árboles, como el diámetro del tronco y el área foliar, para calcular su capacidad de interceptación de agua. Sin embargo, el programa no incorpora directamente el tipo de suelo o la ubicación específica de los árboles (por ejemplo, en banquetas o parques), lo que podría influir en la precisión de los resultados bajo ciertas condiciones locales.

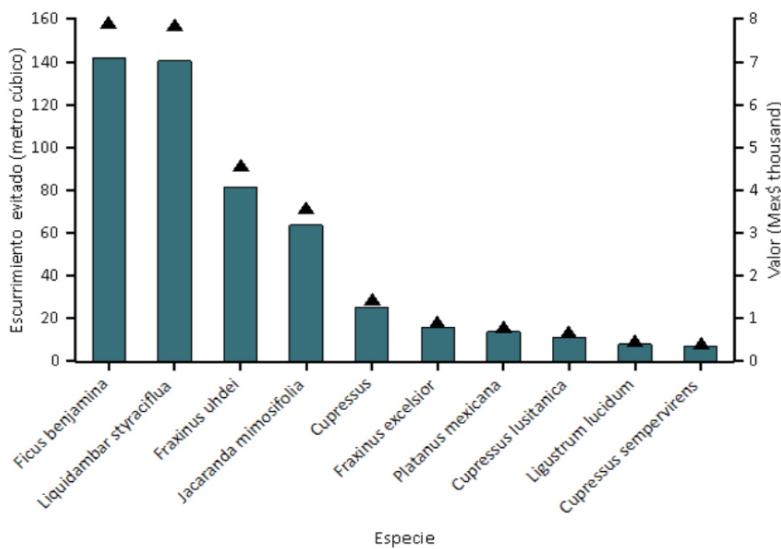


Figura 5. Escurrimiento de agua evitado por las principales especies del arbolado de alineación de la ciudad de Xalapa, Veracruz. Las especies están ordenadas de manera descendente según el volumen de escurrimiento evitado (m³), representado por las barras. Los triángulos indican el valor económico correspondiente (en miles de MXN) por el escurrimiento evitado para cada especie.

Figure 5. Water runoff avoided by the main street tree species in the city of Xalapa, Veracruz. The species are listed in descending order according to the volume of runoff avoided (m³), represented by bars. The triangles indicate the corresponding economic value (in thousands of MXN) for the avoided runoff per species.

DISCUSIÓN

Arbolado de alineación

El presente estudio reveló una notable riqueza de especies en el arbolado de alineación de Xalapa. Sin embargo, el 59% de las 98 especies registradas son introducidas, un patrón común en muchas ciudades de México (Canizales Velázquez, Alanís Rodríguez, Holguín Estrada, García García, & Chávez Costa, 2020) (Martínez Juárez, Rodríguez Trejo, Granados Sánchez, Mohedano Caballero, & Villanueva Morales, 2022) (Almeida-Cerino, Bertolini, & Martinez-Trinida, 2024). Esta tendencia está asociada a programas históricos de reforestación que favorecieron la introducción de especies no nativas debido a su disponibilidad, rápida adaptación y crecimiento (Flores & Glafiro, 2005) (Delgado , 2019), así como a la limitada disponibilidad de especies nativas (Morales-Gallegos, *et al.*, 2023). Al respecto, en el arbolado de alineación de Xalapa se registraron 40 especies nativas de las cuales 33 son propias del bosque mesófilo de montaña, lo que resulta relevante. Sin embargo, la presencia de muchas de ellas se ve minimizada al considerar que especies como *O. xalapensis*, *C. caroliniana*, *Z. integrerrimum* y *P. schiedeana*, estuvieron representadas apenas por un solo individuo, mientras que especies introducidas como *F. benjamina*, *J. mimosifolia*, *B. variegata* y *C. sempervirens* concentraron el 26% de los 1411 individuos registrados. Estos resultados destacan la necesidad de fomentar y priorizar la plantación de especies nativas, que además de estar adaptadas al entorno local, pueden contribuir a la biodiversidad y ofrecer mayor resiliencia frente a plagas y enfermedades (Borelli, Chen, Conigliaro, & Salbitano, 2017), así como reducir el riesgo de daños a la infraestructura, facilitando una gestión más eficiente y sostenible (Koeser, Hauer, Norris, & Krouse, 2013).

Entre las especies introducidas que causan más daño a la infraestructura urbana debido a su agresivo sistema de raíces, destaca *F. benjamina* (Molina Prieto & Vargas Garzón, 2010). Su abundancia en el arbolado de alineación de Xalapa es consistente con su presencia en otras ciudades mexicanas, como Tuxtla Gutiérrez, Chiapas y Puerto Vallarta, Jalisco, donde también ha sido ampliamente plantada (Roman-Guillen, 2019) (Esquivel & Quijas, 2021). A pesar de los daños que provoca a la infraestructura y los costos de mantenimiento asociados a las reparaciones, especialmente en banquetas y camellones, su uso sigue siendo frecuente.

Dasometría y diversidad de especies

En muchas ciudades del mundo el arbolado urbano y las áreas verdes tienden a estar mejor representados en zonas con mayor acceso a educación, ingresos económicos más altos y menor rezago social (Cohen, Baudoin, Palibrk, & Persyn, 2012) (Falfán & MacGregor-Fors, 2016) (Kervinio, Levrel, Liotta, & Tardieu, 2020). En la presente investigación, se observó que las zonas de alta vulnerabilidad socioambiental presentan una menor cantidad de árboles y diversidad de especies, un fenómeno recurrente que ha sido reportado en otras ciudades mexicanas como Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Roman-Guillen, 2019) y Puebla (Martínez Juárez, Rodríguez Trejo, Granados Sánchez, Mohedano Caballero, & Villanueva Morales, 2022), así como en ciudades estadounidenses como Chicago (Liu, Kwan, & Kan, 2021).

Este patrón desigual no solo limita la provisión de SE esenciales, como la regulación del microclima y la mejora de la calidad del aire, sino que también exacerbía las desigualdades socioeconómicas en el acceso a espacios verdes (Cohen, Baudoin, Palibrk, & Persyn, 2012) (Alexandre & Roussel , 2021). Esta desigualdad, especialmente pronunciada en las ciudades del sur global, está fuertemente influenciada por procesos políticos y económicos que tienden a favorecer a ciertos grupos en detrimento de las comunidades más vulnerables (Rigolon, Browning, Lee, & Shin, 2018). La falta de árboles en estas áreas aumenta la exposición a riesgos ambientales, como los efectos del cambio climático y la contaminación atmosférica, con implicaciones significativas para la salud pública y el bienestar de estas comunidades (Escobedo, Kroeger, & Wagner, Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices, 2011).

Los resultados dasométricos del presente estudio refuerzan este patrón de desigualdad. En Xalapa, las zonas de mayor vulnerabilidad socioambiental muestran árboles con diámetros, alturas y anchos de copa significativamente menores en comparación con las zonas de

vulnerabilidad nula y media, una tendencia también observada en estudios de Puebla y Tuxtla Gutiérrez, Chiapas (Martínez Juárez, Rodríguez Trejo, Granados Sánchez, Mohedano Caballero, & Villanueva Morales, 2022) (Roman-Guillen, 2019). Las diferencias dasométricas sugieren que las zonas más vulnerables carecen de los recursos necesarios para el desarrollo de un arbolado saludable, lo cual reduce su capacidad para proporcionar SE clave.

La disponibilidad de espacio juega un papel crucial en el desarrollo del arbolado de alineación. En el presente estudio se observó que los árboles plantados en camellones presentaron un mejor desarrollo en todas las dimensiones dasométricas en comparación con aquellos plantados en banquetas, donde el espacio restringido limita su crecimiento. Esta observación coincide con estudios realizados en Linares, Nuevo León y Ciudad de México, donde se ha demostrado que un mayor espacio disponible favorece el crecimiento del arbolado (Leal Elizondo, *et al.*, 2018) (Saavedra-Romero, Hernández-de la Rosa, Alvarado-Rosales, & Martínez-Trinidad, 2019). Estos resultados sugieren que, para maximizar los beneficios ecológicos del arbolado urbano, es fundamental priorizar la plantación en áreas con suficiente espacio, promoviendo así un desarrollo estructural que mejore la provisión de SE.

En términos de diversidad de especies, el índice de Shannon-Weiner calculado para la diversidad arbórea en Xalapa ($H' = 3.5$) es comparable al de los parques de la ciudad de Texcoco ($H' = 3.8$) (Martinez-Trinidad, Hernández López, López-López, & Mohedano Caballero, 2021) y más alto que en otras ciudades, como Linares Nuevo León ($H' = 1.99$) (Leal Elizondo, *et al.*, 2018) y el Bosque de San Juan de Aragón en la Ciudad de México ($H' = 0.85$) (Saavedra-Romero, Hernández-de la Rosa, Alvarado-Rosales, & Martínez-Trinidad, 2019). Este valor sugiere una mayor heterogeneidad en la composición de especies en Xalapa, un factor importante para la resiliencia ecológica. No obstante, al igual que en la Ciudad de México, donde *C. equisetifolia* y *Eucalyptus camaldulensis* son dominantes, en Xalapa las especies *L. styraciflua*, *F. benjamina* y *F. uhdei* presentaron una alta dominancia, lo cual reduce la equitatividad entre especies.

Para fomentar la diversidad en bosques urbanos y reducir el riesgo de plagas y enfermedades se suele aplicar la regla 10-20-30 (Santamour, 1999), que establece que ninguna especie debe superar el 10% del total de árboles, ningún género más del 20%, y ninguna familia más del 30%. En Xalapa, de acuerdo con los resultados del presente estudio (ver Cuadro 1) y aplicando la regla de Santamour, se puede decir que en el caso del arbolado de alineación de Xalapa esta regla se cumple parcialmente. Si bien *L. styraciflua* y *F. benjamina* superaron el límite del 10% de los individuos (14.8% y 10.8% respectivamente), ningún género superó el 20%, ni ninguna familia sobrepasó el 30%. Este resultado contrasta con lo observado en Tapachula, Chiapas, donde *Ficus microcarpa*, el género *Citrus* y la familia Fabaceae superaron los límites recomendados (Esquivel & Quijas, 2021). Un patrón similar se registró en el Bosque de San Juan de Aragón, donde varias especies y el género *Casuarina* exceden estos umbrales (Saavedra-Romero, Hernández-de la Rosa, Alvarado-Rosales, & Martínez-Trinidad, 2019), y en el campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, donde las especies más comunes tampoco cumplen con esta regla (Islas-Rodriguez, Martínez-Trinidad, & Hernandez-Martinez, 2012). Aunque el arbolado de Xalapa no mantiene una diversidad ideal, su estructura ofrece mayor resiliencia y sostenibilidad a largo plazo, excepto en el caso de *L. styraciflua* y *F. benjamina*, cuyo alto número de individuos podría verse gravemente afectado ante el ataque de alguna plaga o enfermedad.

Servicios ecosistémicos y valoración económica

El arbolado de alineación de Xalapa ofrece SE valiosos, destacando la remoción de 351.07 kg/año de contaminantes atmosféricos, con un valor económico de MXN 283,597.00. Este hallazgo es consistente con estudios realizados en otras ciudades que también han utilizado el programa *i-Tree Eco* para valorar la contribución del arbolado urbano en la mejora de la calidad del aire. Por ejemplo, en Puebla, el arbolado de la Laguna de San Baltazar removió 324 kg/año de contaminantes, con un valor económico de MXN 432,000.00 (Hernández-Castán, Cuesta Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023). En Tequexquínahuac, Texcoco, México se reportó una remoción de 58.9 kg/año de contaminantes, con un valor económico estimado de MXN 136,100.00 (González-Hernández, Romo-Lozano, Cristóbal-Acevedo, Martínez Damian, & Mohedano Caballero, 2023), mientras que el arbolado del área metropolitana de Guadalajara, Jalisco eliminó 41.6 kg/año, valorado en MXN 14,112.00 (Gómez-Vega, *et al.*, 2024). Estas evaluaciones económicas permiten destacar el impacto financiero positivo que el arbolado urbano

tiene para las ciudades, no solo en términos de SE directos, sino también como un ahorro en costos asociados a la mitigación de la contaminación.

La mayor eficiencia observada en Xalapa puede atribuirse a la composición y abundancia de especies dominantes como *L. styraciflua*, *F. benjamina*, *F. uhdei* y *J. mimosifolia* L. que cuentan con una amplia superficie foliar y mayor estructura (diámetro y altura), haciéndolas más eficientes en la interceptación de contaminantes como el PM2.5 y el O₃ dos de los principales compuestos eliminados. Estos hallazgos refuerzan el papel fundamental del arbolado urbano en la mitigación de contaminantes atmosféricos en las ciudades y concuerdan con los resultados de (Escobedo, Kroeger, & Wagner, Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices, 2011) quienes señalaron que las especies con gran área foliar y crecimiento rápido son clave para la captura de contaminantes, especialmente en ciudades tropicales y subtropicales. No obstante, estos resultados subrayan la necesidad de diversificar el arbolado urbano para mejorar su capacidad de remover contaminantes, sin depender únicamente de unas pocas especies dominantes.

Por otro lado, factores ambientales como los niveles de contaminación atmosférica y las condiciones climáticas locales también influyen en las diferencias observadas. Ciudades más contaminadas, como Barcelona, donde el arbolado urbano elimina alrededor de 305 t/año de contaminantes (Baró, et al., 2014), presentan cifras significativamente más altas debido a las mayores concentraciones de contaminantes vehiculares y la densidad urbana. Esto sugiere que, aunque la capacidad de remoción depende en parte de las características del arbolado, las condiciones de cada ciudad, como el volumen de tráfico y las fuentes de emisión, determinan el impacto final de los árboles en la calidad del aire.

Es importante destacar que las estimaciones de remoción de contaminantes proporcionadas por el programa *i-Tree Eco* se basan principalmente en las características estructurales de los árboles, lo que significa que especies con una gran biomasa y área foliar como las encontradas en Xalapa (*L. styraciflua*, *F. benjamina*, *F. uhdei* y *P. mexicana*) pueden remover más contaminantes simplemente por su mayor tamaño y abundancia. Sin embargo, el modelo no incorpora factores como el tipo de suelo o la ubicación exacta de los árboles, lo que podría influir en la precisión de las estimaciones bajo ciertas condiciones locales. Por ejemplo, los árboles plantados en banquetas pueden ser menos efectivos para interceptar contaminantes en comparación con aquellos situados en camellones o parques, donde las condiciones de crecimiento suelen ser más favorables (Martínez Juárez, Rodríguez Trejo, Granados Sánchez, Mohedano Caballero, & Villanueva Morales, 2022). Estos hallazgos resaltan la necesidad de seguir promoviendo la gestión y expansión de los espacios verdes en áreas urbanas para maximizar los beneficios ecosistémicos y mejorar la calidad del aire en diversas ciudades.

La valoración económica de los SE proporcionados por el arbolado urbano en las distintas zonas de vulnerabilidad socioambiental en Xalapa reveló claras disparidades entre las áreas estudiadas, reflejando la relación directa entre la cantidad y calidad del arbolado y los beneficios ambientales generados. Las zonas de vulnerabilidad media son las que más beneficios proveen, con los mayores valores en remoción de contaminantes, secuestro y almacenamiento de carbono e interceptación de aguas pluviales, lo que es consistente con estudios previos en otras ciudades mexicanas y a nivel mundial (Andrew & Slater, 2014) (Ross, et al., 2020) (Song, Kim, Mayer, He, & Tian, 2020) (Martínez-Trinidad, Hernández López, López-López, & Mohedano Caballero, 2021) (Martínez Juárez, Rodríguez Trejo, Granados Sánchez, Mohedano Caballero, & Villanueva Morales, 2022) (González-Hernández, Romo-Lozano, Cristóbal-Acevedo, Martínez Damian, & Mohedano Caballero, 2023) (Hernández-Castán, Cuesta Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023).

En términos de valoración económica, la zona de vulnerabilidad media generó un valor anual de MXN 233,220.37, mientras que la zona de alta vulnerabilidad apenas alcanzó MXN 17,356.56/año. Esta disparidad económica refleja claramente la relación directa entre la calidad del arbolado y su capacidad para proporcionar beneficios tangibles, como la mejora de la calidad del aire, el secuestro de carbono y la regulación hídrica. Estos resultados subrayan la importancia de realizar inversiones estratégicas en las zonas más vulnerables, tal como se ha recomendado en investigaciones realizadas en Puebla y Puerto Vallarta (Martínez Juárez, Rodríguez Trejo, Granados Sánchez, Mohedano Caballero, & Villanueva Morales, 2022) (Esquivel & Quijas, 2021).

En el caso de Xalapa, la remoción de contaminantes atmosféricos en la zona de vulnerabilidad media, que alcanzó 205.89 kg/año, está dominada por especies como *L. styraciflua*, *F. uhdei*, y *J. mimosifolia*, cuya alta contribución se debe más a su abundancia que a sus características fisiológicas específicas. Este resultado coincide con lo observado en otras ciudades mexicanas como Texcoco, México donde se ha reportado que el programa *i-Tree Eco* basa sus estimaciones principalmente en la cantidad y distribución de los árboles, priorizando la abundancia sobre la eficiencia específica de las especies en la remoción de contaminantes (Martinez-Trinidad, Hernández López, López-López, & Mohedano Caballero, 2021). Sin embargo, esta situación subraya la necesidad de diversificar el arbolado en las zonas urbanas para mejorar su capacidad de remover contaminantes atmosféricos, sin depender de unas pocas especies dominantes.

En comparación, las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad presentan valores significativamente más bajos en todos los indicadores de SE. Por ejemplo, en la zona de alta vulnerabilidad, la remoción de contaminantes fue apenas de 14.39 kg/año, lo que resalta la necesidad de intervenciones urgentes en estas áreas para mejorar la densidad y calidad del arbolado. Estos resultados son consistentes con los hallazgos en Tuxtla Gutiérrez y Tapachula, Chiapas, donde las zonas más vulnerables en términos socioambientales presentan una menor cobertura y diversidad arbórea, lo que limita su capacidad para proporcionar SE (Roman-Guillen, 2019) (Almeida-Cerino, Bertolini, & Martinez-Trinidad, 2024). Asimismo, estas diferencias son evidentes en ciudades estadounidenses como Chicago, donde las zonas de mayor vulnerabilidad presentan una menor cobertura arbórea, exacerbando las desigualdades en el acceso a los beneficios ambientales (Liu, Kwan, & Kan, 2021).

El análisis del secuestro y almacenamiento de carbono también refuerza la relación entre la vulnerabilidad socioambiental y la capacidad del arbolado para mitigar el cambio climático. La zona de vulnerabilidad media secuestra 13.99 t/año de carbono y almacena un total de 211.73 t de carbono, cifras que contrastan con las 1.5 t/año de secuestro y 23.5 t de almacenamiento en la zona de muy alta vulnerabilidad. Esta diferencia refleja tanto la densidad del arbolado como su estructura, factores que han sido identificados como claves en la provisión de SE en otras urbes mexicanas (Leal Elizondo, *et al.*, 2018) (Saavedra-Romero, Hernández-de la Rosa, Alvarado-Rosales, & Martínez-Trinidad, 2019) (Martinez-Trinidad, Hernández López, López-López, & Mohedano Caballero, 2021) (Hernández-Castán, Cuesta Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023).

La producción de oxígeno en Xalapa fue estimada en 58.38 t/año, sin diferencias significativas entre las zonas de vulnerabilidad. Aunque este servicio no es valorizado económicamente, su importancia ambiental es innegable, particularmente en las ciudades donde la calidad del aire es una preocupación creciente. El arbolado de la Laguna de San Baltazar, tuvo una producción de oxígeno ligeramente superior, con 75.92 toneladas/año, debido en parte a la alta eficiencia de especies como *Hesperocyparis lusitanica* y *C. equisetifolia* (Hernández-Castán, Cuesta Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023).

En cuanto a la interceptación de aguas pluviales, el arbolado de Xalapa logró interceptar 1,431.9 m³/año, una cifra superior a la registrada en la Laguna de San Baltazar, Puebla, donde se evitó un escorrentimiento de 1,230 m³/año (Hernández-Castán, Cuesta Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023), y significativamente mayor que los 107.9 m³/año reportados en los parques de Texcoco, México (Martinez-Trinidad, Hernández López, López-López, & Mohedano Caballero, 2021). Estas diferencias subrayan la importancia del tamaño, la densidad y la distribución del arbolado, así como la disponibilidad de espacio en el área urbana, factores que son cruciales para maximizar este servicio ecosistémico. En Xalapa, especies como *F. benjamina*, *L. styraciflua* y *F. uhdei* contribuyeron significativamente a la interceptación de agua, un patrón también observado en otras ciudades mexicanas donde estas especies son dominantes (Esquivel & Quijas, 2021) (Hernández-Castán, Cuesta Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023).

Considerando las zonas de vulnerabilidad, las de vulnerabilidad media proporcionaron la mayor cantidad de este servicio, interceptando 924.27 m³/año, en comparación con los 59.81 m³/años registrados en la zona de alta vulnerabilidad. Estos resultados destacan la importancia de una gestión adecuada del arbolado urbano en la mitigación de inundaciones y la conservación de recursos hídricos, un tema particularmente relevante en el contexto de las crecientes presiones sobre la infraestructura urbana debido al cambio climático. Estos valores son comparables con los reportados en otros estudios, donde se ha demostrado que un arbolado denso y saludable es

fundamental para mitigar los efectos de la escorrentía pluvial (Martínez-Trinidad, Hernández López, López-López, & Mohedano Caballero, 2021) (González-Hernández, Romo-Lozano, Cristóbal-Acevedo, Martínez Damian, & Mohedano Caballero, 2023) (Hernández-Castán, Cuesta Mejía, Ortiz Espejel, & Rosano Reyes, 2023).

CONCLUSIONES

El presente estudio ha permitido evaluar la composición, distribución y provisión de SE del arbolado de alineación en Xalapa, Veracruz, revelando importantes diferencias en la cantidad y calidad del arbolado urbano entre zonas con distintos niveles de vulnerabilidad socioambiental. La mayoría de las especies identificadas (59%) son introducidas, lo cual refleja un patrón común en la gestión del arbolado urbano en muchas ciudades mexicanas. Aunque especies como *L. styraciflua*, *F. benjamina* y *F. uhdei* fueron las más dominantes, se observó una menor diversidad de especies en las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad, lo que sugiere la necesidad de diversificar las plantaciones para mejorar la resiliencia y sostenibilidad del arbolado.

Los resultados evidencian que las zonas de vulnerabilidad media presentan el mayor potencial para proveer SE, como la remoción de contaminantes atmosféricos, el secuestro de carbono y la interceptación de aguas pluviales, en comparación con las zonas de alta y muy alta vulnerabilidad, que mostraron una menor capacidad para brindar estos servicios. Estas disparidades reflejan la influencia de factores socioeconómicos y ambientales en la calidad y distribución del arbolado urbano.

Desde una perspectiva económica, se estimó que los árboles evaluados generan un valor de MXN 366,866.42/año, con la remoción de contaminantes como el servicio de mayor valor. Estos hallazgos subrayan el papel fundamental del arbolado urbano en la mejora de la calidad del aire y la regulación climática, destacando su contribución a la mitigación de los efectos del calentamiento global en las ciudades.

Es necesario que las políticas de gestión urbana incluyan estrategias para aumentar la cantidad y calidad del arbolado en las zonas más vulnerables, donde los SE proporcionados son menores. Inversiones estratégicas en la reforestación de estas áreas, con un enfoque en la plantación de especies nativas y preferentemente propias del BMM, pueden aumentar la provisión de beneficios ambientales y sociales, promoviendo la equidad en el acceso a los espacios verdes y mejorando la calidad de vida de los habitantes.

Finalmente, se recomienda continuar con estudios que incorporen otros factores como el tipo de suelo y la ubicación de los árboles para mejorar la precisión de las estimaciones de los SE. También es fundamental desarrollar programas de monitoreo continuo del arbolado urbano, que permitan evaluar los cambios en su estructura y en los beneficios que proporciona, contribuyendo así a una gestión más sostenible de las ciudades.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por la beca de manutención 1037872 para el primer autor, a la Universidad Veracruzana, al Programa de posgrado de la Maestría en Ciencias Biológicas de la Facultad de Biología UV y a la Red de Viveros de Biodiversidad A.C

LITERATURA CITADA

- Alexandre, F., & Roussel , F. (2021). Landscape ecological enhancement and environmental inequalities in peri-urban areas, using flora as a socio-ecological indicator – The case of the greater Paris area. *Landscape and Urban Planning*.

- Almeida-Cerino, C. M., Bertolini, V., & Martinez-Trinida, T. (2024). Estructura y diversidad florística en áreas verdes urbanas de la ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 131-154.
- Andrew, C., & Slater, D. (2014). Why some UK homeowners reduce the size of their front garden trees and the consequences for urban forest benefits as assessed by i-Tree ECO. *Arboricultural Journal*, 197-215.
- Baijnath, H., Bhatt, A., Gairola, S., Govender, Y., & Ramdhani, S. (2015). Epiphyte diversity on host trees in an urban environment, eThekweni Municipal Area, South Africa. *New Zealand Journal of Botany*, 24-37.
- Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D., & Terradas, J. (2014). Contribution of Ecosystem Services to Air Quality and Climate Change Mitigation Policies: The Case of Urban Forests in Barcelona, Spain. *AMBIO*, 466-479.
- Benavides Meza, H. M., & Villalón Rojas, R. (1992). *DF Presentado en Memoria de la Reunión Científica Forestal y Agropecuaria, Centro de Investigación de la Región Centro, Campo experimental Coyoacán*. Ciudad de México.
- Birdsey, R. (1992). *Carbon storage and accumulation in United States forest ecosystems*. United States Department of Agriculture.
- Borelli, S., Chen, Y., Conigliaro, M., & Salbitano, F. (2017). Directrices para la silvicultura urbana y periurbana. *Estudio FAO*.
- Borelli, S., Conigliaro, M., & Pineda, F. (2018). Los bosques urbanos en el contexto global. *Revista Internacional sobre bosques y actividades e industrias forestales*, 3-10.
- Boucher, T. M., Kroeger, T., McDonald, R., Wang, L., & Zhang, P. (2018). Where the people are: Current trends and future potential targeted investments in urban trees for PM10 and temperature mitigation in 27 U.S. Cities. *Landscape and Urban Planning*, 227-240.
- Brazel, A. J., Chow, W. T., Declet-Barreto, J., Harlan, S. L., & Martin, C. A. (2013). Creating the park cool island in an inner-city neighborhood: heat mitigation strategy for Phoenix, AZ. *Urban Ecosyst*, 617-635.
- Calaza Martínez, P., Cariñanos, P., Escobedo Montoya, F. J., Schwab, J., & Tovar, G. (2018). Crear paisajes urbanos e infraestructura verde. Revista Internacional sobre bosques y actividades e industrias forestales, 11-21.
- Canizales Velázquez, P., Alanís Rodríguez, E., Holguín Estrada, V. A., García García, S., & Chávez Costa, A. C. (2020). Caracterización del arbolado urbano de la ciudad de Montemorelos, Nuevo León. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 111-135.
- Castillo-Campos, G. (1991). Vegetación y flora del municipio de Xalapa. Programa del Hombre y la Biosfera (MAB, UNESCO).
- Chao, A. (1984). Nonparametric Estimation of the Number of Classes in a Population. *Scandinavian Journal of Statistics*, 265-270.
- Cohen, M., Baudoin, R., Palibrk, M., & Persyn, N. (2012). Urban biodiversity and social inequalities in built-up cities: New evidences, next questions. The example of Paris, France. *Landscape and Urban Planning*, 277-287.
- Conover, W. J. (1999). Practical Nonparametric Statistics.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social . (2020). Grado de Rezago Social a Nivel AGEB urbana 2020. Obtenido de https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Rezago_social_AGEB_2020.aspx
- Delgado, J. L. (2019). Los árboles que esconden al bosque: Miguel Ángel de Quevedo y los orígenes de la ciencia forestal en México. *Historia Agraria Revista de agricultura e historia rural*, 99-126.
- de Vries, S., Groenewegen, P., Spreeuwenberg, P., & van Dillen, S. M. (2013). Streetscape greenery and health: stress, social cohesion and physical activity as mediators. *Social Science & Medicine*, 26-33.
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, E. J. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 2078-2087.
- Esquivel, T., & Quijas, S. (2021). Daño a la infraestructura (pavimento) causado por el arbolado urbano en Puerto Vallarta, Jalisco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 178-201.
- Flores, A., & Glafiro, J. (2005). El arbolado urbano en el área metropolitana de Monterrey. *Ciencia UANL*, 20-32.

- Falfán, I., & MacGregor-Fors, I. (2016). Woody neotropical streetscapes: a case study of tree and shrub species richness and composition in Xalapa. *Madera y bosques*, 95-110.
- Gómez-Columna, M., & Soto-Esparza, M. (1993). Consideraciones climáticas de la ciudad de Xalapa. Ecología urbana aplicada a la ciudad de Xalapa. Xalapa: Instituto de Ecología, AC, MAB UNESCO, H. Ayuntamiento de Xalapa, Veracruz.
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 235-245.
- Gómez-Vega, E. R., Hernández-Tovar, M. A., Santiago-Pérez, A. L., Rodríguez-Ramírez, C. G., Brambila-Santiesteban, A., Cruz-Paz, P. N., & López-Camacho, K. P. (2024). Evaluación del arbolado urbano y sus servicios ambientales en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). *E-CUCBA*, 01-09.
- González-Hernández, L., Romo-Lozano, J. L., Cristóbal-Acevedo, D., Martínez-Damian, M. Á., & Mohedano Caballero, L. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos de cuatro sistemas forestales periurbanos a través de i-Tree Eco. *Madera y Bosques*.
- Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., Lapoint, E. B., & Nowak, D. J. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 229-236.
- Gual Díaz, M. (2024). *Bosque Mesófilo de Montaña de México. Versión 1.17*. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
- Hammer, O., Harper, D. A., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 1-9.
- Hernández-Castán, J., Cuesta Mejía, E., Ortiz Espejel, B., & Rosano Reyes, E. (2023). Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree. *CIENCIA Ergo-Sum*.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*.
- Islas-Rodríguez, L., Martínez-Trinidad, T., & Hernandez-Martinez, M. (2012). *Principales especies arbóreas en el campus Montecillo del Colegio de Postgraduados*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/305681116_Principales_especies_arboreas_en_el_campus_Montecillo_del_Colegio_de_Postgraduados
- Jenkins, J., Chojnacky, D., Heath, L., & Birdsey, R. (2003). National scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, 12-35.
- Kervinio, Y., Levrel, H., Liotta, C., & Tardieu, L. (2020). Planning for environmental justice - reducing well-being inequalities through urban greening. *Environmental Science & Policy*, 47-60.
- Koeser, A., Hauer, R., Norris, K., & Krouse, R. (2013). Factors influencing long-term street tree survival in Milwaukee, WI, USA. *Urban Forestry & Urban Greening*, 562-568.
- Leal Elizondo, C. E., Leal Elizondo, N., Alanís Rodríguez, E., Pequeño Ledezma, M. A., Mora Olivo, A., & Buendia Rodríguez, E. (2018). Estructura, composición y diversidad del arbolado urbano de Linares, Nuevo León. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 252-270.
- Lin, J., Kroll, C., & Nowak, D. (2020). Ecosystem Service-Based Sensitivity Analyses of i-Tree Eco. *Arboriculture & Urban Forestry*, 287-306.
- Liu, D., Kwan, M.-P., & Kan, Z. (2021). Analysis of urban green space accessibility and distribution inequity in the City of Chicago. *Urban Forestry & Urban Greening*.
- Magurran, A. (2004). *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Publishing. Obtenido de <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/Magurran2004MeasuringBiological.pdf>
- Martínez Juárez, G., Rodríguez Trejo, D. A., Granados Sánchez, D., Mohedano Caballero, L., & Villanueva Morales, A. (2022). Descripción del arbolado de alineación de la ciudad de Puebla por grado de marginación y vialidad. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 85-111.
- Martínez-Trinidad, T., Hernández López, P., López-López, S. F., & Mohedano Caballero, L. (2021). Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante i-Tree Eco. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 203-223.

Recibido:
27/mayo/2024

Aceptado:
1/noviembre/2024

- Molina-Pelegrín, Y., Puig-Pérez, A., Riquenes-Valdés, T., & Sosa-López, A. (2011). Diagnóstico de la situación del arbolado urbano en la ciudad de Guisa. *Revista Forestal Baracoa*, 73-78.
- Molina Prieto, L. F., & Vargas Garzón, B. (2010). Cinco árboles urbanos que causan daños severos en las ciudades. *Revista Nodo*, 115-126.
- 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 (Valdivia)*, 401-414.
- Nowak, D., & Crane, D. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 381-389.
- Peper, P., McPherson, E. G., Simpson, J. R., Gardner, S. L., Vargas, K. E., & Xiao, Q. (2007). *New York City, New York Municipal Forest Resource Analysis*. U.S. Department of Agriculture Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Center for Urban Forest Research.
- Rigolon, A., Browning, M., Lee, K., & Shin, S. (2018). Access to Urban Green Space in Cities of the Global South: A Systematic Literature Review. *Urban Science*, 67-91.
- Roman-Guillem, L. M. (2019). *Diagnóstico del arbolado de alineación de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*. Instituto de Ecología A.C.
- Ross, S., Jean-Philippe, S. R., Clatterbuck, W., Giffen, N., Herold, J., & Zobel, J. (2020). i-Tree Eco Analysis of Landscape Vegetation on Remediated Areas of Oak Ridge National Laboratory. *Open Journal of Forestry*.
- Rzedowski, J. (1996). Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botánica Mexicana*, 25-44.
- Saavedra-Romero, L., Hernández-de la Rosa, P., Alvarado-Rosales, D., & Martínez-Trinidad, T. (2019). Diversidad, estructura arbórea e índice de valor de importancia en un bosque urbano de la Ciudad de México. *Polibotánica*, 25-37.
- Santamour, F. S. (1999). *Trees for urban planting : diversity uniformity, and common sense*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/TREES-FOR-URBAN-PLANTING-%3A-DIVERSITY-UNIFORMITY-%2C-Santamour/26a24c5361ce6d6e618a9fa307c4a34a3169e309>
- Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 591-611.
- Song, P., Kim, G., Mayer, A. L., He, R., & Tian, G. (2020). Assessing the Ecosystem Services of Various Types of Urban Green Spaces Based on i-Tree Eco. *Sustainability*.
- Tang, L., Guofan, S., & Groffman, P. M. (2024). Urban trees: how to maximize their benefits for humans and the environment. *Nature*, 261.
- United Nations. (2018). Department of Economic and Social Affairs. Population Division. The World's Cities in 2018—Data Booklet (ST/ESA/SER. A/417).
- USDA Forest Service, Davey Tree Expert Company. (2020). Obtenido de I-Tree Eco User's Manual v6.0.: <https://www.itreetools.org/support/resources-overview/i-tree-eco-resources>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE *Salvia elegans* Vahl CULTIVADA A DIFERENTES INTENSIDADES LUMÍNICAS Y EVALUACIÓN DE SU EFECTO ANTIINFLAMATORIO

VEGETATIVE PROPAGATION OF *Salvia elegans* Vahl GROWN AT DIFFERENT LIGHT INTENSITIES AND EVALUATION OF ITS ANTI- INFLAMMATORY EFFECT

Herrera Ruiz, M., E. Jiménez Ferrer, M. González Cortazar, M.L. Lucía Arenas Ocampo, A.R. Jiménez Aparicio y N. Monterrosas Brisson

PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE *Salvia elegans* Vahl CULTIVADA A DIFERENTES INTENSIDADES LUMÍNICAS Y EVALUACIÓN DE SU EFECTO ANTIINFLAMATORIO

VEGETATIVE PROPAGATION OF *Salvia elegans* Vahl GROWN AT DIFFERENT LIGHT INTENSITIES AND EVALUATION OF ITS ANTI-INFLAMMATORY EFFECT



Propagación vegetativa de *Salvia elegans* Vahl cultivada a diferentes intensidades lumínicas y evaluación de su efecto antiinflamatorio

Vegetative propagation of *Salvia elegans* Vahl grown at different light intensities and evaluation of its anti-inflammatory effect

Maribel Herrera Ruiz, Enrique Jiménez Ferrer, Manasés González Cortazar, Martha Lucía Arenas Ocampo, Antonio Ruperto Jiménez Aparicio y Nayeli Monterrosas Brisson

PROPAGACIÓN
VEGETATIVA DE *Salvia elegans* Vahl CULTIVADA A
DIFERENTES
INTENSIDADES
LUMÍNICAS Y
EVALUACIÓN DE SU
EFECTO
ANTIINFLAMATORIO

VEGETATIVE
PROPAGATION OF *Salvia elegans* Vahl GROWN AT
DIFFERENT LIGHT
INTENSITIES AND
EVALUATION OF ITS ANTI-
INFLAMMATORY EFFECT

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 181-198. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polbotanica.59.11](https://doi.org/10.18387/polbotanica.59.11)

Maribel Herrera Ruiz <https://orcid.org/0000-0001-9056-3568>
Enrique Jiménez Ferrer <https://orcid.org/0000-0002-0783-8274>
Manasés González Cortazar <https://orcid.org/0000-0002-3693-1670>

Centro de Investigación Biomédica del Sur, Laboratorio de Fitofarmacología y Laboratorio de Fitoquímica, Instituto Mexicano del Seguro Social, Argentina 1, Colonia Centro, Xochitepec, Morelos 62790, México

Martha Lucía Arenas Ocampo <https://orcid.org/0000-0002-4400-5482>.
Antonio Ruperto Jiménez Aparicio <https://orcid.org/0000-0002-7748-4432>.
Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Departamento de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Carr. Yautepec-Joxtla, km. 8, calle CEPROBI No. 8, Col. San Isidro, Morelos 62731, México

Nayeli Monterrosas Brisson. Autora de correspondencia:

nayeli.monterrosas@uaem.mx / <https://orcid.org/0002-4449-5813>

Facultad de Ciencias Biológicas, Laboratorio de Neurociencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad 1001, Colonia Chamilpa, Cuernavaca, Morelos 62210, México

RESUMEN: Se ha demostrado que la especie medicinal *Salvia elegans* Vahl, induce efecto ansiolítico, antidepresivo, inmunomodulador, antihipertensivo, entre otros y se propone como una planta con potencial farmacológico que pudiera llegar a la clínica. La propagación clonal, es una herramienta biotecnológica que promueve la producción de biomasa genéticamente idéntica al progenitor en corto tiempo, lo que lleva a la obtención del material vegetal en condiciones controladas, para su posterior análisis biológico. En este trabajo se cultivaron esquejes de *S. elegans* en sustratos sólidos activos, inertes y en solución nutritiva, bajo dos condiciones de luminosidad: C1= 13.91 y C2= 4.94 ($\mu\text{mol.cm}^2.\text{seg}^{-1}$). Se evaluó el crecimiento y desarrollo foliar (densidad estomática, área y color); con las plantas obtenidas de ambas condiciones, se obtuvieron extractos hidroalcohólicos de partes aéreas y raíces. Se analizaron químicamente con cromatografía de capa fina y se evaluó la actividad antiinflamatoria mediante el ensayo de edema local-inducido con TPA (12-O-Tetradecanoilforbol 13-acetato). El mayor crecimiento de esquejes y densidad estomatal de las hojas se observó en C1. El color de las hojas, parámetro sensible a la luminosidad, mostró diferencias entre C1 y C2. Por otro lado, en todos los extractos de C1 y C2 se detectó ácido oleánico y ursólico mientras que solo aquellos de C2 revelaron presencia de flavonoides. El mayor efecto antiinflamatorio se observó en los extractos de las partes aéreas y de raíces de C1. Las variables establecidas en C1 para cultivar esquejes de *S. elegans*, promueven el crecimiento, así como los parámetros morfométricos asociados al desarrollo foliar (densidad estomática, área foliar y color) y aumentan el efecto antiinflamatorio.

Palabras clave: *Salvia elegans* Vahl, inflamación, propagación vegetativa, intensidad luminosa.

ABSTRACT: *Salvia elegans* Vahl has shown to induce anxiolytic, antidepressant, immunomodulatory, and antihypertensive effects, with potential pharmacological

properties that could be applied in clinic assays. Clonal propagation is a biotechnological tool that promotes biomass production genetically identical to the progenitor in a short time, which leads to obtaining plant material under controlled conditions for further biological analysis. In this study, *S. elegans* cuttings were grown in solid substrates, which were chemically active or inert as well as in a nutritive solution, under two light conditions: C1= 13.91 and C2= 4.94 ($\mu\text{mol.cm}^2.\text{seg}^{-1}$). Growth and leaf development (stomatal density, area and color) were evaluated; hydroalcoholic extracts of aerial parts and roots were prepared with the plants obtained from both conditions. They were chemically analyzed with thin layer chromatography and the anti-inflammatory activity was assessed by local edema-induced with TPA (12-O-Tetradecanoylphorbol 13-acetate). The highest cutting growth and leaf stomatal density were observed in C1. Leaf color, a light-sensitive parameter, showed differences between C1 and C2. In addition, Oleanoic and Ursolic acids were detected in all the extracts from C1 and C2, while only those from C2 exhibited the presence of flavonoids. The greatest anti-inflammatory effect was found in C1 aerial and root extracts. Established parameters in C1 to cultivate cuttings of *S. elegans*, promote growth, enhance morphometric parameters associated with leaf development (stomatal density, leaf area and color) and increase the anti-inflammatory effect.

Key words: *Salvia elegans* Vahl, inflammation, vegetative propagation, light intensity.

INTRODUCCIÓN

La familia Lamiaceae está ampliamente distribuida, sus especies poseen valor biotecnológico y potencial farmacológico. Dentro de los géneros incluidos en esta familia se encuentra *Salvia*, con 900 especies en la República Mexicana (Martínez-Gordillo *et al.*, 2017), las cuales presentan gran diversidad en sus formas de crecimiento, producen abundantes y diversos metabolitos secundarios además de mostrar una morfología floral llamativa por su belleza, se consideran ornamentales (Ramírez-Zea *et al.*, 2016). Algunas especies se desarrollan en zonas cuyas temperaturas diarias exceden los 33°C en verano, promoviendo estrés por calor, suelos poco apropiados para el cultivo, lo cual inhibe el crecimiento y altera el desarrollo de las plantas. En la actualidad no se conoce algún método útil para fenotipificar la susceptibilidad de estas plantas a las altas temperaturas y elevadas intensidades lumínicas, que permitan medir la tolerancia sostenible al calor y que sirva como base para evaluar el rendimiento y la adaptación de las plantas de *Salvia* en determinadas zonas de cultivo (Lin *et al.*, 2021).

Aunque hay datos relacionados con el comportamiento del desarrollo de plantas del género *Salvia* bajo algunas condiciones, como el estrés hídrico (Bayat & Moghadam, 2019), salino y oxidante inducido con ozono (Lin *et al.*, 2020); hay poca información sobre la morfología, fisiología y bioquímica de plantas de *Salvia* cultivadas bajo estrés por altas temperaturas y modificaciones en la intensidad lumínica (Lin *et al.*, 2021).

Salvia elegans Vahl, es nativa de México y Centroamérica. Es una herbácea semileñosa, perenne, de 1 a 1.5m de altura. Es una especie que crece en climas templados entre los 2280 y 3100 msnm asociada a los bosques de pino, encino y mixto. Se desarrolla en suelos bien drenados y húmedos todo el año; preferentemente cubiertos por rocas ígneas con pH ácido (5-7), con diferentes texturas (arenosos o arcillosos), pedregosos y laderas de cerros. En la República Mexicana se puede encontrar en los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Michoacán, Hidalgo, Estado de México, Morelos, México D.F., Veracruz y Oaxaca (Argueta *et al.*, 1994).

Es utilizada en la medicina tradicional mexicana en forma de cataplasma para tratar trastornos asociados a la inflamación como, por ejemplo, edemas, heridas y golpes (Argueta *et al.*, 1994). Es endémica de nuestro país, donde está ampliamente distribuida (Martínez-Gordillo *et al.*, 2017), lo cual promueve que la composición y concentración de sus metabolitos secundarios varíen según su hábitat (Ricciardi & Ricciardi, 2000). Con base en los reportes etnomédicos y farmacológicos mencionados más adelante, esta especie resulta de interés medicinal, por esta razón es indispensable que la composición de sus compuestos activos sea homogénea y para ello se requieren condiciones controladas de cultivo.

Al ser *S. elegans* una especie ampliamente distribuida, es muy probable que la composición y cantidad de principios activos (metabolitos secundarios) varíe de acuerdo con su hábitat

(Ricciardi & Ricciardi, 2000). De aquí que su propagación bajo condiciones controladas, resulte ser una buena alternativa para asegurar la concentración constante y homogénea de sus principios activos.

Una opción es la propagación vegetativa o clonal, que consiste en generar nuevos individuos a partir de tejidos vegetales diferenciados (Gautam *et al.*, 2021). Es utilizada cuando la probabilidad de germinación de las semillas es muy baja la cual, en el caso de las plantas medicinales y aromáticas, a veces es inferior al 50%. Lo anterior fue comprobado en esquejes de la especie *S. officinalis* L. que promovieron el enraizamiento por esqueje, aunque este proceso se vio favorecido significativamente por la aplicación de productos de enraizamiento Cytokin® y Radix® (Nicola *et al.*, 2005). De hecho, se ha reportado que esta técnica de propagación favorece el enraizado de esquejes de *S. uliginosa* silvestre, comparada con esquejes de esta especie sometidos a 10, 20, 30, 40 ó 50 Gy de rayos gamma procedentes de una fuente de ^{60}Co (Maynard & Ruter, 2024).

Se ha reportado que las especies del género *Salvia*, entre ellas *S. elegans*, *S. officinalis* o *S. miltiorrhiza*, tienen la capacidad de producir monoterpenos, sesquiterpenos, triterpenos, cumarinas, sacáridos y flavonoides en las partes aéreas, y en la raíz ácidos fenólicos y diterpenos (Karpiński, 2020); (Martínez-Hernández *et al.*, 2021); (Martínez-Hernández *et al.*, 2024).

Farmacológicamente, se ha demostrado desde el 2006 que el extracto hidroalcohólico de hojas de *S. elegans* a diferentes dosis en ratas a 3.12, 12.5, 25 y 50 mg/kg (Mora *et al.*, 2006) y en ratones ICR a 125, 250, 500, 1000 y 2000 mg/kg (Herrera-Ruiz *et al.*, 2006), ejerce efecto antidepresivo, ansiolítico y sedante. Posteriormente en el 2010, se mostró que el extracto hidroalcohólico de partes aéreas (flores, hojas y tallos) y dos fracciones obtenidas de este (butanólica, así como la fracción nombrada SeF8-22) contienen flavonoides y fenilpropanoides, además de poseer efecto antihipertensivo al actuar como inhibidor de la enzima convertidora de la angiotensina (ECA) (Jiménez-Ferrer *et al.*, 2010). Para el 2020 se identificó que la mezcla de dos terpenos rosignol y agarospirol administrados a las dosis de 0.01, 0.1, 0.5, 1.0 y 2.0 mg/kg vía oral a ratones ICR, fueron capaces de provocar efecto antidepresivo, cuando los animales fueron expuestos a la prueba de Natación forzada (NF) (Martínez-Hernández *et al.*, 2021). En un estudio químico-biodirigido se aislaron de esta especie, 17 compuestos que fueron evaluados en el ensayo *in vitro* de inhibición de la ECA, siendo los más activos el ácido rosmariníco, los flavonoides isosakuranetina-5-O-rutinósido y neoeriocitrina (Gutiérrez-Román *et al.*, 2021). En el 2018 se registró que la decocción de partes aéreas (hojas, flores y tallo) de *S. elegans*, posee efecto antioxidante por actuar como “scavenger” de radicales libres como el DPPH \cdot , NO \cdot y O $_2^-$; además de mostrar la capacidad de reducir Fe $^{3+}$ y evidenciaron un efecto inhibidor de las enzimas α -glucosidasa y xantina oxidasa (Pereira *et al.*, 2018).

Recientemente, se publicó que el extracto hidroalcohólico de partes aéreas (100 mg/kg), la fracción de acetato de etilo SeFAc (50 mg/kg) y una sub-fracción nombrada SeF3 (10 mg/kg), pueden actuar sobre una parte de la fisiopatología asociada al síndrome metabólico en ratones que ingirieron una dieta hipercalórica. Por ejemplo, redujeron los niveles séricos de glucosa, triglicéridos y colesterol, el índice de adiposidad y la resistencia a la insulina. Además, actuó como inmunomodulador en diferentes órganos al disminuir citocinas inflamatorias, además de ejercer un efecto antidepresivo y disminuir los niveles de corticosterona en sangre. Asimismo, se reportó la presencia del ácido rosmariníco, ácido cafeico a través de gases masas, glicerol y algunos esteroles como el Stigmastano-3,5-dieno y acetato de campesterol (Martínez-Hernández *et al.*, 2024).

Debido a que en los últimos años *S. elegans* ha sido reportada con efectos farmacológicos relevantes, la convierten en una especie con posibilidades de continuar con su estudio y de ser posible, llegar a la clínica, y generar la necesidad de realizar estudios sobre la obtención de material vegetal bajo condiciones controladas. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue, por un lado, evaluar el crecimiento y el desarrollo foliar (densidad estomática, área y color) de esquejes de *S. elegans*, introducidos en sustratos sólidos químicamente activos, inertes y en solución nutritiva, cultivados bajo dos intensidades de luz diferentes y, además, evaluar el efecto antiinflamatorio del extracto hidroalcohólico de las partes aéreas y raíces de las plantas cosechadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Se colectaron las plantas silvestres de *S. elegans* en la localidad de Ozumba, Estado de México (19°2'21" N, 98°47'37" W) y posteriormente fueron adaptadas en el Laboratorio de Biotecnología del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional (CEPROBI-IPN). A partir del material cultivado bajo diferentes condiciones de cultivo (partes aéreas y raíces), se prepararon extractos hidroalcohólicos en el Laboratorio de Química del Centro de Investigación Biomédica del Sur del Instituto Mexicano del Seguro Social (CIBIS-IMSS). Un ejemplar fue enviado al Herbario del IMSS (IMSSM), para ser identificado como IMSSM-14588, por la M.Sc. Abigail Aguilar Contreras.

Cultivo de *S. elegans* en diferentes sustratos bajo dos condiciones de luz

Con el objetivo de evaluar si el sustrato y la intensidad lumínica ejercen algún efecto sobre el crecimiento y/o el desarrollo foliar de *S. elegans*, se planteó el siguiente diseño experimental: Inicialmente, se obtuvieron esquejes a partir de yemas apicales de una planta madre sana, se recortaron en segmentos de 10 cm de longitud y se eliminaron las hojas de la parte inferior de cada esqueje. Posteriormente, se lavaron con agua destilada y se sumergieron en una solución de Agrimycin® (1 mg/ml) durante 1 min. Se estableció un lote experimental con 17 estacas, para promover el enraizado se removieron las hojas situadas cerca del corte inferior, cada estaca se impregnó con Radix® a una concentración de 1500 ppm y fueron introducidas en un orificio de 3 cm de profundidad (Maynard & Ruter, 2024).

Posteriormente, se eligieron al azar esquejes enraizados, para introducirlos en macetas para vivero de plástico (4 in), empleando sustratos sólidos químicamente activos e inertes de la siguiente manera: **a)** Mezcla de vermiculita/agrolita/peat moss; en proporción 1:1:1 (agrolita; n=10); **b)** Cultivos hidropónicos sólidos químicamente inertes, con arena (n=10) y con tierra (n=10) y otros en solución de Hoagland & Arnon (Hoagland & Arnon, 1950) al 100% de nutrientes (Hidroponía; n=10). Los sistemas de cultivo previamente mencionados (sólidos y solución nutritiva), se establecieron por triplicado y evaluaron bajo dos diferentes condiciones de cultivo entre los meses de septiembre y octubre del año 2006. Para tal efecto, el sistema de cultivo se reprodujo. La condición uno (C1), de alta intensidad lumínica registrada como cantidad de fotones por unidad de área y unidad de tiempo ($15.08 \mu\text{mol.cm}^2.\text{seg}^{-1}$), situada dentro de los invernaderos del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, en el municipio de Yautepec, Morelos ($18^{\circ}49'29.4''\text{N}$ $99^{\circ}05'46.0''\text{W}$), en un ambiente que registró promedios de humedad relativa (HR) de 26.0%, temperatura (T) mínima de 22.3°C y máxima de 33.8°C . La condición 2 (C2), de baja intensidad lumínica ($7.22 \mu\text{mol.cm}^2.\text{seg}^{-1}$), HR de 32.9%, T media mínima y máxima de 30.8°C y 39.4°C respectivamente, situada en el exterior, a un costado de los invernaderos y cubierta por una malla de sombra al 50 %. Durante ocho semanas, se mantuvo la humedad de los sustratos sólidos activos e inactivos, administrando 200 ml de agua cada dos días y se registró el crecimiento de la parte aérea de los especímenes (cm), cada dos semanas (**Diagrama 1**).

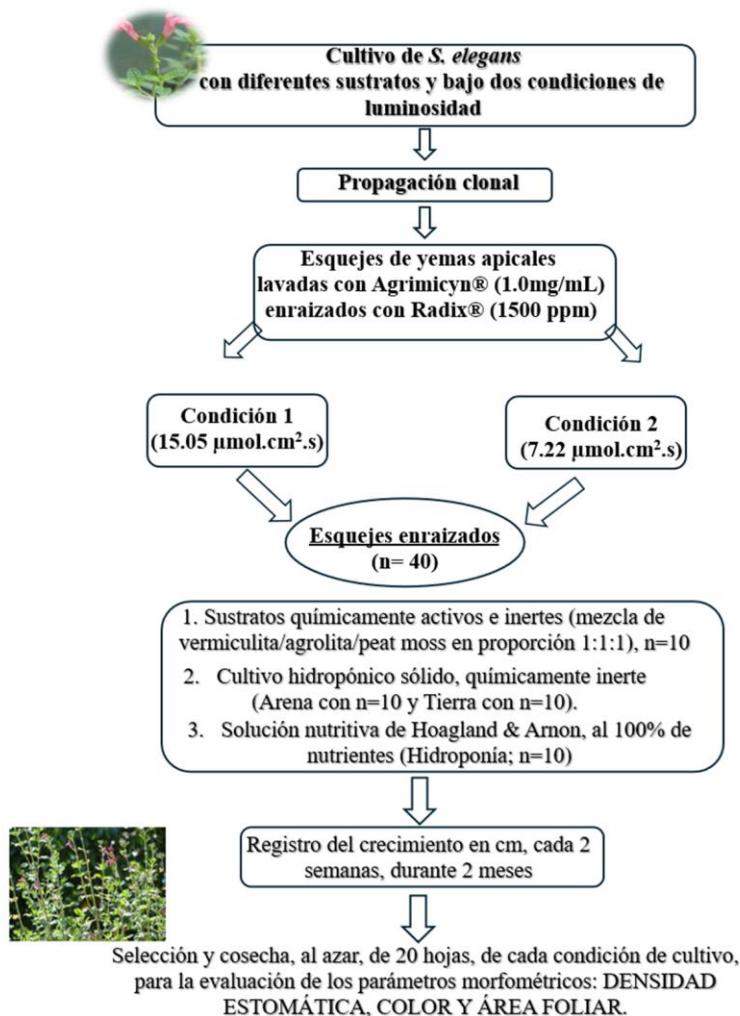


Diagrama 1. Diseño experimental empleado para evaluar el crecimiento de esquejes y del desarrollo foliar de *S. elegans*.

Diagram 1. Design of the experimental setup employed to evaluate *S. elegans* cuttings growth and leaf development.

Evaluación del desarrollo foliar, a través de parámetros morfométricos

Para los parámetros morfométricos se cortaron, al azar, para cada experimento cuarenta hojas de las plantas de *S. elegans* cultivadas en cada condición lumínica y al azar se eligieron veinte de cada una (n=20). Los experimentos se efectuaron por triplicado. Para analizar los parámetros morfométricos relativos al área foliar y el color, se tomaron imágenes de las hojas empleando una cámara digital (Sony, MVC-CD500) y se almacenaron en formato jpg (color RGB, 24 bits; 640 x 480 píxeles).

a) Densidad estomática

La densidad estomática se midió utilizando 20 hojas, en la región adaxial y la abaxial se aplicó esmalte de uñas transparente de marca comercial Renova® en la parte media, se dejó secar por 5 min y posteriormente, con ayuda de una pinza de disección, se retiró la película de esmalte (Barrera & Mesa, 1992).

La película se estableció como una preparación fija, que fue observada en un microscopio óptico (Nikon, Eclipse i80) a 20X, con una cámara adaptada (Dage Mita, DC300) con la cual se obtuvieron imágenes de la región adaxial y abaxial de las hojas procesadas de ambas condiciones de cultivo. Las imágenes colectadas fueron procesadas usando el software MetaMorph (V.7.0).

Para calcular densidad estomática, se siguió la metodología reportada por Barrera y Mesa (1992) en la cual establecen un área de muestra de 0,5 x 0,4 mm, al considerar que 0,4 mm corresponde al ancho de la banda estomática, región donde se cuantifican las estomas y se sitúa en la zona central del envés de la hoja. Se realizaron tres mediciones por área de muestra para cada preparación y se registró el promedio (número de estomas/ μm^2).

b) Área foliar

Las imágenes en formato jpg, se procesaron utilizando el programa Corel Photo Paint (V11.5). Para transformarlas a escala de grises de 8 bits, se realizó un contraste y se imprimieron en una impresora digital a 600 dpi. El área foliar (cm^2) se obtuvo colocando en un medidor de área foliar (marca LICOR modelo 3100) las impresiones de las hojas (Husin *et al.*, 2012).

c) Color

Se empleó el software Image J (V.1.52) para la evaluar el color de las hojas en las imágenes digitales (RGB, 24 bits) capturadas previamente. Los valores digitales, fueron transformados a un sistema de notación descrito en la carta de colores Munsell para tejidos vegetales (Pérez *et al.*, 2008) y la interpretación se realizó tomando en cuenta lo que sugiera el sistema CIE de colorimetría, según Schanda (Shanda J., 2007).

Los valores RGB se transformaron a unidades de luminosidad (L^*), tono rojo-azul (a^*) y tono verde-amarillo (b^*) utilizando el software EasyRGB-PC (V.1.53). La diferencia de color (ΔE) entre ambas condiciones de intensidad lumínosa se determinó según Schanda (Shanda J., 2007), con la ecuación:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Donde:

ΔE : diferencia de color entre las muestras foliares colectadas de C1 y C2.

ΔL^* : Diferencia de luminosidad entre las muestras foliares colectadas de C1 y C2.

Δa^* : Diferencia de tonalidad rojo-azul entre las muestras foliares colectadas de C1 y C2.

Δb^* : Diferencia de tonalidad verde-amarillo entre las muestras foliares colectadas de C1 y C2.

Utilizando el programa Prism@, V1.10 (Quintanilla-Carvajal *et al.*, 2015) se transformaron los datos RGB y $L^*a^*b^*$ a datos Munsell digitalizados, se reportaron como RGB y CIELab y se compararon con el croma (C, saturación), matiz (H) y valor (V, luminosidad u oscuridad) del sistema de notación Munsell (HV/C) según (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014).

Extracto hidroalcohólico

Se obtuvieron extractos hidroalcohólicos de las partes aéreas (tallos, hojas y flores) y de raíces de *S. elegans* (C1 y C2); para ello, las muestras se secaron a temperatura ambiente en condiciones de oscuridad durante 2 semanas, posteriormente el material vegetal seco, se molvió y maceró en una solución de etanol y agua (60:40) durante 24 h. Después, cada extracto se filtró con papel Whatman #1; el material sólido filtrado, se maceró, filtró y concentró en dos ocasiones más, las cuales se reunieron y se calcularon los porcentajes de rendimiento. Finalmente, se liofilizaron (Heto Drywinner Brand, Modelo DW3, USA) y mantuvieron en refrigeración (4°C) hasta su posterior uso.

Cada extracto hidroalcohólico fue etiquetado como:

SeC1r: Raíces de plantas cultivadas en C1.

SeC1a: Partes aéreas de plantas cultivadas en C1.

SeC2r: Raíces de plantas cultivadas en C2.

SeC2a: Partes aéreas de plantas cultivadas en C2.

SeHa: Partes aéreas de plantas en solución hidropónica en C2.

Los esquejes cultivados en solución hidropónica en la condición 1, fueron descartados debido a que la producción de biomasa en dicho cultivo fue escasa para la obtención de extractos. Lo mismo ocurrió con las raíces de los esquejes cultivados en solución nutritiva de ambas condiciones.

Animales de experimentación

Ratones macho ICR ($x=30$ g), del bioratorio de Centro Medico Nacional Siglo-XXI. Se alojaron en condiciones estándar (temperatura de $22\pm2^{\circ}\text{C}$, $70\pm 5\%$ de humedad, ciclos de luz/oscuridad de 12 h, con alimento y agua *ad libitum*). Los experimentos se llevaron a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en las Normas Internacionales y Oficiales Mexicanas para el Cuidado y Sanidad Animal (NOM-062-ZOO-1999). El protocolo fue registrado ante el Comité local de Ética e investigación del Instituto Mexicano del Seguro Social (CLIES) con el número de registro R-2019-1702-041.

Ensayo de Edema local inducido por un éster de forbol (actividad antiinflamatoria)

Cada extracto fue administrado (disuelto en acetona), en la oreja izquierda (OI) y en la oreja derecha (OD) se administró el vehículo (control con acetona) en un volumen total de 10 μL en la parte interna y en externa del pabellón auricular. Los ratones se dividieron en control negativo [(VEH; 2.5 $\mu\text{g}/\text{oreja}$ de 12-O-Tetradecanoilforbol 13-acetato (TPA)], control positivo, con dexametasona (DEX, 1.0 mg/oreja), los tratamientos de *S. elegans* (SeC1r, SeC1a, SeC2r, SeC2a, SeHa) a 1.0 mg/oreja (Payá *et al.*, 1993). Quince minutos posteriores a la aplicación de cada tratamiento, se colocó el TPA en la OI y 4 h después, los animales fueron sacrificados con una sobredosis de pentobarbital sódico (NOM-062-ZOO-1999). Se tomaron secciones circulares de 6 mm de diámetro tanto de las orejas tratadas (t; OI) como de las no tratadas (nt; OD), las cuales se pesaron para determinar la inflamación y el porcentaje de inhibición empleando la siguiente fórmula:

$$\text{Inhibición del edema (\%)} = [\Delta p \text{ control} - \Delta p \text{ tratamiento}] \times 100$$

Donde: $\Delta p = pt - pnt$

Δp = peso de la sección de la oreja tratada.

pnt = es el peso de la sección de la oreja no tratada.

Cromatografía en capa fina (CCF)

Se utilizaron placas de gel de sílice 60-F254, con 2 μL de cada extracto y se marcó la posición inicial del desplazamiento del solvente en la placa. La fase móvil utilizada fue cloroformo: metanol (9:1). Una vez transcurrida la cromatografía, las placas fueron observadas con una lámpara de luz UV a 254 nm de longitud de onda y con luz visible. Además, las placas fueron reveladas aplicando una disolución de sulfato cérico amoniacal disuelto en ácido sulfúrico concentrado, para obtener una solución final del revelador con valor de concentración de 2N, posteriormente se calentaron en una parrilla a 100°C por 3 min, para visualizar la presencia de terpenos en color marrón (Carratù *et al.*, 2010).

Otro sistema utilizado fue una solución metanólica de difenilboriloxietilamina (c) al 1% en una solución etanólica de polietilenglicol-4000 al 5%, para mostrar la presencia de flavonoides que pueden revelar en color amarillo hasta naranja (Carratù *et al.*, 2010). Se capturaron imágenes de cada placa (antes y después de revelar) y se identificaron los diferentes compuestos con base en la migración de los estándares de referencia para terpenos: Ácido Oleánico (AO), Ácido Ursólico (AU) y para flavonoides queracetina (Q). Finalmente, se midió el factor de retención (Rf), de los estándares y de los extractos analizados en la CCF. Los Rf se determinaron aplicando la ecuación:

$Rf = \text{distancia que recorre la muestra desde el punto de aplicación/distancia que recorre el solvente hasta el frente del eluyente.}$

Análisis estadístico

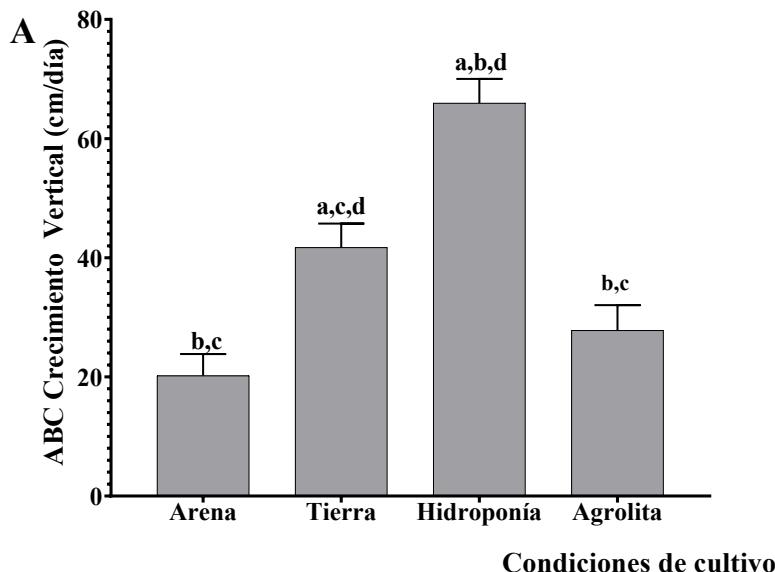
El análisis estadístico de los datos obtenidos durante las dos fases experimentales (crecimiento, densidad estomática, área foliar, color y pruebas biológicas) y para la prueba de inflamación, se realizó con ANOVA de una vía con una *post-prueba* de Bonferroni, con un valor de significancia de $p < 0.05$, en el programa estadístico SPSS V.17. La medida de distribución normal de cada ensayo se hizo con Shapiro-wilk, con un valor de $p >$ que 0.05, para considerarlo como distribución normal.

RESULTADOS

Cultivo de *S. elegans*

En la Figura 1A, se muestran los resultados del crecimiento de esquejes de *S. elegans* cultivados en la condición C1 (barras grises), se puede observar que las plantas colocadas en solución nutritiva (Hidroponía), crecieron 66.3 ± 4.15 cm, valor estadísticamente mayor al obtenido en los sustratos sólidos de Agrolita (vermiculita/agrolita/peat moss; 32.02 ± 2.79 cm), de Arena (27.82 ± 4.2 cm) y de Tierra (41.93 ± 4.55 cm) ($p < 0.05$). Con un crecimiento de las plantas de mayor a menor de la siguiente manera: hidroponía>tierra>agrolita>arena, no hubo diferencia entre arena y agrolita ($p > 0.05$, **Figura 1A**).

En la condición C2, se observó un crecimiento de 44.68 ± 3.42 cm en el tratamiento con hidroponía, significativamente mayor al del grupo con arena (29.01 ± 2.89) o con tierra (33.89 ± 0.30) ($p < 0.05$, **Figura 1B**). El cultivo en agrolita con un crecimiento de 36 ± 5.5 cm, no induce cambios estadísticamente significativos cuando se compara con los grupos con hidroponía, o con tierra o con arena ($p > 0.05$, **Figura 1B**).



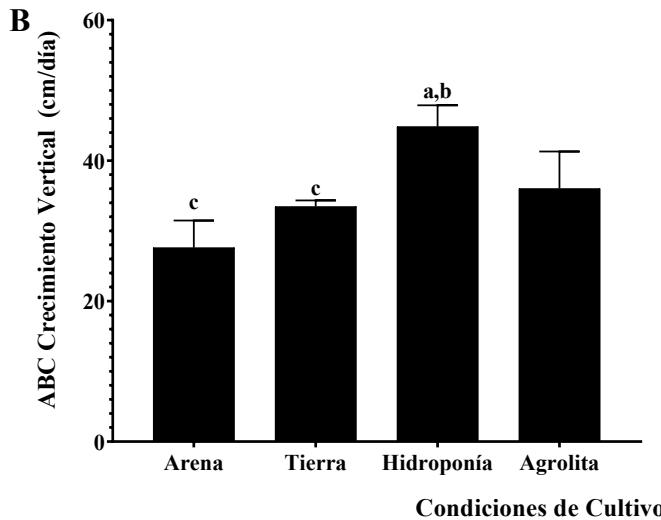


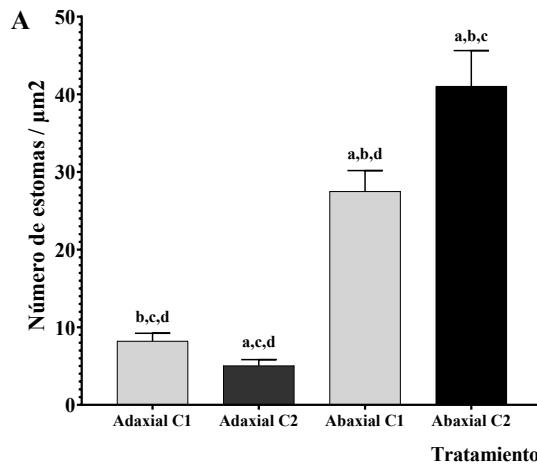
Figura 1. Crecimiento de los esquejes de *S. elegans* (cm) en diferentes tipos de sustratos y condiciones de luz C1 (A) o C2 (B). n= 10; ANOVA ± desviación estándar; post prueba de Bonferroni, $p < 0,05$. Los símbolos a, b, c y d, indican diferencias con el tratamiento con arena, con tierra, con hidroponía y con agrolita, respectivamente (n=10; $\bar{x} \pm DE$).

Figure 1. *S. elegans* vertical growth in different substrate types and light conditions C1 (A) or C2 (B). n= 10; ANOVA ± standard deviation; post hoc Bonferroni, $p < 0,05$. Symbols a, b, c and d indicate differences with the treatment with sand, with soil, with hydroponics, and with agrolite, respectively (n=10; $\bar{x} \pm SD$).

Parámetros morfométricos y de color durante crecimiento y desarrollo foliar

a) Densidad estomática y área foliar

La densidad de estomas en las regiones adaxiales de las hojas provenientes de C1 (8.95 ± 1.95), fue significativamente mayor que lo observado de las de C2, con un promedio de 5.51 ± 1.42 estomas por μm^2 (^{a,b} $p < 0.05$, **Figura 2A**); este parámetro fue más alto para la zona abaxial en comparación con la adaxial en ambas condiciones, siendo significativamente mayor en C2 (41.03 ± 4.60) que en C1, que promedió 26.56 ± 3.77 estomas por μm^2 (**Figura 2B**). La evaluación del parámetro morfométrico correspondiente al área foliar, mostró diferencias estadísticas significativas entre ambas condiciones de cultivo, siendo mayor el de las hojas cultivadas en C2 ($25.15 \pm 2.08 \text{ cm}^2$), que el de aquellas de C1 ($18 \pm 2.08 \text{ cm}^2$) (^{a,b} $p < 0.05$, **Figura 2C**).



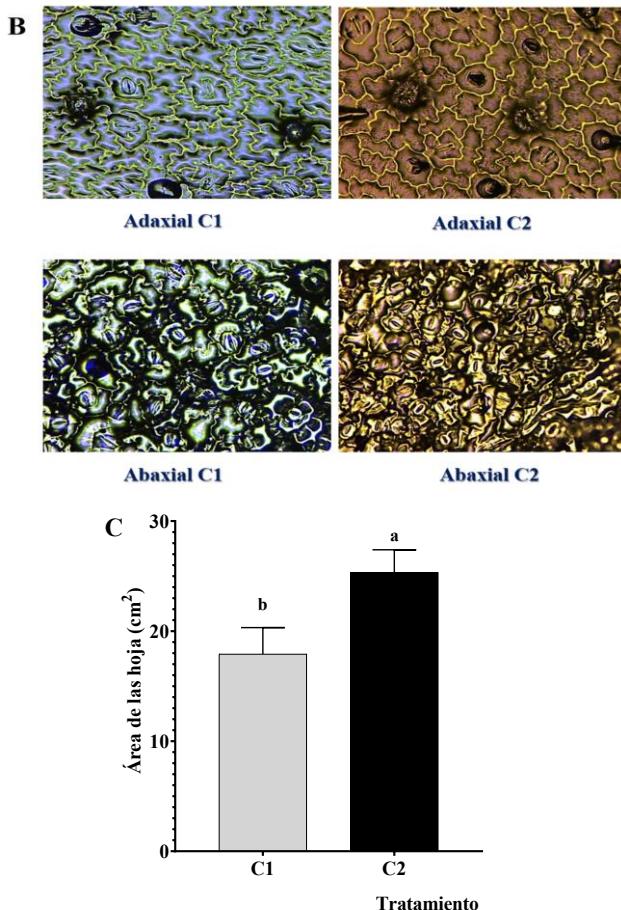


Figura 2. Densidad estomática (A) de plantas de *S. elegans* que crecen en diferentes condiciones de luz, C1 (□) y C2 (■). (B) microfotografías de los estomas en las regiones adaxiales y abaxiales; el área foliar C se representa como el tamaño del follaje en cm^2 . ANOVA post prueba Bonferroni; $p<0,05$ ($n=20$; $\bar{x} \pm \text{DE}$).

Figure 2. Stomatal density (A) of *S. elegans* plants grown in different light conditions, C1 (□) y C2 (■). (B) microscopic photographs of stomata on adaxial and abaxial regions; leaf area C is represented as foliar size in cm^2 . ANOVA post hoc. Bonferroni; $p<0,05$ ($n=20$; $\bar{x} \pm \text{DE}$).

b) Color

En la **Tabla 1**, se muestran los datos obtenidos del análisis por colorimetría realizado en hojas de *S. elegans* cultivadas bajo las condiciones C1 y C2.

Como sugiere el sistema CIE de colorimetría expuesto por Schanda (2007), para los valores de color normalizados con un iluminante D65 (luz diurna) y una posición del observador de 10° , se encontró que el color de las hojas entre ambas condiciones es ligeramente diferente, como se indica con un $\Delta E= 2.65$.

Tabla 1. Resultados de colorimetría de hojas de *S. elegans* cultivadas en dos condiciones de luz ($n= 40$).

Table 1. Colorimetric results of *S. elegans* leaves grown in two light conditions ($n= 40$)

| Condición de cultivo | R | G | B | L* | a* | b* |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| C1 | 47.87 | 78.13 | 27.48 | 29.79 | -21.46 | 26.39 |
| C2 | 56.18 | 82.60 | 31.21 | 32.07 | -20.26 | 27.01 |

$$\Delta E (\text{C1}, \text{C2}) = 2.65$$

La diferencia antes mencionada también se observa en el diagrama de cromaticidad tomado del CIE (**Figura 3**), el cual sitúa los valores medios de ambas condiciones (Shanda J., 2007). De acuerdo con lo anterior, el tono dominante en el sistema RGB fue G, ya que las hojas eran verdes. Sin embargo, a pesar de que el análisis mostraba que ambas condiciones coincidieron en G, se observó que el dato correspondiente al color de hojas cultivadas en C2 mostró una mayor contribución en R y B en comparación con aquellas provenientes de C1 (**Tabla 1**) (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014). La variabilidad instrumental de RGB y CIEL*a*b* fueron traducidas al sistema Munsell digitalizado (Jiménez-Aparicio & Gutiérrez, 2000); (Mathias-Rettig & Ah-Hen, 2014) y se observó que ambas muestras eran verde-amarillentas (5GY) y las diferencias se relacionaban con las contribuciones de V (luminosidad u oscuridad) y C (saturación). Por lo tanto, el color de las hojas cultivadas en C1 era menos claro, mientras que aquel de C2 tiene una mayor contribución del croma amarillo (**Figura 3**).

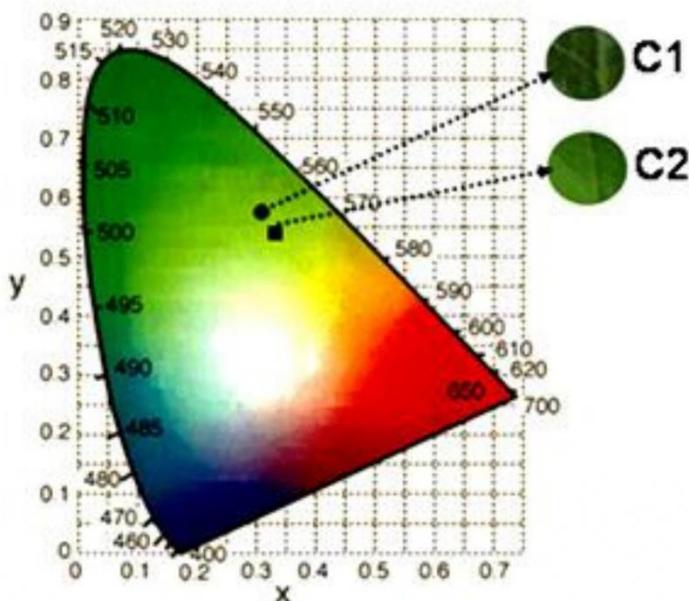


Figura. 3. CIE, diagrama de cromaticidad que muestra la diferencia de color de las hojas de *S. elegans*, cultivadas en las condiciones C1 y C2.

Figure 3. CIE, chromaticity diagram displaying *S. elegans* leaves color difference grown under conditions C1 and C2.

En este sentido, el color de las hojas de C1 presentaron mayor intensidad en el verde en comparación con las de C2, que fueron verde-amarillentas; este aspecto se destaca con el valor de L* (luminosidad), donde los valores que tienden a 100 corresponden al blanco y los cercanos a 0, al negro. El valor de C1 fue menor que C2 en términos de L* y su apariencia es más oscura. En la **Figura 3**, se muestran las diferencias, posicionando el color para ambas condiciones.

Edema local inducido por TPA

El TPA provocó un edema significativo en la oreja (control negativo VEH, **Tabla 2**), que fue significativamente disminuido en un 85.2% por la DEX (control positivo, * $p < 0.05$). Todos los tratamientos experimentales fueron activos, y presentaron diferencias estadísticas significativas en comparación con el VEH (* $p < 0.05$), con excepción de SeC2r ($p > 0.05$). El tratamiento SeC1a indujo el mayor porcentaje de inhibición del edema (81.82%), por lo que fue seleccionado para una curva dosis-respuesta (0.25, 0.5, 2.0, 4.0 mg/oreja). En la **Tabla 2**, se observa que las dosis bajas no inducen cambios significativos respecto al grupo de control negativo VEH ($p > 0.05$), pero las dosis altas disminuyen el edema por encima del 80%, valores significativamente menores al grupo VEH (* $p < 0.05$). Los valores farmacodinámicos fueron Emáx= 68.49 % y DE₅₀=2.42 mg/oreja.

Tabla 2. Efecto de la administración local del extracto hidroalcohólico de plantas de *S. elegans* cultivadas a diferentes condiciones, sobre la inflamación inducida con TPA en oreja de ratón.

Table 2. Local administration effect of *S. elegans* hydroalcoholic extract from plants grown at different conditions on TPA-induced inflammation in mouse ear.

| Tratamiento | Dosis (mg/oreja) | Edema de oreja (mg) | Inhibición del edema (%) |
|------------------------------|------------------|---------------------|--------------------------|
| VEH | | 8.8 ±1.15 | --- |
| DEX | 0.5 | 1.3 ±0.18* | 85.23 |
| SeHA | 1.0 | 2.46 ±0.75* | 72.05 |
| | | 2.28 ±0.41* | 74.09 |
| | | 1.6 ±0.47* | 81.82 |
| | | 6.36 ±0.86* | 27.73 |
| | | 3.16 ±0.32* | 64.09 |
| Curva dosis-respuesta | | | |
| SeC1a | 0.25 | 8.8 ±1.15 | 7.77 |
| | 0.5 | 6.44 ±1.07 | 18.18 |
| | 1.0 | 1.6 ±0.47* | 81.82 |
| | 2.0 | 0.93 ± 0.54* | 89.39 |
| | 4.0 | 0.4 ±0.38* | 95.45 |

Grupo vehículo (VEH); dexametasona (DEX), Raíz C1 (SeC1r), Aérea C1 (SeC1a), Raíz C2 (SeC2r), Aérea C2 (SeC2a), extracto de cultivo hidropónico partes aéreas (SeHa). ANOVA *post hoc* Bonferroni, * $p \leq 0.05$ ($n=6$; $\bar{x} \pm DE$).

Vehicle group (VEH); dexamethasone (DEX), C1 Root (SeC1r), C1 Aerial (SeC1a), C2 Root (SeC2r), C2 Aerial (SeC2a), hydroponic culture aerial parts extract (SeHa). ANOVA *post hoc* Bonferroni, * $p \leq 0.05$ ($n=6$; $\bar{x} \pm DE$).

Perfil químico cualitativo

El análisis químico preliminar realizado con CCF, permitió analizar los extractos tipo hidroalcohólico provenientes de partes aéreas (SeC1a, SeC2a y SeHa) y raíces (SeC1r y SeC2r) de *S. elegans* cultivados en C1 y C2, así como del extracto hidroalcohólico de especímenes que crecieron de forma silvestre (SeS). Para ello, las muestras fueron comparadas contra estándares de terpenos, en este caso el ácido oleánólico (AO) y el ácido ursólico (AU) así como del flavonoide Quercetina (Q).

La detección de compuestos fue realizada al comparar los valores de Rf obtenidos de las bandas observadas de cada muestra, con aquellos registrados para cada estándar (**Tabla 3**).

De acuerdo con la metodología empleada en el presente trabajo, el material vegetal cosechado de *S. elegans* C1 y C2, el rendimiento de algunos extractos fue menor al 20 % y sólo SeC1a, SeHa y el de la planta silvestre SeS, rebasan dicho valor (**Tabla 3**). De acuerdo con lo anterior, se decidió utilizarlos principalmente para las pruebas farmacológicas. Al término de la evaluación farmacológica, los residuos de cada extracto se emplearon para la identificación preliminar de compuestos presentes en ellos a través de CCF y evaluar las diferencias y semejanzas químicas entre estos.

Los tratamientos de *S. elegans*, al ser comparados con los estándares de los terpenos AU y AO y del flavonoide Q, empleando un sistema de elución de CHCl₃: acetonitrilo: MeOH (1:2:1) y revelando con difenilborato de aminoetanol no se detectó alguna mancha amarillo-anaranjado que revelaría la presencia de flavonoides. Sin embargo, al revelar con Sulfato cérico, se logró detectar la banda que correspondía para Q en la muestra SeC2a. Por otro lado, la comparación de los extractos con actividad antiinflamatoria con los estándares AU y AO, en un sistema de elución CHCl₃: Acetona (9:1) que fue revelado con sulfato cérico, se pudo confirmar que AU está presente en SeC1a y SeS; mientras que en el extracto SeC2a al parecer sólo tiene AO al ser analizado por esta técnica cualitativa (**Tabla 3**).

Tabla 3. Análisis del rendimiento de extracción y del perfil químico cualitativo realizado a través de cromatografía en capa fina de los extractos hidroalcohólicos de partes aéreas y de raíces de plantas de *S. elegans* cultivadas en dos condiciones de luz y de plantas silvestres.

Table 3. Extraction yield and qualitative chemical profile analysis performed by thin layer chromatography of hydroalcoholic extracts from aerial parts and roots of *S. elegans* plants grown under two light conditions and from wild plants.

| Extracto | Estándares (Rf) | | | Rendimiento (%R) |
|----------|-----------------|--------------|-------------|------------------|
| | AO (0.34) | AU (0.32) | Q (0.72) | |
| SeC1a | + | + | - | 20.55 |
| SeC2a | + | - | + | 6.78 |
| SeHa | - | - | - | 44.89 |
| SeC1r | - | - | - | 11.41 |
| SeC2r | - | - | - | 5.12 |
| SeS | + | + | - | 39.87 |

DISCUSIÓN

A la fecha no se han reportado datos de un estudio sobre métodos de cultivo para obtener material vegetal estandarizado de *S. elegans*. En este trabajo se propone que esta especie medicinal puede lograr ser cultivada de una forma controlada en condiciones de hidroponía, ya que como se sabe es una excelente técnica de propagación, que proporciona un alto rendimiento de biomasa y de metabolitos secundarios con actividades farmacológicas (Dayani & Sabzalian, 2017), permite controlar el volumen de agua de riego y la eliminación de contaminantes, disminuyendo el impacto negativo al medio ambiente (Maggini *et al.*, 2022). El cultivo bajo condiciones controladas, por ejemplo, de luz y temperatura, es una alternativa para producir plantas medicinales, asegurando la obtención constante y homogénea de sus principios activos debido a que la fotosíntesis y la acumulación de masa es constante (Aggarwal y Mathur, 2020). Observamos que, para esta planta mexicana, las condiciones de luz en cultivo hidropónico fueron determinantes para el mejor crecimiento y desarrollo. Se mostró que la superficie adaxial de las hojas de *S. elegans* cultivadas bajo altas intensidades de luz, desarrolló mayor densidad estomática, resultados similares se han reportado en tomate (Gay & Hurd, 1975), tabaco (Thomas *et al.*, 2004) y *Arabidopsis* (Wang *et al.*, 2007). Se ha observado que el movimiento, tamaño, distribución y densidad de las estomas son factores que determinan el intercambio de agua y CO₂, por tanto, la fotosíntesis y la transpiración son indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La intensidad de la luz ambiental es uno de los factores que afectan la densidad estomática (Lake *et al.*, 2002). Así que, al controlar la intensidad de esta variable en el cultivo hidropónico de mirto rojo, como se indica en la literatura también se incide sobre la presencia de los estomas.

El área foliar se vio afectada por la intensidad de luz a la que fue sometida, con valores bajos se desarrollaron hojas más grandes. En la literatura se menciona que cuando las plantas crecen en intensidades de luz bajas, muestran tasas más altas de fotosíntesis, lo que se relaciona con la conductancia del CO₂ dentro de la hoja, afectando el área foliar (Francisco-Nava *et al.*, 2011).

Aunque los resultados obtenidos en Munsell pueden ser subjetivos, en el caso de los tejidos vegetales es útil, ya que se pueden intuir posibles deficiencias nutricionales como K, Fe, Cu o algunas enfermedades como la clorosis (Mendoza *et al.*, 2006). El desarrollo de las plantas puede atribuirse a los niveles de luminosidad (C1 y C2), debido a que la variable fue modificada.

Se sabe que la luz afecta la concentración y presencia de pigmentos accesorios (Shanda J., 2007), por ello se esperaba que ambas condiciones presentaran diferencias en los valores del tri-estímulo (L*, a*, b*). El valor de a* indica la contribución del rojo (valores positivos) y del verde (valores negativos) al color total; C1 fue superior a C2. Mientras que b*, indica el componente amarillo (positivo) y azul (negativo); en ambos casos el componente se observó amarillo, el valor para C1 fue menor que en C2. Los resultados obtenidos coinciden con la literatura, debido a que la

composición química de la planta se altera en función de la luminosidad aplicada al cultivo (Jiménez-Aparicio & Gutiérrez, 2000).

Para sobrevivir a las condiciones ambientales adversas, las plantas han desarrollado mecanismos útiles para defenderse y utilizar de manera óptima los recursos circundantes para su crecimiento y desarrollo (Camacho-Escobar, 2020). Según los resultados de la CCF, en el extracto SeC1a están presentes los triterpenos AU y AO. Estos compuestos se distribuyen ampliamente por todo el reino Plantae como parte del metabolismo secundario y se ha reportado que tienen actividades farmacológicas como la anticancerígena y antiinflamatoria (Gudoityte *et al.*, 2021).

Se ha demostrado que al menos 88 especies de la familia Lamiaceae son capaces de sintetizar AU y AO (Kalaycioğlu *et al.*, 2018). Algunos ejemplos son *S. officinalis* (Rodrigues *et al.*, 2021), *S. microphylla* (Aydoğmuş *et al.*, 2006), *S. hydrangea* (Abdollahi-Ghehi *et al.*, 2019) y *S. glutinosa* (Bajalan *et al.*, 2016), cuyas propiedades farmacológicas han sido demostradas en diferentes modelos biológicos. El AO y su isómero AU, son potentes antiinflamatorios y eficaces en diferentes ensayos antiinflamatorios (González-Chávez *et al.*, 2017). Se ha publicado que el AU ocasionalmente es capaz de inducir la liberación de mediadores proinflamatorios en células y tejidos normales, de modo que se le puede asignar un doble papel biológico (Ikeda *et al.*, 2008). El AO es un compuesto principal de las plantas medicinales e igualmente induce una variedad de actividades biológicas, por ejemplo, como antioxidante, anticancerígeno (Gudoityte *et al.*, 2021) e inhibe la síntesis de leucotrienos (mediadores inflamatorios) reduciendo la acción inflamatoria local de sustancias como TPA (González-Chávez *et al.*, 2017); (Paje *et al.*, 2022). Es probable entonces, que la acción antiinflamatoria del extracto SeC1a en la prueba de edema por TPA, se debiera a la presencia de esos ácidos terpénicos, sin descartar la participación de otros compuestos, como los flavonoides.

Los extractos SeC2a, SeHa y SeC1r redujeron significativamente el edema local en la oreja de ratón. SeC2a también contiene AO, aunque no reveló para AU, por lo que en este caso el efecto antiinflamatorio se puede atribuir, en parte, al contenido del primero. En SeHa y SeC1r, no fue posible detectar AU ni AO, se infiere que otros son los compuestos activos.

A la fecha, no existen datos de cultivos tecnológicos de la especie *S. elegans*, que muestren que la intensidad de luz en condiciones de hidroponía modifique el desarrollo de la planta. Aunque, existe un estudio con otra especie, *S. yangii* (B. T. Drew), en el que se evaluó la influencia de 3 diferentes intensidades lumínicas (70 , 130 y $220 \mu\text{mol.cm}^2.\text{s}^{-1}$), en cultivos *in vitro* y sobre el perfil metabólico de las plantas estudiadas. Encuentro que las condiciones de luz aplicadas al cultivo en su diseño experimental modifican la longitud y la masa de los brotes axilares, además de una variación en el perfil de metabolitos secundarios asociados a la intensidad luminosa aplicada (Kozłowska *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

Las condiciones lumínicas sobre las cuales se estableció el cultivo de *S. elegans*, permitieron determinar el impacto de este factor sobre las plantas, ya que se observó que incide de manera importante sobre su crecimiento y sobre los parámetros morfométricos asociados al desarrollo foliar, influyendo en la producción de metabolitos secundarios, lo cual le confiere la calidad como antiinflamatoria a dicha especie medicinal.

Recomendaciones. Se propone continuar con el establecimiento de técnicas que permitan la obtención del material vegetal en condiciones controladas, que conduzcan a mejorar la calidad de *S. elegans*, tanto en la abundancia, crecimiento del material vegetal y aumentar también la producción homogénea de metabolitos secundarios que puedan ser útiles farmacológicamente.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Abdollahi-Ghehi, H., Sonboli, A., Ebrahimi, S. N., Esmaeili, M. A., & Mirjalili, M. H. (2019). Triterpenic acid content and cytotoxicity of some *Salvia* Species from Iran. *Natural Product Communications*, 14(5), 1934578X1984272. <https://doi.org/10.1177/1934578X19842722>
- Aggarwal, A., & Mathur, A. (2020). Nexus between light and culture media on morphogenesis in *Bacopa monnieri* and saponin yield thereof. *Heliyon*, 6(10), e05245. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05245>
- Argueta, A., Asseleih, L. M., & Rodarte García, M. E. (1994). *Atlas de las plantas de la medicina tradicional mexicana* (Primera Edición). Instituto Nacional Indigenista.
- Aydoğmuş, Z., Yeşilyurt, V., & Topcu, G. (2006). Constituents of *Salvia microphylla*. *Natural Product Research*, 20(8), 775–781. <https://doi.org/10.1080/14786410500462843>
- Bajalan, I., Mohammadi, M., Alaei, M., & Pirbalouti, A. G. (2016). Total phenolic and flavonoid contents and antioxidant activity of extracts from different populations of lavandin. *Industrial Crops and Products*, 87, 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.04.059>
- Barrera, E., & Mesa, I. (1992). Características de la epidermis foliar de árboles chilenos. I. Subclase Magnoliidae. Chile. Boletín del Museo Nacional de Historia Natural 43: 29-39.
- Bayat, H., & Moghadam, A. N. (2019). Drought effects on growth, water status, proline content and antioxidant system in three *Salvia nemorosa* L. cultivars. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(9), 149. <https://doi.org/10.1007/s11738-019-2942-6>
- Camacho-Escobar, M. A., Ramos-Ramos, D. A., Ávila-Serrano, N. Y., Sánchez-Bernal, E. I., & López-Garrido, S. J. (2020). The physico-chemical plant defenses and its effect on ruminant feeding. *Revista Terra Latinoamericana*, 38(2), 443–453. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.629>
- Carratù, B., Boniglia, C., Ciarrocchi, M., Gargiulo, R., & Sanzini, E. (2010). Convenient TLC for the detection of a herbal ingredient in a food supplement. *Nat Prod Res*, 24(20), 1954-60. <https://doi.org/10.1080/14786419.2010.508744>
- Dayani, S., & Sabzalian, M. R. (2016). Production of secondary metabolites in medicinal plants through hydroponic systems. In *Controlled environment agriculture*. (pp. 33–51). Nova Science Publishers, Inc.
- Francisco-Navá, J. J., Jiménez-Aparicio, A. R., De Jesús-Sánchez, A., Arenas-Ocampo, M. L., Ventura-Zapata, E., & Evangelista-Lozano, S. (2011). Estudio de la morfología y aclimatación de plantas de *Laelia eyermaniana* RCHB. f. generadas *in vitro*. *Polibotánica*, 32, 107–117.
- Gautam, R. D., Kumar, A., Kumar, R., Chauhan, R., Singh, S., Kumar, M., Kumar, D., Kumar, A., & Singh, S. (2021). Clonal propagation of *Valeriana jatamansi* retains the essential oil profile of mother plants: An approach toward generating homogenous grade of essential oil for industrial use. *Frontiers in Plant Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.738247>
- Gay, A. P., & Hurd, R. G. (1975). The influence of light on stomatal density in the tomato. *New Phytologist*, 75(1), 37–46. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1975.tb01368.x>
- González-Chávez, M. M., Ramos-Velázquez, C. S., Serrano-Vega, R., Pérez-González, C., Sánchez-Mendoza, E., & Pérez-Gutiérrez, S. (2017). Anti-inflammatory activity of standardized dichloromethane extract of *Salvia connivens* on macrophages stimulated by LPS. *Pharmaceutical Biology*, 55(1), 1467–1472. <https://doi.org/10.1080/13880209.2017.1305423>
- Gudoityte, E., Arandarcikaite, O., Mazeikiene, I., Bendokas, V., & Liobikas, J. (2021). Ursolic and Oleanolic Acids: Plant metabolites with neuroprotective potential. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 4599. <https://doi.org/10.3390/ijms22094599>
- Gutiérrez-Román, A.S., González-Cortazar, M., Trejo-Tapia, G., Herrera-Ruiz, M., Zamilpa, A., Sánchez-Mendoza, E., De la Cruz-Sánchez, N. G., & Jiménez-Ferrer, E. (2021). Angiotensin-converting enzyme inhibitors from *Salvia elegans* Vahl. *Nat Prod Res*, 35(23):5344-5349. <https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1758093>

- Herrera-Ruiz, M., García-Beltrán, Y., Mora, S., Díaz-Véliz, G., Viana, G. S. B., Tortoriello, J., & Ramírez, G. (2006). Antidepressant and anxiolytic effects of hydroalcoholic extract from *Salvia elegans*. *J Ethnopharmacol*, 107(1), 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2006.02.003>
- Hoagland, D. R., & Arnon, D. I. (1950). *The water-culture method for growing plants without soil: Vol. C347 rev 1950* (Circular-347). Berkeley, Calif.: College of Agriculture, University of California.
- Husin, Z. Bin, Shakaff, A. Y. B. Md., Aziz, A. H. B. A., & Farook, R. B. S. M. (2012). Feasibility Study on Plant Chili Disease Detection Using Image Processing Techniques. *2012 Third International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation*, 291–296. <https://doi.org/10.1109/ISMS.2012.33>
- Ikeda, Y., Murakami, A., & Ohigashi, H. (2008). Ursolic acid: An anti- and pro-inflammatory triterpenoid. *Molecular Nutrition & Food Research*, 52(1), 26–42. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200700389>
- Jiménez-Aparicio, A., & Gutiérrez, G. (2000). *Propiedades ópticas: color. En: Métodos para evaluar propiedades físicas en la industria de alimentos*. (J. Alvarado, Ed.). Editorial Aciriba.
- Jiménez-Ferrer, E., Hernández Badillo, F., González-Cortazar, M., Tortoriello, J., & Herrera-Ruiz, M. (2010). Antihypertensive activity of *Salvia elegans* Vahl. (Lamiaceae): ACE inhibition and angiotensin II antagonism. *Journal of Ethnopharmacology*, 130(2), 340–346. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.05.013>
- Kalaycıoğlu, Z., Uzaşçı, S., Dirmenci, T., & Erim, F. B. (2018). α-Glucosidase enzyme inhibitory effects and ursolic and oleanolic acid contents of fourteen Anatolian *Salvia* species. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 155, 284–287. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2018.04.014>
- Karpiński, T. M. (2020). Essential Oils of Lamiaceae Family Plants as Antifungals. *Biomolecules*, 10(1), 103. <https://doi.org/10.3390/biom10010103>
- Kozłowska, W., Matkowski, A., & Zielińska, S. (2022). Light intensity and temperature effect on *Salvia yangii* (B. T. Drew) metabolic profile *in vitro*. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.888509>
- Lake, J. A., Woodward, F. I., & Quick, W. P. (2002). Long-distance CO₂ signalling in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53(367), 183–193. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.367.183>
- Lin, K.H., Lin, T.Y., Wu, C.W., & Chang, Y.S. (2021). Protective Effects of Salicylic Acid and Calcium Chloride on Sage Plants (*Salvia officinalis* L. and *Salvia elegans* Vahl) under High-Temperature Stress. *Plants*, 10(10), 2110. <https://doi.org/10.3390/plants10102110>
- Lin, K. H., Jhou, Y. J., Wu, C. W., & Chang, Y. S. (2020). Growth, physiological, and antioxidant characteristics in green and red *Perilla frutescens* varieties as affected by temperature- and water-stressed conditions. *Scientia Horticulturae*, 274, 109682. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109682>
- Maggini, R., Tzortzakis, N., & Currey, C. J. (2022). Editorial: Soilless Culture for Vegetative Biomass Production and Specialized Metabolites: Medicinal, Aromatic, and Edible Plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 887487. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.887487/BIBTEX>
- Martínez-Gordillo, M., Bedolla-García, B., Cornejo-Tenorio, G., Fragoso-Martínez, I., García-Peña, M. del R., González-Gallegos, J. G., Lara-Cabrera, S. I., Zamudio, S., Martínez-Gordillo, M., Bedolla-García, B., Cornejo-Tenorio, G., Fragoso-Martínez, I., García-Peña, M. del R., González-Gallegos, J. G., Lara-Cabrera, S. I., & Zamudio, S. (2017). Lamiaceae de México. *Botanical Sciences*, 95(4), 780–806. <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.1871>
- Martínez-Hernández, G. B., Jiménez-Ferrer, E., González-Cortazar, M., Román-Ramos, R., Tortoriello, J., Vargas-Villa, G., & Herrera-Ruiz, M. (2021). Antidepressant and anxiolytic compounds isolated from *Salvia elegans* interact with serotonergic drugs. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, 394(12), 2419–2428. <https://doi.org/10.1007/s00210-021-02155-6>

Recibido:
11/junio/2024

Aceptado:
20/noviembre/2024

- Martínez-Hernández, G. B., Jiménez-Ferrer, E., González-Cortazar, M., Zamilpa, A., Monterrosas-Brisson, N., & Herrera-Ruiz, M. (2024). *Salvia elegans* Vahl Counteracting Metabolic Syndrome and Depression in Mice on a High-Fat Diet. *Molecules*, 29(17):4070. <https://doi.org/10.3390/molecules29174070>
- Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 42(2), 57–66. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2014.v42n2-07>
- Maynard, R. C. I., & Ruter, J. M. (2024). Co60 gamma irradiation reduces rooting ability in M1V1*Salvia uliginosa* while inducing leaf variegation. *Int J Radiat Biol*, 100(4):663-668. <https://doi.org/10.1080/09553002.2024.2304852>
- Mendoza, F., Dejmek, P., & Aguilera, J. M. (2006). Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 41(3), 285–295. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2006.04.004>
- Mora, S., Millán, R., Lungenstrass, H., Díaz-Véliz, G., Morán, J. A., Herrera-Ruiz, M., & Tortoriello, J. (2006). The hydroalcoholic extract of *Salvia elegans* induces anxiolytic- and antidepressant-like effects in rats. *J Ethnopharmacol*, 106(1):76-81. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2005.12.004>
- Nicola, S., Fontana, E., Hoeberechts, J., & Saglietti, D. (2005). Rooting products and cutting timing on sage (*Salvia officinalis* L.) propagation. *Acta Hortic*, 676, 135-141. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.676.16>
- Paje, L. A., Choi, J., Lee, H.-D., Kim, J., Yu, A. R., Bae, M.-J., Geraldino, P. J. L., & Lee, S. (2022). Phenolic acids and flavonoids from *Salvia plebeia* and HPLC-UV profiling of four *Salvia* species. *Heliyon*, 8(3), e09046. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09046>
- Payá, M., Ferrández, M. L., Sanz, M. J., Bustos, G., Blasco, R., Ríos, J. L., & Alcaráz, M. J. (1993). Study of the antioedema activity of some seaweed and sponge extracts from the Mediterranean coast in mice. *Phytother. Res*, 7, 159–162. <https://doi.org/10.1002/PTR.2650070213>
- Pereira, O., Catarino, M., Afonso, A., Silva, A., & Cardoso, S. (2018). *Salvia elegans*, *Salvia greggii* and *Salvia officinalis* decoctions: antioxidant activities and inhibition of carbohydrate and lipid metabolic enzymes. *Molecules*, 23(12), 3169. <https://doi.org/10.3390/molecules23123169>
- Pérez, M., Jiménez, S., Ebrahimzadeh, A., Verdejo, M. M., Chaves, L. A., & Lao, M. T. (2008). Propuesta de una metodología para la determinación del color del tejido vegetal. *Actas de Horticultura. Innovación y futuro en la jardinería*, 52, 237-242.
- Ramírez-Zea, G., Chávez-Servia, J. L., & Archundia-Garduño E. (2016). *Salvias del Estado de México, una perspectiva general* (Primera edición). Secretaría de Desarrollo Agropecuario.
- Ricciardi, G., & Ricciardi, A. (2000). Efecto de las variaciones estacionales sobre la composición química del aceite esencial de plantas de “*Salvia morada*” de Sáenz Peña (Chaco). *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas UNNE; Exactas*, 11.
- Rodrigues, M. R. A., Kanazawa, L. K. S., Neves, T. L. M. das, Silva, C. F. da, Horst, H., Pizzolatti, M. G., Santos, A. R. S., Baggio, C. H., & Werner, M. F. de P. (2012). Antinociceptive and anti-inflammatory potential of extract and isolated compounds from the leaves of *Salvia officinalis* in mice. *J Ethnopharmacol*, 139(2), 519–526. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2011.11.042>
- Schanda, J. (2007). *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley; Chichester.
- Thomas, P. W., Woodward, F. I., & Quick, W. P. (2004). Systemic irradiance signalling in tobacco. *New Phytologist*, 161(1), 193–198. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00954.x>
- Wang, H., Ngwenyama, N., Liu, Y., Walker, J. C., & Zhang, S. (2007). Stomatal development and patterning are regulated by environmentally responsive mitogen-activated protein kinases in *Arabidopsis*. *The Plant Cell*, 19(1), 63–73. <https://doi.org/10.1105/tpc.106.048298>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

**COMPARACIÓN DE LA GERMINACIÓN
DE SEMILLAS Y EL DESARROLLO
INICIAL DE PLÁNTULAS DE *Agave*
angustifolia Haw. Y *Agave karwinskii* Zucc. EN
CONDICIONES *in vitro* Y EN
INVERNADERO**

**COMPARISION OF SEED GERMINATION
AND SEEDLINGS INITIAL
DEVELOPMENT OF *Agave angustifolia* Haw.
AND *Agave karwinskii* Zucc. *in vitro* AND
GREENHOUSE CONDITIONS**

Cebrián Barba, V., E. Pérez Molphe Balch, L.I. Chávez Ortiz

COMPARACIÓN DE LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y EL DESARROLLO
INICIAL DE PLÁNTULAS DE *Agave angustifolia* Haw. Y *Agave karwinskii* Zucc. EN
CONDICIONES *in vitro* Y EN INVERNADERO
COMPARISION OF SEED GERMINATION AND SEEDLINGS INITIAL
DEVELOPMENT OF *Agave angustifolia* Haw. Y *Agave karwinskii* Zucc. EN
CONDICIONES *in vitro* Y EN INVERNADERO



Comparación de la germinación de semillas y el desarrollo inicial de plántulas de *Agave angustifolia* Haw. y *Agave karwinskii* Zucc. en condiciones *in vitro* y en invernadero

Comparision of seed germination and seedlings initial development of *Agave angustifolia* Haw. and *Agave karwinskii* Zucc. *in vitro* and greenhouse conditions

Victoria Cebrián Barba,
Eugenio Pérez Molphe Balch,
Lucía Isabel Chávez Ortiz

**COMPARACIÓN DE LA
GERMINACIÓN DE
SEMIAS Y EL
DESARROLLO INICIAL DE
PLÁNTULAS DE *Agave*
angustifolia Haw. Y *Agave*
karwinskii Zucc. EN
CONDICIONES *in vitro* Y EN
INVERNADERO**

**COMPARISON OF SEED
GERMINATION AND
SEEDLINGS INITIAL
DEVELOPMENT OF *Agave*
angustifolia Haw. AND *Agave*
karwinskii Zucc. *in vitro* AND
GREENHOUSE
CONDITIONS**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 199-212. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.12

Victoria Cebrián-Barba

Eugenio Pérez-Molphe-Balch <https://orcid.org/0000-0003-3394-2486>

Lucía Isabel Chávez-Ortiz. Autora de correspondencia: isabel.chavez@edu.uaa.mx
<https://orcid.org/0000-0002-3811-9256>

*Unidad de Biotecnología Vegetal, Universidad Autónoma de Aguascalientes,
Av. Universidad #940. Aguascalientes, Ags., México. C.P. 20100*

RESUMEN: Los agaves son especies clave de los ecosistemas áridos y semiáridos; además tienen una gran importancia económica debido a los productos que se pueden obtener de ellos. Destaca el mezcal, bebida alcohólica cuya producción y consumo han incrementado en los últimos años. Para su elaboración se usan diferentes especies, entre ellas *A. angustifolia* y *A. karwinskii*; frecuentemente se emplean ejemplares silvestres, resultando en sistemas de aprovechamiento no sustentables. El cultivo de tejidos vegetales (CTV) es una opción viable para generar un gran número de plantas en mucho menos tiempo que los esquemas tradicionales, pero es importante considerar las características de las plantas generadas *in vitro* para conocer los alcances del CTV. En este trabajo se analizaron las diferencias en la germinación y el desarrollo inicial entre plántulas de *A. angustifolia* y *A. karwinskii* germinadas *in vitro* y en suelo. Para ambas especies se encontró que no hay diferencia en la germinación en suelo o *in vitro*; respecto a su desarrollo inicial, las vitroplantas acumulan una mayor cantidad de biomasa que las plántulas en suelo, y sus hojas tienen mayor longitud. Sin embargo, estas hojas no son suculentas, tienen muy poca cera epicuticular y sus estomas están atrofiados. Estas alteraciones morfo-fisiológicas se deben tomar en cuenta en la etapa de aclimatación a medio externo para incrementar el índice de supervivencia de las vitroplantas; sin embargo, estas alteraciones se compensan con creces por la gran cantidad de plantas que se pueden obtener en poco tiempo.

Palabras clave: *Agave*, cultivo *in vitro*, estomas, germinación

ABSTRACT: Agaves are keystone species in arid and semi-arid ecosystems. They are of great economic importance as well due to the products that can be obtained from them. Within these products is worth highlighting mezcal, a spirit whose production and consumption has markedly increased in recent years. Mezcal can be elaborated with several different species, *A. angustifolia* and *A. karwinskii* among them; in the case of these species, wild specimens are frequently used for production, which leads to unsustainable exploitation systems. Plant tissue culture (PTC) is a viable option to generate a great number of plant specimens in a considerably shorter amount of time than with traditional means. However, it is important to understand the characteristics of *in vitro* plants to understand the reach of PTC. In this study, the differences between germination and early development of seedlings, *in vitro* and in soil, of *A. angustifolia* and *A. karwinskii* were analyzed. For both species, the results indicate no difference between soil and *in vitro* germination. In early development, *in vitro* seedlings accumulated a larger biomass than those in soil, as well as longer leaves. However, these were not succulent leaves and presented atrophied stomata as well as little epicuticular wax. These morphophysiological alterations must be accounted for in the acclimation stage to an external environment in order to increase the survival rate of *in vitro*

specimens. Notwithstanding, the large number of plants that can be produced in such short period of time make up for the presence of said alterations.

Key words: *Agave*, germination, *in vitro* culture, stomata.

INTRODUCCIÓN

Los agaves son uno de los componentes más notables de la riqueza florística de México. Tienen gran importancia ecológica, gracias a su capacidad de habitar en zonas con una baja disponibilidad de agua y altas temperaturas; esto los convierte en integrantes fundamentales de muchos de los ecosistemas de las zonas áridas o semiáridas del país (García-Mendoza, 2007). Además, los agaves han sido muy importantes para la subsistencia de los grupos humanos que habitan el actual territorio de México desde los primeros grupos de cazadores y recolectores que obtenían alimentos y materiales de estas plantas; hoy en día los agaves siguen siendo fuente de innumerables productos, desde alimentos y bebidas ancestrales, hasta biocombustibles y edulcorantes (Delgado-Lemus *et al.*, 2014; García-Mendoza, 2007; Ramírez-Tobías *et al.*, 2014). Sin embargo, por su importancia económica sobresale la producción de bebidas alcohólicas destiladas a partir de algunos agaves, como el mezcal, cuyo consumo y precio se han incrementado de manera notable en los últimos años: la producción aumentó de 1.04 millones de litros en 2012 a 14.16 millones de litros en 2022 (COMERCAN, 2024), y las exportaciones de mezcal incrementaron de 8 a 53 millones de dólares entre 2013 y 2018 (INEGI, 2019). Así, el mezcal se ha convertido en una fuente de ingresos muy importante para algunas de las regiones más pobres del país (Delgado-Lemus *et al.*, 2014; García-Mendoza, 2007). Alrededor de 53 especies de *Agave* son utilizadas para la producción de mezcal (Torres *et al.*, 2015), y desafortunadamente su explotación no se ha hecho de una manera sostenible, pues muchos de los ejemplares utilizados para este fin provienen de poblaciones silvestres (Delgado-Lemus *et al.*, 2014).

La producción masiva de plantas de *Agave* a través del cultivo *in vitro* ha demostrado ser la opción más eficiente para generar en poco tiempo, y sin necesidad de grandes cantidades de material inicial, los propágulos necesarios para darle un manejo sostenible a estas especies (Bautista-Montes *et al.*, 2022). Se han reportado en la literatura diversos protocolos de multiplicación *in vitro* para varias especies de *Agave* utilizadas para la producción de mezcal, como *Agave cupreata*, *A. karwinskii*, *A. potatorum* (Domínguez-Rosales *et al.*, 2008) y *A. angustifolia* (Arzate-Fernández y Mejía-Franco, 2011). Sin embargo, una de las etapas críticas del proceso sigue siendo la adaptación al ambiente externo de las plantas generadas *in vitro*, debido a que estas exhiben una serie de alteraciones anatómicas y fisiológicas, entre ellas menor deposición de cera epicuticular, y estomas atrofiados y disfuncionales (Joshi *et al.*, 2006; Aliniaiefard *et al.*, 2020). Estos aspectos se deben considerar al aclimatar las vitroplantas al ambiente externo, pues les causan problemas para controlar la pérdida de agua (Aliniaiefard *et al.*, 2020).

A. angustifolia, conocido como espadín, tiene una amplia distribución en México y es la especie más utilizada para la producción de mezcal, motivo por el cual se cultiva en varias regiones del país. Por su parte, *A. karwinskii*, conocido como cuish, madrecuish o cirial, tiene una distribución mucho más restringida, limitada al Valle de Tehuacán, Puebla, y a los Valles Centrales y la Sierra Sur en Oaxaca; muchos de los ejemplares utilizados para la producción de mezcal proceden de poblaciones silvestres (Vázquez-Pérez *et al.*, 2020). Esta condición, además de su distribución natural restringida, han colocado a la especie en una situación de gran vulnerabilidad.

El objetivo de este trabajo fue analizar la germinación y el desarrollo inicial de plántulas de *Agave angustifolia* Haw. y *A. karwinskii* Zucc, bajo la hipótesis de que no habría diferencia en los parámetros asociados a la germinación en condiciones de cultivo *in vitro* y en condiciones de invernadero, pero si en el desarrollo y características de las plántulas cultivadas *in vitro* en comparación a las cultivadas en invernadero durante los primeros meses de desarrollo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Proceso de germinación de semillas de agave

Se obtuvieron semillas de *A. angustifolia* de Aguascalientes, Aguascalientes, y de *A. karwinskii* de Santiago Matatlán, Oaxaca. Para la germinación *ex vitro* se sembraron 100 semillas de cada una de las especies en charolas de plástico de 30 X 30 X 6 cm cubiertas por una bolsa de plástico transparente; el sustrato utilizado fue una mezcla a partes iguales de peat moss Vigoro ® y arena. Las charolas de germinación se colocaron en un lugar bien iluminado, en el que predominó una temperatura de alrededor de 22 °C, y se regaron conforme fue necesario para mantener una humedad adecuada del sustrato.

Para la germinación *in vitro* también se utilizaron 100 semillas de cada una de las especies; se efectuaron tres lavados de 5 min cada uno en una solución de Dermoclean ® 10% a la que se agregaron dos gotas de desinfectante comercial a base de plata ionizada (Microdyn ®) y después se enjuagaron con agua corriente. Se desinfectaron en una solución de etanol al 70% en agitación continua durante 45 s, se enjuagaron con agua corriente, para después sumergirlas en una solución de hipoclorito de sodio al 15% durante 20 min con agitación constante. En campana de flujo laminar, las semillas se enjuagaron tres veces con agua destilada estéril y se distribuyeron cinco semillas en cada recipiente de cultivo de vidrio; estos contenían medio Murashige & Skoog (1962) adicionado con vitaminas, 3% de sacarosa y 8 g l⁻¹ de agar como gelificante; no se utilizaron reguladores de crecimiento. El pH del medio de cultivo se ajustó a 5.7 y se esterilizó en autoclave a 121 °C por 15 min. Los cultivos se mantuvieron a 21-22 °C con un fotoperiodo de 16 h luz y 8 h oscuridad. A partir de la emergencia de las plántulas, estas se subculturaron cada 60 días en el medio antes descrito, y con las mismas condiciones de temperatura y fotoperiodo ya señaladas.

Análisis de la germinación y emergencia de las plántulas

Se registró diariamente la germinación de las semillas tanto *in vitro* como *ex vitro* durante 30 días. Además de registrar la germinación total se calcularon la velocidad de germinación (VG), la energía de germinación del día pico (día en el que se presentó la mayor cantidad de eventos de germinación, EG) y el tiempo medio de germinación (TMG) utilizando las siguientes ecuaciones (Fredrick *et al.*, 2015):

$$VG = \sum \frac{ni}{ti}$$

$$TMG = \frac{\sum (ni * ti)}{\sum ni}$$

Donde *ti* es el tiempo de germinación (días a partir de la siembra) y *ni* el número de semillas germinadas cada día.

$$EG = \frac{\text{Semillas germinadas el día pico}}{\text{Total de semillas germinadas después de 27 días}} * 100$$

Para la visualización de los datos se generaron curvas de Kaplan-Meier, y se evaluaron mediante las pruebas de Mantel-Cox y Mantel-Haenszel para determinar si las diferencias en la germinación de las semillas en ambas condiciones fueron significativas (Romano & Stevanato, 2020) empleando el software GraphPad Prism 10 ®.

Análisis del crecimiento y desarrollo de las plántulas

A partir del día 60 después de sembrar las semillas se realizaron mediciones mensuales para ambas especies. En cada medición se tomaron al azar plantas germinadas *in vitro* y *ex vitro*, de las que se registraron número de hojas, área foliar, longitud de la primera hoja, peso fresco y peso seco. Dos meses después se comenzó a medir el espesor de la primera hoja utilizando un vernier. El área foliar se calculó mediante el análisis de fotografías con el software Image J ®. Todos los datos se analizaron con el software GraphPad Prism 10 ®. Para cada uno de los parámetros se realizó una regresión lineal simple de los promedios de las mediciones obtenidas cada mes;

también se efectuó una ANOVA de una vía y se empleó la prueba de Bonferroni con un valor de significancia de 0.05.

Índice estomático y caracterización morfológica de los estomas

Para calcular el índice estomático se empleó la técnica de impresión epidérmica con barniz de uñas transparente; se aplicó una capa delgada de barniz tanto en el haz como en el envés de la hoja, se dejó secar y posteriormente se retiró con cuidado y se colocó sobre un portaobjetos, sin colocar cubreobjetos para no dañar la impresión. Las impresiones en barniz se observaron al microscopio óptico compuesto LEICA DME con el objetivo 40X y se contabilizaron estomas y células epidérmicas para calcular el índice estomático según la fórmula reportada por Cruz García *et al.* (2017):

$$IE = \frac{E}{E+CE} \times 100$$

En la que E es el número de estomas por campo de observación y CE es el número de células epidérmicas por campo de observación.

Para observar a detalle la morfología de la epidermis y del complejo estomático se realizaron cortes de 2 cm², tanto de haz como de envés de hojas de plantas de 320 días germinadas *in vitro* y *ex vitro* de ambas especies; todas las muestras se tomaron durante el día. Los cortes se colocaron en microtubos y se les agregó glutaraldehído al 1% como fijador; se realizaron varios lavados con PBS 1X y posteriormente se deshidrataron con una serie graduada de etanol (60 – 96 % v/v) de 10 a 15 min cada una. Las muestras se llevaron al secador de punto crítico SAMDRI-PVT-3D Touismis, y luego se colocaron sobre un cilindro con un disco de grafito de 1 X 1 cm para aplicarles una capa de oro utilizando el equipo Desk II Cold Sputter / Etch 123 Denton Vacuum, LLC. Posteriormente se observaron con el microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-5900LV.

RESULTADOS

El inicio de la germinación ocurrió en el día 4 *in vitro*, y en el día 5 en invernadero para las semillas de *A. angustifolia*; en *A. karwinskii* la germinación inició el día 3 *in vitro* y el día 5 en invernadero, aunque la emergencia final fue ligeramente más alta en condiciones de invernadero en ambas especies. Las curvas de Kaplan-Meier (Figura 1) representan la tasa de germinación observada a lo largo de 30 días; el último evento de germinación se presentó el día 27 en *A. angustifolia* y el día 25 en *A. karwinskii*. La germinación total, la velocidad de germinación, la energía de germinación en el día pico y el tiempo medio de germinación fueron muy similares en ambas condiciones de germinación para cada una de las especies analizadas, lo cual fue confirmado mediante las pruebas de Mantel-Cox y Mantel-Haenszel (tabla 1).

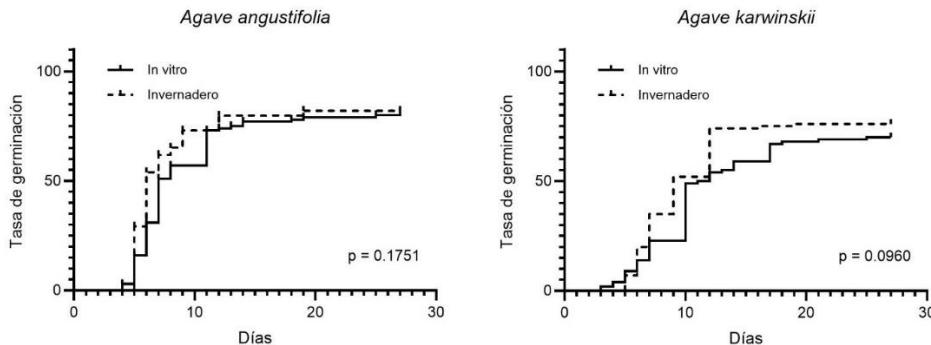


Figura 1. Curvas de Kaplan-Meier de las tasas de germinación de semillas de *A. angustifolia* y *A. karwinskii* *in vitro* (en medio MS adicionado con vitaminas, 3% de sacarosa y 9 g L⁻¹ de agar) y en condiciones de invernadero (en sustrato peat moss y arena a partes iguales).

Figure 1. Kaplan-Meier curves of the germination rates of *A. angustifolia* and *A. karwinskii* seeds *in vitro* (on MS medium supplemented with vitamins, 3% sucrose, and 9 g L⁻¹ agar) and under greenhouse conditions (on a substrate of equal parts peat moss and sand).

Según la prueba de Mantel-Cox, no hubo diferencias estadísticamente significativas entre ambas condiciones de germinación al analizar los datos con un valor de significancia de 0.05.

Tabla 1. Comparación de los parámetros asociados a la germinación de *A. angustifolia* y *A. karwinskii* *in vitro* vs. invernadero y resultados de las pruebas de Mantel-Cox y Mantel-Haenszel

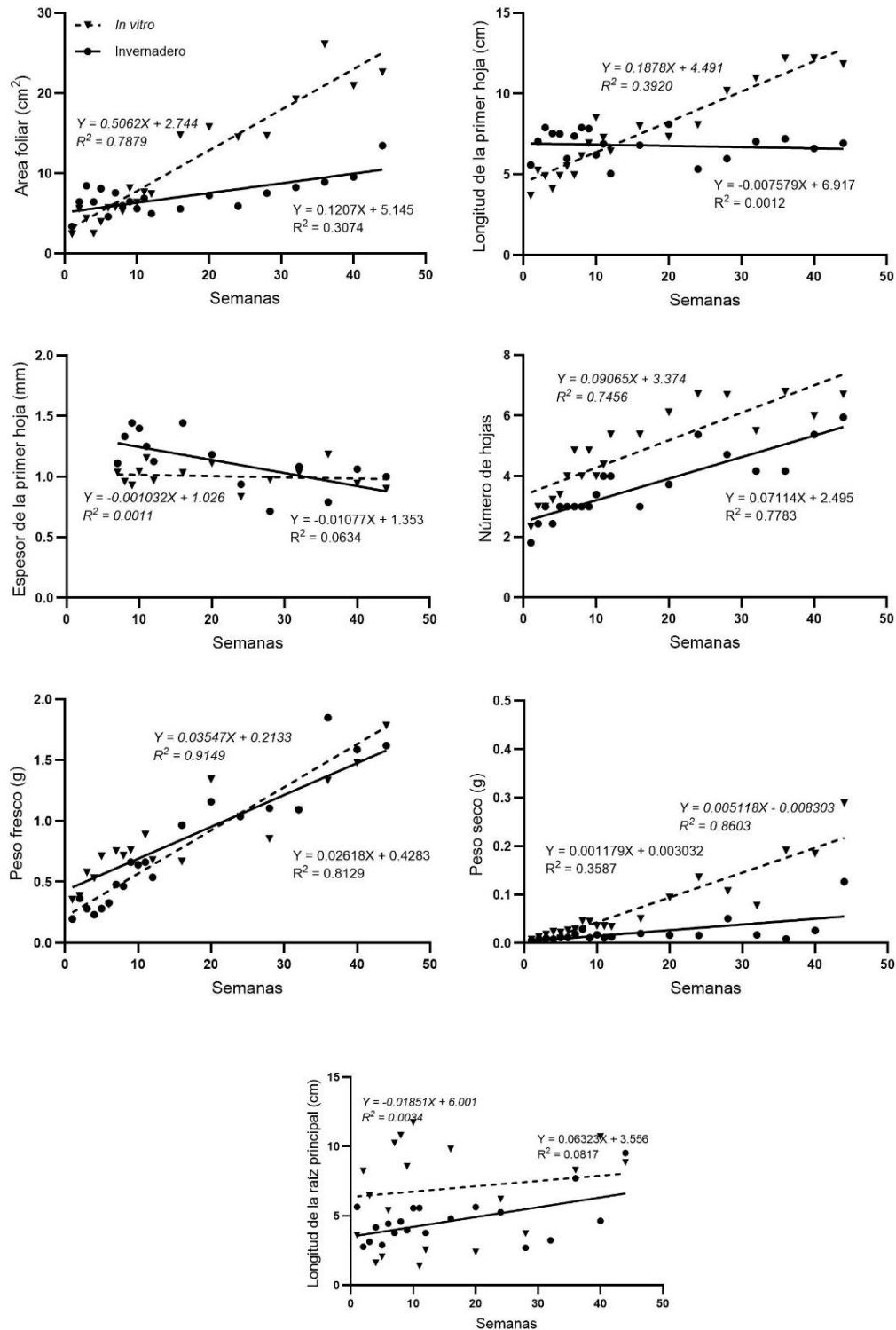
Table 1. Comparison of parameters associated with the germination of *A. angustifolia* and *A. karwinskii* *in vitro* vs. greenhouse conditions and the results of Mantel-Cox and Mantel-Haenszel tests.

| Especie | | Condiciones | | | | Test de Mantel-Cox | | | Hazard ratio | |
|---------------------------|-----------------|----------------|-------|-------|-------|--------------------|----------------|--------|--------------|-------------------|
| | | de germinación | G (%) | VG | EG | TMG | X ² | gl | Valor de p | HR |
| <i>Agave angustifolia</i> | <i>In vitro</i> | 81 | 11.40 | 24.69 | 8.31 | 1.839 | 1 | 0.1751 | 0.7812 | 0.5468 a 1.116 |
| | Invernadero | 84 | 13.20 | 30.95 | 6.96 | | | | | |
| <i>Agave karwinskii</i> | <i>In vitro</i> | 70 | 8.29 | 37.14 | 10.29 | 2.771 | 1 | 0.0960 | 0.7409 | 0.5204 a 1.055 |
| | Invernadero | 76 | 9.55 | 28.95 | 8.8 | | | | | |

G: germinación total; VG: velocidad de germinación; EG: energía de germinación en el día pico; TMG: tiempo medio de germinación; gl: grados de libertad; HR: Hazard ratio; CI: intervalo de confianza. El valor de significancia usado en las pruebas fue de 0.05

G: total germination; VG: germination rate; EG: germination energy on the peak day; TMG: mean germination time; gl: degrees of freedom; HR: Hazard ratio; CI: confidence interval. The significance level used in the tests was 0.05.

El número de hojas, área foliar, longitud de la primera hoja, espesor de la primer hoja, peso fresco y peso seco se sometieron a una ANOVA de una vía y luego se utilizó un test de Bonferroni con un valor de significancia de 0.05. En *A. angustifolia* el número de hojas y el peso seco fueron significativamente mayores en las plántulas *in vitro* en comparación a las plántulas cultivadas en invernadero; por otra parte, el peso fresco, número de hojas, área foliar, longitud de la raíz, la longitud y espesor de la primera hoja fueron un poco mayores en las plántulas *in vitro*, pero la diferencia no fue significativa (Figura 2). En el caso de *A. karwinskii* el número de hojas, área foliar, peso seco, y longitud de la raíz más larga fueron significativamente mayores en las plántulas cultivadas *in vitro* que en las plantas cultivadas en condiciones de invernadero; el peso seco, longitud y espesor de la primer hoja fueron mayores en las plántulas en invernadero, pero las diferencias no fueron significativas (Figura 3).

**Figura 2.** Parámetros para comparar desarrollo de plántulas *in vitro* y en invernadero de *A. angustifolia*.**Figure 2.** Parameters for comparing seedling development of *A. angustifolia* *in vitro* and in greenhouse conditions.

La primera medición (semana 0) se realizó 60 días después de la siembra, excepto para el espesor de la primer hoja, que se comenzó a medir en la semana 8. Se realizó una regresión lineal para todos los parámetros y se presentan la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación (en itálicas para datos *in vitro*). Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía y se realizó una prueba de Bonferroni con un nivel de significancia de 0.05 que mostró diferencias significativas solo en el peso seco y el número de hojas.

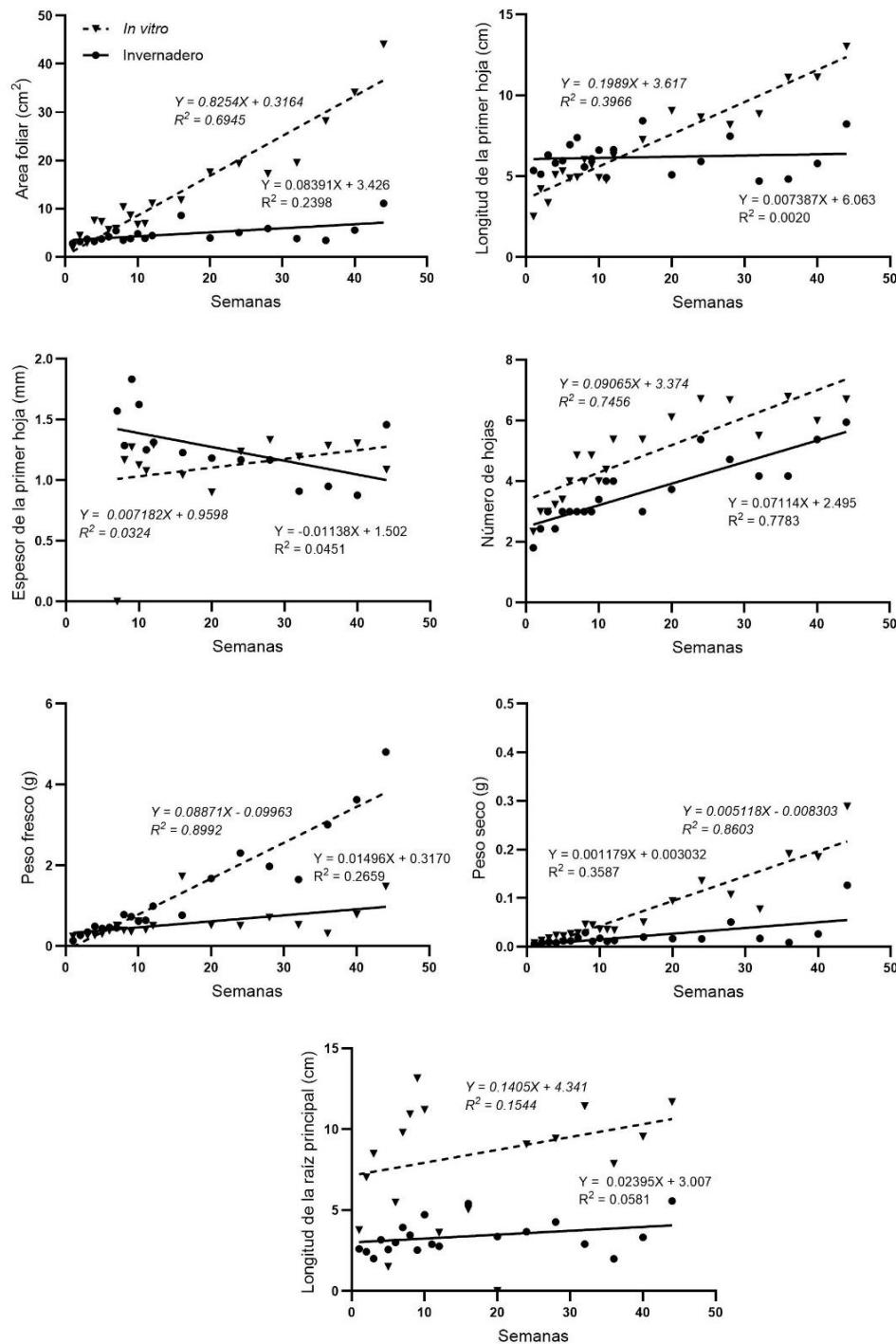


Figura 3. Parámetros para comparar desarrollo de plántulas *in vitro* y en invernadero de *A. karwinskii*.

Figure 3. Parameters for comparing seedling development of *A. karwinskii* *in vitro* and under greenhouse conditions.

La primera medición (semana 0) se realizó 60 días después de la siembra, excepto para el espesor de la primer hoja, que se comenzó a medir en la semana 8. Se realizó una regresión lineal para todos los parámetros y se presentan la ecuación de la recta y el coeficiente de correlación (en itálicas para datos *in vitro*). Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía y se realizó una prueba de Bonferroni con un nivel de significancia de 0.05 que mostró diferencias significativas solo en el peso fresco, número de hojas, área foliar y longitud de la raíz principal. En las hojas de ejemplares cultivados *ex vitro* de *A. angustifolia* y *A. karwinskii* se observó una mayor cantidad de estomas en la superficie adaxial, pero en hojas de plantas de ambas especies germinadas y cultivadas *in vitro* el índice estomático fue mayor para la superficie abaxial que para la adaxial (Tabla 2).

Tabla 2. Índice estomático de las superficies adaxial y abaxial de plantas de *A. angustifolia* y *A. karwinskii* germinadas *in vitro* y en invernadero.

Table 2. Stomatal index of the adaxial and abaxial surfaces of *A. angustifolia* and *A. karwinskii* plants germinated *in vitro* and under greenhouse conditions.

| Especie | Condiciones de germinación | Índice estomático | |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|---------|
| | | Adaxial | Abaxial |
| <i>Agave angustifolia</i> | <i>In vitro</i> | 5.27 | 5.77 |
| | Invernadero | 5.62 | 4.83 |
| <i>Agave karwinskii</i> | <i>In vitro</i> | 4.54 | 6.48 |
| | Invernadero | 5.70 | 3.93 |

En las fotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido se observaron estomas tetracíclicos típicos del género tanto en las preparaciones de *A. angustifolia* (Figura 5g) como de *A. karwinskii* (5h). También se observó una menor deposición de cera epicuticular en la epidermis de plántulas germinadas *in vitro*, más acentuada en *A. karwinskii* (Figura 5c y 5d). Las células estomáticas presentan una anatomía normal, aunque en las muestras de plántulas *in vitro* todos los estomas observados estaban abiertos durante el día; en cambio, en las plantas germinadas en condiciones de invernadero los estomas se presentaron cerrados (Figura 5), acorde a lo esperado en plantas CAM.

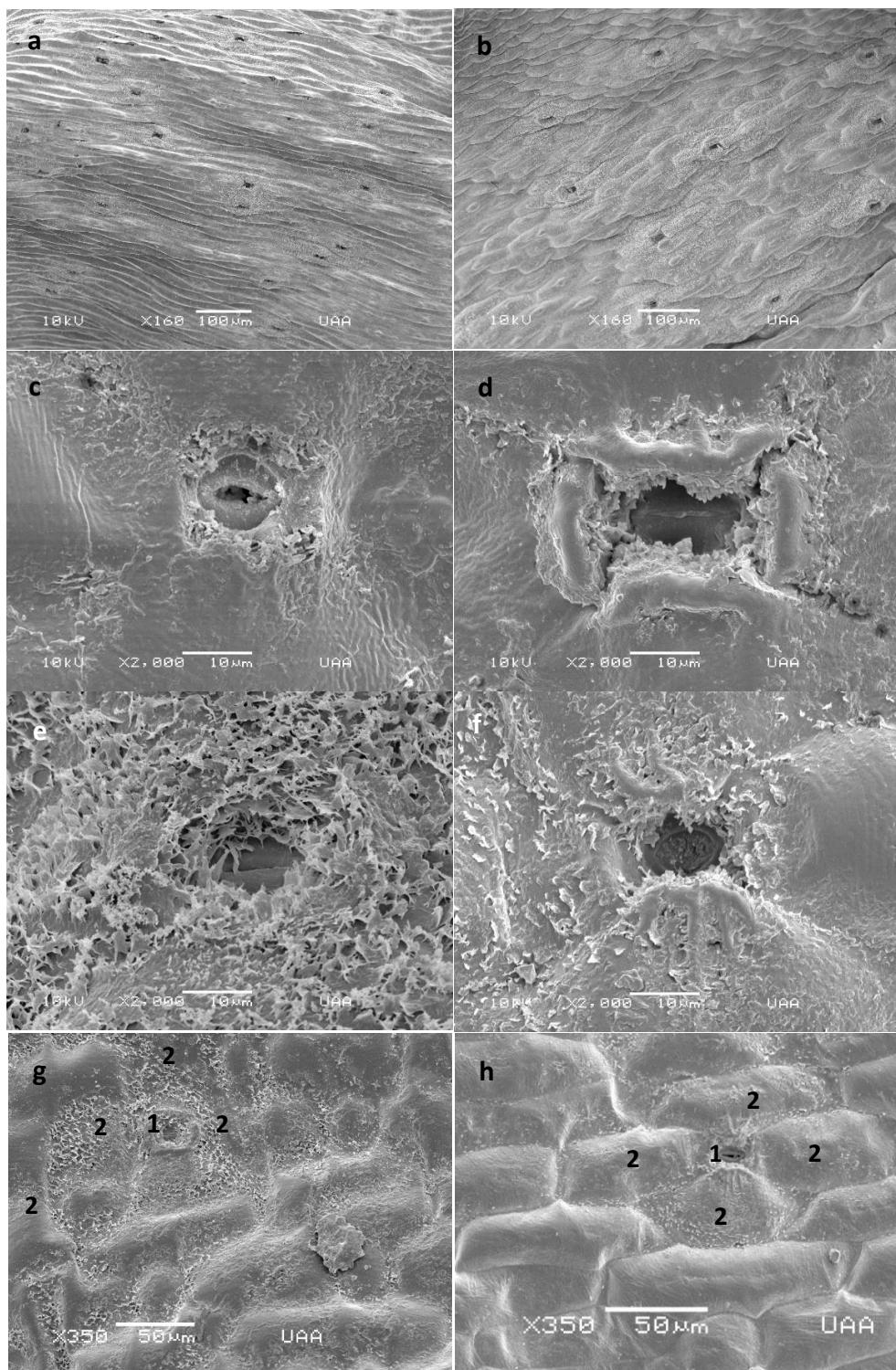


Figura 5. Arreglo y características de los estomas de *A. karwinskii* (izq.) y *A. angustifolia* (der.).

Figure 5. Arrangement and characteristics of the stomata of *A. karwinskii* (left) and *A. angustifolia* (right).

Cortes observados en microscopio electrónico de barrido; en cada fotografía se indica el aumento y escala. Se observa el arreglo y disposición de los estomas (a y b); la escasa capa de cera epicuticular en plántulas germinadas *in vitro* (c y d), en comparación con la mayor deposición de

cera en plántulas germinadas en invernadero (e y f). Arreglo tetracítico del complejo estomático -1- y las células subsidiarias -2- (g y h).

DISCUSIÓN

El cultivo de tejidos vegetales *in vitro* provee de herramientas valiosas para el manejo y aprovechamiento de los agaves, pero es importante identificar en qué momentos y para qué propósitos es conveniente emplear estas técnicas, cuáles son sus alcances y sus limitaciones. Este trabajo planteó la cuestión de si es más conveniente germinar las semillas de agaves *in vitro* o en sustrato en condiciones de invernadero. Los resultados experimentales relacionados con la germinación (germinación total, velocidad de germinación, energía de germinación y tiempo medio de germinación) fueron muy similares en ambas especies. Para realizar el análisis estadístico de la germinación se utilizó un modelo tiempo-a-evento representado mediante curvas de germinación Kaplan-Meier, y se emplearon dos métodos no-paramétricos, Mantel-Cox y Mantel Haenszel, debido a que son modelos univariados que consideran un solo factor (Romano & Stevanato, 2020), en este caso, las condiciones de germinación de las semillas. La prueba de Mantel-Cox arrojó valores para p de 0.1751 en *A. angustifolia* y 0.0960 en *A. karwinskii*, en ambos casos mayores al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), es decir, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre la germinación de las semillas que se colocaron en sustrato en condiciones de invernadero y las que fueron establecidas *in vitro*. La prueba de Mantel-Haenszel también lo confirma, pues tanto en *A. angustifolia* como en *A. karwinskii* las tasas de riesgo (*hazard ratio*) tuvieron valores dentro del intervalo de confianza de 95%. Villegas-Monter & Castro Garibay (2024) tampoco encontraron diferencias en la germinación *in vitro* y en sustrato para *A. salmiana* y *A. angustifolia*, y concluyeron que no se justifica la germinación de semillas de agaves *in vitro* debido a que es más costoso y se obtiene un resultado equiparable a la germinación en sustrato. En el presente estudio se confirma que no tiene objeto germinar *in vitro* semillas de estas especies de agaves si el destino de estas plántulas es la aclimatación al medio externo.

Por otro lado, si el propósito es emplear plántulas para el establecimiento inicial de un cultivo *in vitro*, sí es conveniente germinar semillas en estas condiciones, pues la mayoría de las plantas obtenidas a partir de semillas botánicas están libres de contaminación microbiana (Cassells, 2012) y por lo tanto resultan un explante muy conveniente para establecer un cultivo axénico *in vitro*. Ahora bien, cuando el propósito de la micropagación es generar plantas para su cultivo y explotación comercial, la estrategia usualmente consiste en elegir ejemplares con características sobresalientes, y así obtener un gran número de clones de uno o unos pocos individuos élite. Sin embargo, también se ha propuesto el uso de la micropagación como una herramienta valiosa en la conservación de especies amenazadas o vulnerables, pues las plantas generadas a través de esta tecnología pueden mantenerse en bancos de germoplasma *in vitro* o transferirse a jardines botánicos para su conservación *ex situ* a mediano y largo plazo; y también pueden emplearse para reforestación y reintroducción de especies a sus hábitats naturales (Kulak *et al.*, 2022; Loyola-Vargas & Ochoa-Alejo, 2012). Cruz-Cruz *et al.* (2013) señalan que la germinación *in vitro* se ha venido utilizado para un número creciente de especies amenazadas. Para estos propósitos sería fundamental iniciar con el mayor número posible de genotipos para preservar la diversidad genética tanto como sea posible, y en este contexto, el uso de semilla es no solo adecuado sino deseable.

Mediante la prueba de Bonferroni se evaluaron los parámetros asociados a desarrollo de las plántulas durante 44 semanas, y se encontraron diferencias significativas en el peso fresco, número de hojas, área foliar y longitud de la raíz principal entre las plántulas de *A. karwinskii* cultivadas *in vitro* y aquellas cultivadas en invernadero; el peso seco, el espesor y la longitud de la primer hoja también fueron mayores en las plantas cultivadas *in vitro*, pero la diferencia no fue significativa. En *A. angustifolia* todos los parámetros evaluados fueron mayores transcurridas las 44 semanas, pero solo se observaron diferencias estadísticamente significativas en el peso seco y el número de hojas. En general, las plantas del género *Agave* crecen lentamente, consecuencia directa de sus adaptaciones fisiológicas para sobrevivir en condiciones desfavorables,

particularmente estrés hídrico. En cambio, el cultivo *in vitro* provee de condiciones muy favorables para el crecimiento y desarrollo de las plantas, en especial un aporte suficiente de agua y una humedad relativa del 100 % dentro de los recipientes de cultivo; esto explica que en las dos especies estudiadas las plántulas germinadas y cultivadas *in vitro* experimentaron un mayor crecimiento que aquellas germinadas en sustrato en condiciones de invernadero. Sin embargo, es notable que las diferencias en el desarrollo fueron más acusadas en *A. karwinskii*.

Los agaves son notables por exhibir una gran plasticidad fenotípica en respuesta a diversas condiciones ambientales, así que es de esperarse que presenten importantes diferencias en el ambiente *in vitro*, profundamente distinto a su hábitat natural. El índice estomático (IE) fue similar en las plántulas germinadas en condiciones *in vitro* y *ex vitro*; en ambas especies el IE de la superficie abaxial fue ligeramente mayor en las plántulas *in vitro*, mientras que el IE de la superficie adaxial fue un poco mayor en las plántulas *ex vitro*. En todos los casos el IE presentó un rango entre 3.93 – 6.48, similar a lo reportado en *A. tequilana*, de 5.72 - 6.68 (Hernández-Valencia *et al.*, 2003), aunque menor que en otras especies de agaves, como *A. salmiana*, de 10.61 - 14.15 (Pérez España *et al.*, 2022), y mucho menor que lo reportado para otras monocotiledóneas, como *Dasyliuron cedrosanum* Trel. con un rango de 17.1 - 23.3 (Francisco-Francisco *et al.*, 2016). Las hojas de plántulas de invernadero tanto *A. angustifolia* como en *A. karwinskii* presentaron más estomas en la superficie adaxial que en la abaxial, lo cual ha sido previamente reportado para el género *Agave* (Nobel, 1988); pero en las hojas tanto de *A. angustifolia* como de *A. karwinskii* de plantas cultivadas *in vitro* el índice estomático fue mayor para la superficie abaxial que para la adaxial (tabla 2); este fenómeno también se ha observado en vitroplantas de otras especies, como *Wrightia tomentosa* (Joshi *et al.*, 2006).

A. angustifolia y *A. karwinskii*, tanto *in vitro* como en invernadero, presentaron estomas tetracíclicos; sin embargo, las plántulas de invernadero presentaron estomas hundidos, característica adaptativa de agaves y otras plantas para disminuir la pérdida de agua a través de la superficie foliar (Chávez-Güitrón *et al.*, 2019; Gray *et al.*, 2020); además, durante el día todos se presentaron cerrados. En cambio, los estomas de las plántulas cultivadas *in vitro* no se mostraron hundidos, y abiertos en las muestras se tomaron durante el día, lo que sugiere atrofia del mecanismo de cierre de estomas, fenómeno que ya se ha reportado para tejidos vegetales cultivados *in vitro* (Polivanova & Bedarev, 2022). Además, la deposición de cera fue mayor en las plántulas cultivadas *ex vitro* de ambas especies.

En suma, el cultivo *in vitro* ofrece a los tejidos vegetales condiciones óptimas en cuanto a disponibilidad de nutrientes, temperatura, fotoperiodo y, de manera muy relevante para el género *Agave*, disponibilidad de agua y muy alta humedad relativa dentro del recipiente de cultivo. Estas mismas condiciones son responsables de una serie de alteraciones morfológicas frecuentes en todas las especies vegetales cultivadas *in vitro*, pero que resultan particularmente notables en los agaves; además, la ausencia de factores de estrés a los que normalmente se enfrenta este grupo de plantas en su hábitat natural resulta en la ausencia o disminución de características adaptativas en los órganos formados *in vitro*, como la ausencia de succulencia foliar, la disminución en la deposición de grasa epicuticular, la desregulación de los estomas, por mencionar las más importantes. En conjunto, todos estos fenómenos confluyen en un mayor crecimiento de las plántulas *in vitro*, en comparación a las de invernadero; sin embargo, las hojas de agave generadas *in vitro*, como órganos individuales, son incapaces de adaptarse a las condiciones *ex vitro* y terminan muriendo; la supervivencia de la planta depende de que forme hojas nuevas en condiciones *ex vitro* antes de perder las hojas generadas *in vitro* (Cruz García *et al.*, 2017).

No obstante, todas estas alteraciones morfológicas y fisiológicas de las vitroplantas de agave se compensan con creces por la alta cantidad de brotes que se pueden generar en cortos períodos de tiempo mediante distintos protocolos de micropropagación (Arzate-Fernández & Mejía-Franco, 2011; Bautista-Montes *et al.*, 2022; Domínguez-Rosales *et al.*, 2008). Estas alteraciones deben tomarse en cuenta en la etapa de adaptación a suelo, y también es deseable desarrollar metodologías que permitan que las vitroplantas tengan un desarrollo y morfologías más similares a plantas *ex vitro*, por ejemplo, empleando biorreactores de inmersión temporal o condiciones fotomixotróficas, que permitirían obtener vitroplantas capaces de adaptarse con mayor facilidad al medio externo.

CONCLUSIONES

El cultivo de tejidos vegetales *in vitro*, particularmente la micropropagación, son herramientas muy útiles a considerar en los esquemas para el aprovechamiento económico, pero también en estrategias de conservación de especies vegetales, pues permiten la generación de plantas en un periodo muy corto de tiempo; estas tecnologías son particularmente valiosas en el caso de especies que tienen ciclos reproductivos muy largos y tasas de reproducción muy bajas, como los agaves. Para implementar exitosamente estas técnicas es importante considerar las características particulares de las vitroplantas, así como el uso a que se destinarán. En este estudio se encontró que las plántulas de *A. angustifolia* y *A. karwinskii* germinadas *in vitro* presentan mayor crecimiento que las germinadas en condiciones invernadero; pero muestran alteraciones que resultan desfavorables en condiciones *ex vitro*, como ausencia de succulencia foliar, escasa deposición de cera epicuticular, y estomas atrofiados. Es importante considerar estas características durante la etapa de aclimatación y adaptación a suelo de las vitroplantas para incrementar las probabilidades de supervivencia de ejemplares generados mediante protocolos de propagación *in vitro*.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Autónoma de Aguascalientes por el financiamiento a través del proyecto PIBT-18-2; a la Biól. Araceli Adabache Ortiz por las fotografías en el microscopio electrónico de barrido y el procesamiento previo de las muestras, y al Dr. Alberto Isaac Reyes Silva por su valioso apoyo en los experimentos en invernadero.

LITERATURA CITADA

- Aliniaiefard, S., Asayesh, Z. M., Driver, J., & Vahdati, K. (2020). Stomatal features and desiccation responses of Persian walnut leaf as caused by *in vitro* stimuli aimed at stomatal closure. *Trees*, 34(5), 1219–1232. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-01992-x>
- Arzate-Fernández, A., & Mejía-Franco, R. (2011). Capacidad embriogénica de callos inducidos en ejes embrionarios cigóticos de *Agave angustifolia* Hawth. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 34, 101–106.
- Bautista-Montes, E., Hernández-Soriano, L., & Simpson, J. (2022). Advances in the Micropropagation and Genetic Transformation of *Agave* Species. *Plants*, 11(13), 1757. <https://doi.org/10.3390/plants11131757>
- Cassells, A. C. (2012). Pathogen and biological contamination management in plant tissue culture: phytopathogens, *vitro* pathogens and *vitro* pests. In V. M. Loyola-Vargas & N. Ochoa-Alejo (Eds.), *Plant Cell Culture protocols* (3a ed., pp. 57–80). Springer.
- Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal (COMERCAN). (2024). *Informe Estadístico 2024*. Https://Comercam-Dom.Org.Mx/Wp-Content/Uploads/2024/04/PUBLICO_INFORME_2024.Pdf.
- Cruz García, H., Campos Ángeles, G. V., Enríquez del Valle, J. R., Velasco Velasco, V. A., & Rodríguez Ortiz, G. (2017). Senescencia foliar en plantas micropropagadas de *Agave americana* durante su aclimatación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 381–391. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.58>
- Cruz-Cruz, C., González-Arnao, M., & Engelmann, F. (2013). Biotechnology and Conservation of Plant Biodiversity. *Resources*, 2(2), 73–95. <https://doi.org/10.3390/resources2020073>
- Delgado-Lemus, A., Casas, A., & Téllez, O. (2014). Distribution, abundance and traditional management of *Agave potatorum* in the Tehuacán Valley, Mexico: bases for sustainable use of non-timber forest products. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 10(1), 63. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-10-63>

Recibido:
2/julio/2024

Aceptado:
21/noviembre/2024

- Domínguez-Rosales, M. S., Alpuche-Solís, A. G., Vasco-Mendez, N. L., & Pérez-Molphe-Balch, E. (2008). Efecto de citocininas en la propagación in vitro de agaves mexicanos. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(4), 317–322.
- Francisco-Francisco, N., García-Osuna, H. T., Benavides-Mendoza, A., Hernández-Juárez, A., & Ramírez-Godina, F. (2016). Morfología y anatomía foliar de *Dasyliorion cedrosanum* en diferentes etapas de Desarrollo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(7), 1679–1687.
- Fredrick, C., Muthuri, C., Ngamau, K., & Sinclair, F. (2015). Provenance variation in seed morphological characteristics, germination and early seedling growth of *Faidherbia albida*. *Journal of Horticulture and Forestry*, 7(5), 127–140.
- García-Mendoza, A. J. (2007). Los agaves de México. *Ciencias*, 87, 14–23.
- Hernández-Valencia, R., López-Franco, R., & Benavides-Mendoza, A. (2003). Micromorphology of the foliar epidermis of *Agave tequilana* Weber. *Agrofaz*, 3, 387–396.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2019). *Conociendo la Industria del tequila y el mezcal*. Https://Www.Inegi.Org.Mx/Contenido/Productos/Prod_serv/Contenidos/Espanol/Bvinegi/Productos/Nueva_estruc/702825189600.Pdf.
- Joshi, P., Joshi, N., & Purohit, S. (2006). Stomata characteristics during micropropagation of *Wrightia tomentosa*. *Biologia Plantarum*, 50, 275–278.
- Kulak, V., Longboat, S., Brunet, N. D., Shukla, M., & Saxena, P. (2022). In Vitro Technology in Plant Conservation: Relevance to Biocultural Diversity. *Plants*, 11(4), 503. <https://doi.org/10.3390/plants11040503>
- Loyola-Vargas, V. M., & Ochoa-Alejo, N. (2012). An introduction to plant cell culture: the future ahead. In V. M. Loyola-Vargas & N. Ochoa-Alejo (Eds.), *Plant Cell Culture protocols* (3a ed., pp. 57–80).
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15, 473–497.
- Nobel, P. S. (1988). *Environmental Biology of Agaves and Cacti*. Cambridge University Press.
- Pérez España, V. H., Cuervo Parra, J. A., Aparicio Burgos, J. E., Morales Ovando, M. A., & Romero Cortes, T. (2022). Importancia de la capa cuticular durante la colonización del hongo causante de la negrilla en *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck ssp. *salmiana*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(70). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i70.1265>
- Polivanova, O. B., & Bedarev, V. A. (2022). Hyperhydricity in Plant Tissue Culture. *Plants*, 11(23), 3313. <https://doi.org/10.3390/plants11233313>
- Ramírez-Tobías, H. M., Peña-Valdivia, C. B., Trejo, C., Aguirre-R., J. R., & Vaquera-H., H. (2014). Seed germination of *Agave* species as influenced by substrate water potential. *Biological Research*, 47(11).
- Romano, A., & Stevanato, P. (2020). Germination Data Analysis by Time-to-Event Approaches. *Plants*, 9(5), 617. <https://doi.org/10.3390/plants9050617>
- Vázquez-Pérez, N., Blancas, J., Torres-García, I., García-Mendoza, A., Casas, A., Moreno-Calles, A. I., Maldonado-Almanza, B., & 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>
- Villegas-Monter, Á., & Castro Garibay, S. L. (2024). Disinfestation of *Agave angustifolia* Haw. collected in the field prior to *in vitro* culture. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i12.2299>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

**EVALUACIÓN *in vitro* DE
NANOPARTÍCULAS DE SÍNTESIS VERDE
Y OTROS MÉTODOS BIORRACIONALES
PARA EL CONTROL DE *Pectobacterium*
carotovorum EN *Agave cupreata***

***In vitro* EVALUATION OF GREEN
SYNTHESIS NANOPARTICLES AND
OTHER BIORATIONAL METHODS FOR
THE CONTROL OF *Pectobacterium*
carotovorum IN *Agave cupreata***

García Núñez, H.G., J.M. Soria Díaz, A.M. Arzate Fernández, T.H. Norman Mondragón y E. De la Cruz Torres

EVALUACIÓN *in vitro* DE NANOPARTÍCULAS DE SÍNTESIS VERDE Y OTROS MÉTODOS BIORRACIONALES PARA EL CONTROL DE *Pectobacterium carotovorum* EN *Agave cupreata*

In vitro EVALUATION OF GREEN SYNTHESIS NANOPARTICLES AND OTHER BIORATIONAL METHODS FOR THE CONTROL OF *Pectobacterium carotovorum* IN *Agave cupreata*



Evaluación *in vitro* de nanopartículas de síntesis verde y otros métodos biorracionales para el control de *Pectobacterium carotovorum* en *Agave cupreata*

In vitro evaluation of green synthesis nanoparticles and other biorational methods for the control of *Pectobacterium carotovorum* in *Agave cupreata*

Hilda Guadalupe García
Núñez, José Manuel Soria
Díaz, Amaury Martín Arzate
Fernández, Tomás Héctor
Norman Mondragón, Eulogio
De la Cruz Torres

**EVALUACIÓN *in vitro* DE
NANOPARTÍCULAS DE
SÍNTESIS VERDE Y OTROS
MÉTODOS
BIORRACIONALES PARA
EL CONTROL DE
Pectobacterium carotovorum
EN *Agave cupreata***

***In vitro* EVALUATION OF
GREEN SYNTHESIS
NANOPARTICLES AND
OTHER BIORATIONAL
METHODS FOR THE
CONTROL OF *Pectobacterium*
carotovorum IN *Agave cupreata***

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 213-224. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.13

**García-Núñez H.G.
Soria-Díaz, J.M.**

Arzate-Fernández, A.M. Autor de correspondencia: amaury1963@yahoo.com.mx
<https://orcid.org/0000-0001-8603-0099>

Norman-Mondragón T.H.

Laboratorio de Biología Molecular Vegetal Centro de Investigación de Estudios Avanzados en Fitomejoramiento, Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad Autónoma del Estado de México. Carretera Toluca-Ixtlahuaca Kilómetro 15.5, El Cerrillo El Piedras Blancas, 50200 Toluca, Méx.

De la Cruz -Torres E. <https://orcid.org/0000-0002-6870-1765>
Radiobiología y Genética, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Carretera Toluca - México s/n, 52750 La Marquesa, Méx.

RESUMEN: El género *Agave* tiene importancia cultural, social y económica debido a sus usos, destacando la producción de bebidas alcohólicas como el mezcal. Una de las principales especies utilizadas para este fin es *Agave cupreata*. Dentro de los problemas fitosanitarios que limitan su cultivo, se encuentra la pudrición blanda del cogollo causado por la bacteria *Pectobacterium carotovorum*, que ocasiona pérdidas de más de 157 mil litros de mezcal por año. El uso indiscriminado de agroquímicos para su control conduce a la degradación de ecosistemas y a la resistencia genética de patógenos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto bactericida *in vitro* de métodos biorracionales tales como el uso de dos tipos de nanopartículas de plata (AsA-AgNPs y AsB-AgNPs) sintetizadas con extractos de *A. salmiana* así como el uso de *Bacillus subtilis*, *Trichoderma lignorum*, comparándolos con un producto comercial (Agry-gent® Plus 800) para el control de *P. carotovorum*. Se evaluó el efecto bactericida *in vitro* de tres concentraciones de estos tratamientos en cultivos duales para el de control de *P. carotovorum*, con tres repeticiones. El análisis estadístico, reveló que las nanopartículas de síntesis verde AsA-AgNPs a una concentración de 0.06 mg/mL fue el tratamiento más eficiente en el control de la bacteria fitopatógena.

Palabras clave: *Pectobacterium carotovorum*, pudrición blanda, métodos biorracionales, AsA-AgNPs, AsB-AgNPs, *Agave cupreata*.

ABSTRACT: The *Agave* genus has cultural, social and economic importance due to its uses, highlighting the production of alcoholic beverages such as mezcal. One of the main species used for this purpose is *Agave cupreata*. Among the phytosanitary problems that limit its cultivation is soft rot of the bud caused by the bacteria *Pectobacterium carotovorum*, which causes losses more than 157 thousand liters of mezcal per year. The indiscriminate use of agrochemicals for its control leads to the degradation of ecosystems and the genetic resistance of pathogens. The objective of this work was to evaluate the *in vitro* bactericidal effect of biorational methods such as the use of two types of silver nanoparticles (AsA-AgNPs and AsB-AgNPs) synthesized with extracts of *A. salmiana* as well as the use of *Bacillus subtilis*, *Trichoderma lignorum*, comparing them with a commercial product (Agry-gent® Plus 800) for the control of *P. carotovorum*. The *in vitro* bactericidal effect of three concentrations of these treatments was evaluated in dual

cultures for the control of *P. carotovorum*, with three repetitions. The statistical analysis revealed that the AsA-AgNPs green synthesis nanoparticles at a concentration of 0.06 mg/mL was the most efficient treatment in controlling of the phytopathogenic bacteria.

Key words: *Pectobacterium carotovorum*, soft rot, biorational methods, AsA-AgNPs, AsB-AgNPs, *Agave cupreata*.

INTRODUCCIÓN

En el Continente Americano se reportan 211 especies de *Agave*, el 75% (159) prosperan en México (García-Mendoza *et al.*, 2019). Según Olvera-Vargas *et al.* (2022), el agave, también conocido como maguey, posee un valor ambiental, agroecológico, económico y sociocultural evidenciado por la utilización de hasta 48 especies para la producción de bebidas fermentadas y destiladas (tequila, mezcal y pulque). Para la producción del mezcal sobresalen 14 especies de las cuales destacan *Agave angustifolia*, *A. cupreata*, *A. potatorum*, *A. karwinskii* y *A. marmorata* (Jesús, 2018). El *A. cupreata* es una planta que alcanza la madurez sexual entre 7 y 15 años y no se reproduce vegetativamente. Además, sus poblaciones están siendo diezmadas debido a que los individuos maduros se cosechan justo antes de su floración, para producir el mezcal en destilerías artesanales, lo cual evita la reproducción de la especie y la pone en peligro de extinción (Avendaño-Arzate *et al.*, 2015). Aunado a esto, también se han incrementado sus problemas fitosanitarios causados por hongos, bacterias, nematodos e insectos. Una de las bacterias que más impacto tiene es *Pectobacterium carotovorum* que causa la pudrición blanda del cogollo en agave y su capacidad de permanecer latente en tejido infectado dificulta su manejo (SAGARPA, 2017). Aquino-Bolaños *et al.* (2020) estimaron que de 203 millones de plantas de *Agave tequilana* cultivadas, el 22.3% se encontraban dañadas en diferentes grados de afectación por esta bacteria. El principal control de *P. carotovorum* es la aplicación de productos químicos entre ellos fungicidas y bactericidas como son Cupravit (oxicloruro de cobre), Hidrocob77 (hidróxido de cobre), Mancoseb (Dietilditiocarbamato), Carbendazin (Bencimidazol), Agrigeen 800 (Sulfato de gentamicina + Clorhidrato de oxitetraciclina) que controlan e inhiben el crecimiento de esta bacteria con gran eficiencia. Sin embargo, el uso indiscriminado de productos químicos para el manejo y control de patógenos ha provocado problemas, tales como resistencia genética, alteraciones de los ecosistemas, aparición de nuevas plagas, movilidad en el ambiente y finalmente riesgo para la salud humana (Rashid *et al.*, 2013).

Por ello, es importante emplear estrategias que no dañen la salud humana y que sean más amigables con el ambiente y eficientes para el control de patógenos de importancia agrícola mundial. Entre este tipo de estrategias se encuentran los métodos bioracionales, tales como la utilización de nanopartículas de plata (AgNPs), las cuales tienen aplicaciones antimicrobianas y pueden ser sintetizadas empleando métodos de síntesis verde que utilizan agentes reductores biológicos como extractos de plantas. Martínez *et al.* (2024), mostraron la eficiencia de la inhibición de *Bacillus licheniformis*, mediante el uso nanopartículas de plata (AgNPs) de síntesis verde utilizando extractos de *Agave salmiana*.

Otro método bioracional para el control de *P. carotovorum* es la aplicación de microorganismos benéficos con capacidad antagónica, tales como la bacteria *Bacillus subtilis* y el hongo *Trichoderma lignorum* que se les conoce como agentes de biocontrol debido a que poseen un crecimiento y desarrollo acelerado, pueden tolerar condiciones ambientales extremas y son capaces de parasitar, controlar y destruir hongos, bacterias, nematodos y otros fitopatógenos utilizando diferentes estrategias como resultado de su metabolismo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto bactericida *in vitro* de dos tipos de nanopartículas de plata (AsA-AgNPs y AsB-AgNPs) sintetizadas con extractos de *A. salmiana*, así como el uso de *Bacillus subtilis*, *Trichoderma lignorum*, comparándolos con un producto comercial (Agrygent® Plus 800) para el control de *P. carotovorum*.

MATERIALES Y MÉTODOS

- El material biológico, utilizado como tratamientos biorracionales en este estudio fue:
- Inóculo *in vitro* de *Pectobacterium carotovorum* aislado en medio Papa Dextrosa Agar (PDA). A partir de esta muestra se preparó una solución bacteriana a una concentración a 3×10^8 UFC.
 - Las nanopartículas de plata (AsA-AgNPs y AsB-AgNPs) sintetizadas con extractos de *Agave salmiana*. Para la biosíntesis de los dos tipos de nanopartículas se utilizó 1×10^{-3} mol/L de nitrato de plata y extractos acuosos de *Agave salmiana* a una concentración de $10 \mu\text{g}/\text{mL}$ como agente reductor, de acuerdo a la metodología propuesta por (González-Pedroza *et al.*, 2021). El extracto acuoso se obtuvo a diferentes temperaturas tal como se muestra en la tabla 1, se filtró con tubos de 30 k Amicon Ultra-15 Centrifugal filter devices, a 300 rpm durante 10 min. Luego, se obtuvo el extracto crudo a partir del mismo con el uso de presión reducida. Las diferencias registradas en la síntesis de AsA-AgNPs y AsB-AgNPs fueron la temperatura de obtención y la exposición a la radiación UV (tabla 1). Una vez obtenidos ambos tipos de AgNPs, la muestra fue preparada a partir de una aliquota colocada en una rejilla de cobre, dejando secar a temperatura ambiente para posteriormente ser analizada y finalmente se determinaron sus características morfológicas y el diámetro de partícula (nm). Para esto se realizó un análisis espectroscópico UV-Vis a fin de monitorear la formación de AgNPs utilizando un espectrofotómetro UV-Vis (espectrofotómetro VE-5100UV, VELAB EE. UU.), en un rango de 200 a 800 nm, en modo de absorción, según lo reportado por (Martínez *et al.*, 2024). Posteriormente con ayuda de un microscopio electrónico de transmisión (TEM) (número de serie JEOL-JEM-2010 TEM) y el software imageJ, se caracterizaron las propiedades estructurales de los sistemas nanoparticulados tomando en cuenta la distribución, morfología y tamaño de partículas.

Tabla 1. Condiciones físicas de síntesis de AgNPs
Table 1. Physical conditions for synthesis of AgNPs

| Muestras | Temperatura | Tiempo de exposición a radiación UV | Porcentaje de plata y extracto de <i>A. salmiana</i> (V: V) |
|-----------|-------------|-------------------------------------|---|
| AsA-AgNPs | 93°C | 5 min | 3:5 |
| AsB-AgNPs | 25°C | 1 min | 3:5 |

- Inóculo *in vitro* de *Trichoderma lignorum* en PDA, donado por el Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México (ICAMEX).
 - Bacillus subtilis*, aislada del biofungicida comercial Baktillis® (Biokrone), con 1×10^{12} UFC/mL. Posteriormente se aisló en medio de cultivo PDA, se incubaron a 28°C durante un período de 48 horas.
 - Agry-gent® Plus 800, como producto bactericida comercial, con sulfato de gentamicina + clorhidrato de oxitetraciclina como ingredientes activos.
- Para cada uno de los métodos biorracionales y el bactericida comercial se determinaron tres concentraciones experimentales para las pruebas *in vitro* para el control de *P. carotovorum* utilizando agua destilada estéril como diluyente, tal como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Concentraciones de los tratamientos biorracionales y químico para las pruebas *in vitro*.
Table 2. Concentrations of the biorational and chemical treatments for *in vitro* tests.

| Tratamiento | Concentración |
|--|---|
| T ₁ = AsA-AgNPs | [C ₁ : 0.04, C ₂ : 0.06, C ₃ : 0.08 mg/mL] |
| T ₂ = AsB-AgNPs | [C ₁ : 0.04, C ₂ : 0.06, C ₃ : 0.08 mg/mL] |
| T ₃ = <i>Trichoderma lignorum</i> | [C ₁ : 3×10^6 , C ₂ : 6×10^6 , C ₃ : 9×10^6 Conidios] |
| T ₄ = <i>Bacillus subtilis</i> | [C ₁ : 2×10^7 , C ₂ : 4×10^7 , C ₃ : 6×10^7 UFC] |
| T ₅ = Sulfato de gentamicina + Clorhidrato de oxitetraciclina (Agry-gent® Plus 800) | [C ₁ : 6, C ₂ : 7, C ₃ : 8 mg/L] |
| T ₆ = Control negativo | Agua destilada estéril |

Evaluación de la patogenicidad de *P. carotovorum*

Para determinar la patogenicidad de *P. carotovorum* se usaron plantas de *A. cupreata*; y como control positivo plantas de *Aloe vera* y de *Haworthia arachnoidea* como control negativo. Se disectaron tres hojas de cada planta y se lavaron con jabón y agua abundante, después se sumergieron en hipoclorito de sodio al 2% durante 2 min y luego en alcohol al 70% durante 2 min y en seguida se lavaron tres veces con agua destilada estéril. Posteriormente, se hizo una incisión de 1.0 cm en cada hoja y con un asa bacteriológica se inoculó 0.05ml de *P. carotovorum* a una concentración de 1×10^6 UFC, en dos de las tres hojas de cada especie, dejando la restante como control a la cual se le colocó 0.5mL de agua destilada estéril; las muestras inoculadas se incubaron en cámaras húmedas a temperatura ambiente durante un periodo de 96 h, durante este periodo se registró la sintomatología observada. Cabe mencionar que de esta prueba se hicieron tres repeticiones. Posteriormente se hicieron preparaciones microscópicas y tinción Gram de *P. carotovorum*, las cuales se observaron en un microscopio óptico BOECO a 100X.

Evaluación *in vitro* del control de los tratamientos hacia *P. carotovorum*

Se evaluó el efecto bactericida *in vitro* de los tratamientos (Tabla 2) sobre *P. carotovorum*. Se sembró *P. carotovorum* en extensión en cajas Petri con medio PDA y enseguida, en forma de cuadrante sobre la superficie del medio de cultivo, se colocaron cuatro discos de 6 mm de papel filtro estéril (Whatman No. 2), tres discos previamente impregnados con cada una de las concentraciones a evaluar (durante 5 minutos) y un disco impregnado con agua destilada estéril como control. Se hicieron tres repeticiones por tratamiento, las muestras se incubaron a 28°C por 96 h, con un vernier digital, marca Steren se midió el diámetro del halo de inhibición (mm) resultante del efecto bactericida de cada tratamiento.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo trifactorial donde: el factor A fueron los tratamientos, el factor B las concentraciones y el factor C los días de medición del halo, esto con la finalidad de evaluar el efecto bactericida sobre *P. carotovorum* de los cinco tratamientos (con sus respectivas concentraciones), sus tres repeticiones y un control ($p \leq 0.05$). Los datos obtenidos fueron sometidos a un Análisis de Varianza usando Statgraphics versión 5.0; y la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) para la comparación múltiple de medias.

RESULTADOS

Biosíntesis de las nanopartículas de plata con extracto de *Agave salmiana*

Las micrografías TEM de las AgNPs (Figura1) se obtuvieron a una concentración 3:5 de *Agave salmiana*. Para los dos tipos de nanopartículas AsA-AgNPs y AsB-AgNPs, se observaron formas quasi esféricas con un tamaño que osciló entre ~1.3 y 65.2 nm ($X = 14.51$ nm, $\sigma = 15$ nm), y una media de 14.51, mientras que el tamaño de AsB-AgNPs osciló entre ~1.04 y 95.45 nm ($X = 20.80$ nm, $\sigma = 21$ nm).

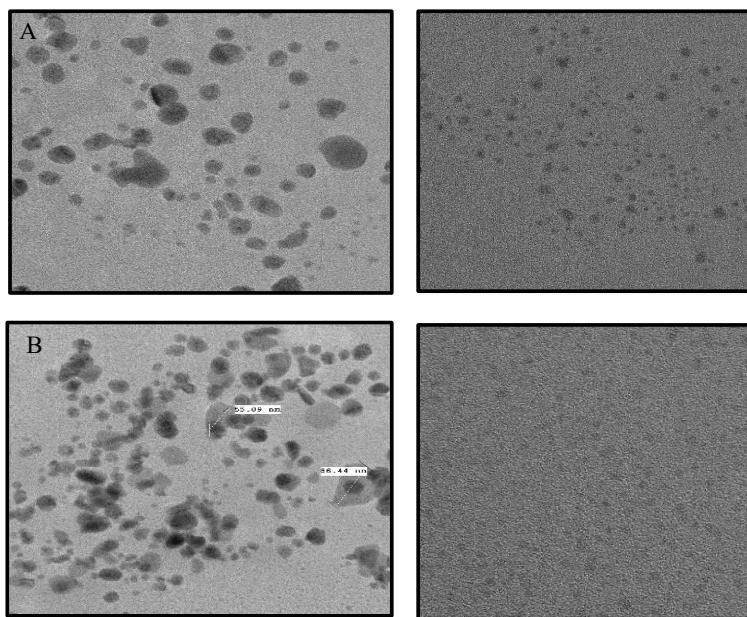


Figura 1. A) Microfotografías de la forma y tamaño (nm) de las nanopartículas sintetizadas a partir de extractos de *A. salmiana*, A) tipo A (AsA-AgNPs) y B) tipo B (AsB-AgNPs) de forma cuasi esfericas, obtenidas mediante TEM a 1000X.

Figure 1 A) Microphotographs of the shape and size (nm) of the nanoparticles synthesized from extracts of *A. salmiana*, A) type A (AsA-AgNPs) and B) type B (AsB-AgNPs) of quasi-spherical shape , obtained by TEM at 1000X.

Pruebas de patogenicidad de *P. carotovorum*

Las pruebas de patogenicidad resultaron positivas para *A. cupreata* y *Aloe vera*, observándose la sintomatología característica de pudrición blanda a las 96 h después de la inoculación de las hojas con *P. carotovorum*, respectivamente (Figura 2, 1b y 2b). Las observaciones microscópicas 1c y 2c (100X) confirmaron la presencia de bacilos de forma abastonada con flagelos peritíricos, sus colonias mostraron elevación convexa de color blanco cremoso, además esta bacteria resultó ser Gram negativa, estas características corresponden a *P. carotovorum*. Mientras que para *Haworthia arachnoidea* esta prueba fue negativa a la infección con por *P. carotovorum* ya que no se observó esa apariencia acuosa.

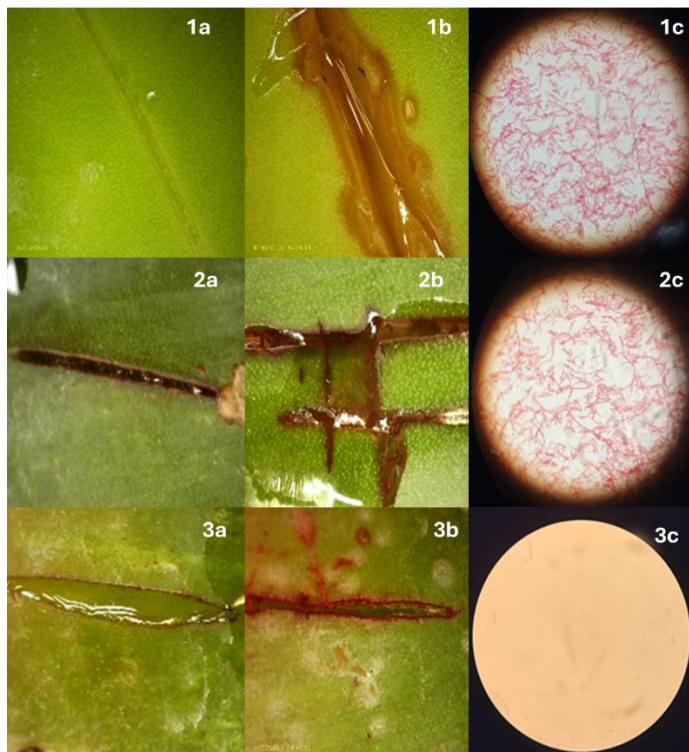


Figura 2. Sintomatología inducida por *P. carotovorum*: 1a, 2a, 3a, hojas de *A. cupreata*, *Aloe vera* y *Haworthia arachnoidea* (controles); 1b, hoja de *A. cupreata* con necrosis bacteriana acuosa color marrón, 2b hoja de *A. vera* con necrosis bacteriana acuosa color marrón y 3b hoja de *H. arachnoidea* sin necrosis acuosa; 1c y 2c bacilos Gram negativos de *P. carotovorum* y 3c sin presencia de bacteria.

Figure 2. Symptoms induced by *P. carotovorum*: 1a, 2a, 3a, leaves of *A. cupreata*, *Aloe vera* and *Haworthia arachnoidea* (controls); 1b, *A. cupreata* leaf with brown aqueous bacterial necrosis, 2b *A. vera* leaf with brown aqueous bacterial necrosis and 3b *H. arachnoidea* leaf without aqueous necrosis; 1c and 2c Gram negative bacilli of *P. carotovorum* and 3c without the presence of bacteria.

Evaluación del efecto antagónico *in vitro* de los tratamientos biorracionales

El análisis estadístico del efecto bactericida por tratamiento biorracial reveló que las nanopartículas tipo AsA-AgNPs presentaron un halo de inhibición de 1.97 mm, resultando más eficientes para el control del crecimiento *in vitro* de *P. carotovorum*, seguido del bactericida comercial Agry-gent® Plus 800 con el que se observó un halo de inhibición de 1.95 mm; mientras que con las nanopartículas tipo AsB-AgNPs mostraron un halo de 1.55 mm lo cual indica una eficiencia menor de control, así mismo *T. lignorum* y *B. subtilis* mostraron un halo de 1.29 mm, lo que indica una baja eficiencia en el control de *P. carotovorum* (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de medias del efecto bactericida de los tratamientos biorracionales.

Table 3. Comparison of means of the bactericidal effect of biorational treatments.

| Tratamiento biorracial | Halo de inhibición promedio (mm)* |
|------------------------|-----------------------------------|
| AsA-AgNPs | 1.97 ^a |
| Agry-gent® Plus 800 | 1.95 ^a |
| AsB-AgNPs | 1.55 ^{ab} |
| <i>T. lignorum</i> | 1.29 ^b |
| <i>B. subtilis</i> | 1.29 ^b |

*De tres repeticiones. Valores con la misma letra no son estadísticamente significativos. Tukey p≤ 0.05

*Three repetitions. Values with the same letter are not statistically significant. Tukey p≤ 0.05

Los resultados de análisis estadístico del efecto bactericida de las concentraciones por tratamiento biorracional mostraron que las AsA-AgNPs, a una concentración de 0.06 mg/mL presentó un halo de inhibición 3.14 mm, siendo la mejor concentración de respuesta bactericida contra *P. carotovorum*. El Agry-gent® Plus 800, a una concentración de 0.008 mg/mL fue la segunda concentración de control hacia la bacteria en estudio. A esta misma concentración las AsB-AgNPs tuvieron el más alto halo de inhibición. Mientras que *T. lignorum* y *B. subtilis* presentaron su mejor halo de inhibición a una concentración de 3×10^6 conidios/mL y 4×10^7 UFC/mL, respectivamente. No hay un patrón de respuesta de los tratamientos biorracionales sobre la concentración utilizada para el control de *P. carotovorum*.

Tabla 4. Comparación de medias del efecto bactericida *in vitro* entre concentraciones de los tratamientos biorracionales aplicados para el control de *Pectobacterium carotovorum*.

Table 4. Comparison of means of the *in vitro* bactericidal effect between concentrations of the biorational treatments applied to control *Pectobacterium carotovorum*.

| Tratamientos | Concentración | Halo de inhibición (mm) |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| AsA-AgNPs | 0.04 mg/mL | 0.88c |
| AsA-AgNPs | 0.06 mg/mL | 3.14 ^{a*} |
| AsA-AgNPs | 0.08 mg/mL | 0.74c |
| AsB-AgNPs | 0.04 mg/mL | 2.06b |
| AsB-AgNPs | 0.06 mg/mL | 1.20b |
| AsB-AgNPs | 0.08 mg/mL | 2.64 ^a |
| Agry-gent® Plus 800 | 0.006 mg/mL | 1.47b |
| Agry-gent® Plus 800 | 0.007 mg/mL | 1.74b |
| Agry-gent® Plus 800 | 0.008 mg/mL | 2.67 ^a |
| <i>T. lignorum</i> | 3×10^6 Conidios/mL | 1.41b |
| <i>T. lignorum</i> | 6×10^6 Conidios/mL | 1.22c |
| <i>T. lignorum</i> | 9×10^6 Conidios/mL | 1.24c |
| <i>B. subtilis</i> | 2×10^7 UFC/mL | 0.98c |
| <i>B. subtilis</i> | 4×10^7 UFC/mL | 1.34b |
| <i>B. subtilis</i> | 6×10^7 UFC/mL | 1.32b |

*De tres repeticiones. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

*Three repetitions. Different letters indicate significant statistical differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

En relación a los resultados de los halos de inhibición sobre el efecto bactericida de los tratamientos biorracionales, se observó un campo claro alrededor de los discos impregnados por las diferentes concentraciones indicado por una flecha de color naranja (Figura 3B, 3C y 3D).

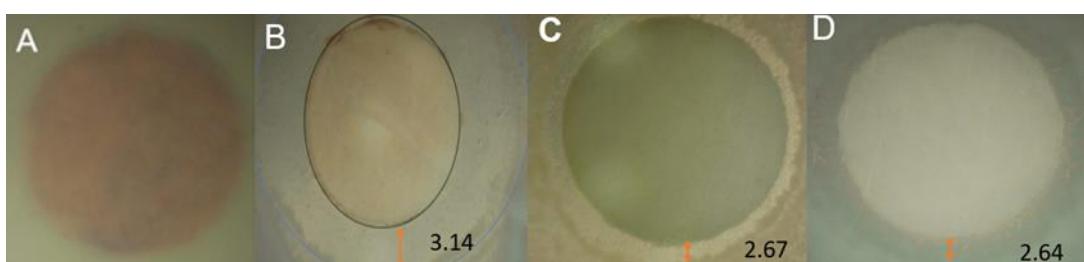


Figura 3. Halos de inhibición *in vitro* (mm) resultantes del efecto bactericida de las concentraciones más eficientes sobre *P. carotovorum*, comparadas con el tratamiento control: A) Control sin halo; B) AsA-AgNPs (0.06 mg/mL) con halo de 3.14 mm; C) Agry-gent® Plus 800 (0.008 mg/mL) con halo de 2.67 mm y D) AsB-AgNPs (0.08 mg/mL) con halo de 2.64.

Figure 3. *In vitro* inhibition zones (mm) resulting from the bactericidal effect of the most efficient concentrations on *P. carotovorum*, compared to the control treatment: A) Control without halo ; B) AsA-AgNPs (0.06 mg/mL) with a halo of 3.14 mm; C) Agry-gent® Plus 800 (0.008 mg/mL) with a halo of 2.67 mm and D) AsB-AgNPs (0.08 mg/mL) with a halo of 2.64.

DISCUSIÓN

En relación a las pruebas de patogenicidad permitieron confirmar que la bacteria *P. carotovorum* afecta a *Agave cupreata* y las características coinciden con lo reportado por Amaya *et al.* (2021). Aunque, no se han reportado estudios *in vitro* para evidenciar la patogenicidad de *P. carotovorum* en esta especie de agave, nuestro estudio también concuerda con lo observado por Jiménez-Hidalgo *et al.* (2004) quienes confirmaron la presencia de lesiones cloróticas en el sitio de inoculación de *P. carotovorum* a los 15 y 20 días después, en plantas de *A. tequilana*.

En el presente estudio, los resultados de microscopía electrónica de transmisión (TEM) (Figura 1) de la biosíntesis de las nanopartículas, revelaron que las AsA-AgNPs presentaron una forma quasi esférica y un menor tamaño, en comparación con las AsB-AgNPs, esto se debe a que las primeras estuvieron a una mayor exposición de UV y a una temperatura más alta, lo cual deriva en un alto potencial bactericida. Esto coincide con Martínez *et al.* (2024) quienes reportaron nanopartículas sintetizadas con extracto de *Agave salmiana* con tamaños entre ~1 y 50 nm ($X = 5,6 \text{ nm}$, $\sigma = 6 \text{ nm}$). Así mismo, (Iravani *et al.*, 2014) mencionan que la forma, el tamaño y la cantidad de nanopartículas tienen un efecto sobre el potencial antimicrobiano de las nanopartículas de plata. También coincide con lo que mencionan Martínez *et al.* (2024) respecto a que el tamaño de las nanopartículas metálicas garantiza una superficie de contacto significativamente más grande con el efluente bacteriano. Cabe destacar que, las AgNPs con tamaños inferiores a 10 nm son más tóxicas para las bacterias. Al penetrar en el citoplasma las AgNPs pueden interactuar con biomoléculas como proteínas, lípidos y ADN. En ciertos casos, pueden interactuar con el sistema enzimático respiratorio, generando especies reactivas de oxígeno (ROS) como peróxido de hidrógeno (H_2O_2), radicales hidroxilos (OH) y superóxido (O_2^-), que inducen estrés oxidativo y daños a proteínas y ácidos nucleicos, que conducen a la muerte del patógeno (Liao *et al.*, 2019; Santos y Barrios, 2022).

Además, Solis *et al.* (2019) afirman que las nanopartículas biogénicas de plata muestran una amplia distribución de tamaños y formas que varían de 2-75 nm diámetro empleando extractos vegetales en la obtención de AgNPs como agentes reductores, con mayor eficiencia en el control de patógenos. Así mismo, Solís *et al.*, (2019) realizaron estudios sobre el efecto de las propiedades antimicrobianas de las AgNPs sintetizadas biológicamente con extracto acuoso de *Annona muricata* las cuales mostraron mayor efectividad en el control de *P. aeruginosa* > *E. coli* > *S. aureus* > *C. albicans* en comparación con las AgNPs de síntesis química. Esto apoya nuestros resultados donde se demuestra que las nanopartículas de síntesis verde con extractos de *Agave salmiana* tipo A (AsA-AgNPs) tienen un efecto bactericida para el control de *P. carotovorum*. Probablemente se deba a la utilización del extracto de *A. salmiana* para recubrir a las nanopartículas ya que esto influye de manera positiva en la estabilidad de las mismas.

Por otra parte, en nuestros estudios quedó demostrado el efecto bactericida de los tratamientos biorracionales usando las nanopartículas tipo AsA-AgNP sobre esta bacteria Gram negativa que afecta al agave, lo cual coinciden con Ahmed *et al.* (2016) ya que ellos mostraron que las AgNPs sintetizadas a base de extractos acuosos de *Agave americana* poseen un potencial antimicrobiano significativo con un 96% de efectividad contra bacterias patógenas Gram negativas. Sin embargo, no coincide con lo reportado por Martínez *et al.* (2024) quienes realizaron estudios utilizando AgNPs sintetizadas con extractos de *A. salmiana* para el control de *Bacillus licheniformis* sin lograr el control de esta bacteria Gram positiva.

Al respecto, se ha estudiado que este tipo de síntesis verde es eficiente para el control de bacterias Gram negativas y Gram positivas, teniendo mejor acción en las Gram negativas. Esto debido a que la pared celular de las Gram negativas tiene un grosor de 2-7 nm y además contiene dos capas situadas en el exterior de la membrana citoplasmática, inmediatamente después se encuentra una delgada capa de peptidoglicanos, seguidamente se encuentra la membrana externa, la cual es exclusiva de las células Gram negativas, la cual está conformada por una bicapa lipídica donde la parte interna está constituida por fosfolípidos y la externa por lipopolisacáridos (LPS). Mientras que en las Gram positivas tienen un grosor de 20-80 nm por lo tanto la pared celular es más gruesa, compuesta de varias capas de peptidoglicanos, conteniendo también una gran cantidad de ácidos teicoicos, polímeros de glicerol y ribitol (Rojas-Avelizapa *et al.*, 2020). Según Anandalakshmi *et al.* (2016), la acción bactericida de las nanopartículas de plata contra las bacterias Gram negativas ocurre cuando éstas poseen un

tamaño entre 1 y 10 nm. De acuerdo a lo anterior cabe destacar que el mecanismo antimicrobiano de las AgNPs consiste en la unión de estas nanopartículas en la superficie de la membrana celular bacteriana, afectando las funciones respiratorias de la célula y provocando la desnaturalización de la membrana, lo que causa la fuga del contenido celular y la eventual muerte de la célula. En relación a esto, (Monge, 2009) expresa que los estudios realizados para analizar la actividad antimicrobiana de las nanopartículas de plata sintetizadas biológicamente frente a microorganismos, han revelado mayor eficiencia en el control de bacterias Gram negativas como *Escherichia coli*, que a diferencia de las bacterias grampositivas como el *Streptomyces aureus*, que posee una gruesa capa de peptidoglicanos y membrana plasmática, lo cual impide que las nanopartículas sintetizadas ingresen con facilidad al interior de la membrana (Villamizar y Monroy, 2015).

Por otra parte, la comparación estadística entre las concentraciones de cada tratamiento biorracional mostró diferencias significativas al encontrar que la dosis de 0.06 mg/ml de AsA-AgNPs, seguida del bactericida comercial Agry-gent® Plus 800 (0.008 mg/ml) y de AsB-AgNPs (0.08 mg/mL) (Tabla 4), fueron los tratamientos más eficientes en el control del crecimiento *in vitro* de *P. carotovorum*, al comparar el diámetro promedio de los halos de inhibición resultantes (3.15, 2.68 y 2.64 mm, respectivamente), en cambio para acción bactericida, las concentraciones de *T. lignorum* (3×10^6 conidios/mL) y *B. subtilis* (4×10^7 UFC/mL), originaron halos de inhibición con menor diámetro promedio (1.41 y 1.34 mm, respectivamente). Esto evidencia que, en relación a la concentración de los tratamientos biorracionales no hay un patrón que indique que entre mayor sea la concentración mayor es el control hacia la bacteria *P. carotovorum*.

En relación al efecto en el control de *P. carotovorum* por a la acción del bactericida comercial Agry-gent® Plus 800 este, resultó más efectivo que los agentes biológicos (*T. lignorum* y *B. subtilis*). Cabe mencionar que es un bactericida sistémico de amplio espectro de acción rápida para el control de la pudrición de cogollo del agave, causada por *Erwinia* sp. ahora clasificada como *Pectobacterium. carotovorum*.

Aunque se ha reportado la eficiencia de las especies de los géneros *Trichoderma* y *Bacillus* como agentes bactericidas, donde mencionan que la cepa de *B. subtilis* 9B14 tuvo una gran eficiencia contra *P. carotovorum*, con un halo de inhibición de 9.16 mm (García-Martínez *et al.* 2022), en nuestro estudio no resultaron con un alto potencial de control.

Por otra parte, en relación a *Trichoderma*, Guerrero *et al.* (2017) mencionan que las cepas de la misma especie de *Trichoderma* spp. muestran diferentes grados de acción sobre el crecimiento de patógenos y también su mecanismo puede variar de un cultivo a otro.

CONCLUSIONES

El efecto bactericida de las nanopartículas de plata AsA-AgNPs, sintetizadas biológicamente con extractos de *Agave salmiana*, empleadas como tratamiento biorracional fue eficiente para el control del crecimiento *in vitro* de *Pectobacterium carotovorum*, lo que podría ser un método prometedor como un tratamiento ecológico y eficiente como posible sustituto del control químico.

En este estudio *Trichoderma lignorum* y *Bacillus subtilis* no fueron tan eficientes para el control *in vitro* de *Pectobacterium carotovorum* agente causal de la marchitez en agave.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al CONACYT por el financiamiento otorgado de la beca de maestría para desarrollar la presente investigación, y al Dr. Raymundo Saúl García Estrada del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. por la donación de la cepa de *P. carotovorum*.

LITERATURA CITADA

- Ahmed, B., Shireen, f., Bashir, S., Kan, I., & azam, s. (2016). Síntesis verde, caracterización y evaluación biológica de AgNPs usando extracto acuoso de hojas de *Agave americana*, *Mentha spicata* y *Mangifera indica*. *IET nanobiotechnology*, 10(5), 281-287. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2015.0053>
- Amaya Guerrero, A. P., Beltrán Pineda, M. E., & Alfonso Vargas, N. C. (2021). *Pectobacterium carotovorum*: agente fitopatógeno causante de la pudrición blanda en la papa (*Solanum tuberosum*). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 22(2). https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1710
- Anandalakshmi, K., Venugopal, J., & Ramasamy, V. (2016). Characterization of silver nanoparticles by green synthesis method using *Pedalium murex* leaf extract and their antibacterial activity. *Applied Nanoscience*, 6, 399–408. <https://doi.org/10.1007/s13204-015-0449-z>
- Aquino-Bolaños, T., Sánchez-García, J. A., Ortiz-Hernández, Y. D., Hernández-Cruz, J., & Cortés-Martínez, C. I. (Junio de 2020). Portador y vector de *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* y su manejo a través de una base de hongos entomopatógenos en *Agave* sp. *Sociedad Entomológica de Florida*, 243-246.
- Avendaño-Arrazate, C., Iracheta-Donjuan, L., Gómez-Aguilar, J., López-Gómez, P., & Barrios-Ayala, A. (2015). Caracterización morfológica de *Agave cupreata*, especie endémica de México. *FYTON*, 84: 148-162. <https://doi.org/10.32604/phyton.2015.84.148>
- Díaz Acosta, E. M. (2018). Nanopartículas de plata: síntesis y funcionalización. Una breve revisión. *Revista interdisciplinaria en nanociencias y nanotecnología*, 12(22) 89-99. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2019.22.60758>
- García Mendoza, A. J., Franco Martínez, S. I., & Sandoval Gutiérrez, D. (2019). Cuatro especies nuevas de *Agave* (Asparagaceae). *Acta Botanica Mexicana*, 126(e1461), 1-18. <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1461>
- García-Martínez, D. C., Vázquez-López, A., Ayala-Escobar, V., Nava-Díaz, C., & Aranda-Ocampo, S. (2022). *Bacillus* y *Pseudomonas* fluorescentes de la rizosfera de agaves silvestres antagonistas contra bacterias pectinolíticas. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 9(1). <https://doi.org/10.19136/era.a9n1.3177>
- González Pedroza, M. G., Argueta Figueroa, L., García Contreras, R., Jiménez Martínez, Y., Martínez Martínez, E., Navarro-Marchal, S. A., . . . Boulaiz, H. (2021). Silver Nanoparticles from *Annona muricata* Peel and Leaf Extracts as a Potential Potent, Biocompatible and Low Cost Antitumor Tool. *Nanomaterials*, 11(5), 1273. <https://doi.org/10.3390/nano11051273>
- González Pedroza, M. G., Argueta Figueroa, L., García Contreras, R., Jiménez Martínez, Y., Martínez Martínez, E., Navarro Marchal, S. A., . . . Boulaiz, H. (2021). Silver Nanoparticles from *Annona muricata* Peel and Leaf Extracts as a Potential Potent, Biocompatible and Low Cost Antitumor Tool. *Nanomaterials*, 11(5), 1273. <https://doi.org/10.3390/nano11051273>
- Guerrero, R., Mónaco, C., Stocco, M., Consolo, V., Rolleri, J., & Guerrero, N. (2017). Aplicación de *Trichoderma harzianum* para el control del cáncer bacteriano (*Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis*) del tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) En invernadero. *Revista Amazónica Ciencia y Tecnología*, 6(3), 230-243. <https://doi.org/10.59410/RACYT-v06n03ep04-0087>
- Iravani, S., Korbekandi, H., Mirmohammadi , S. V., & Zolfaghari, B. (2014). Synthesis of silver nanoparticles: chemical, physical and biological methods. *Research in Pharmaceutical Sciences*, 9(6), 385-406. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26339255/>
- Jesús, H. L. (2018). Los Mezcales Mexicanos: la importancia. 179-205. <http://dx.doi.org/10.5007/2175-8034.2018v20n2p179>
- Jiménez-Hidalgo, I., Virgen-Calleros, G., Martínez-de la Vega, O., & Vandemark, G. (2004). Identification and Characterisation of Bacteria Causing Soft-rot in *Agave tequilana*. *European Journal of Plant Pathology* , 317-331.

Recibido:
7/mayo/2024

Aceptado:
17/diciembre/2024

- Liao, C. Z., Li, Y., & Tjong, S. C. (2019). Propiedades bactericidas y citotóxicas de las nanopartículas de plata. *Internacional de ciencias moleculares*, 20(2), 449. <https://doi.org/10.3390/ijms20020449>
- Martínez Martínez, S. Y., Arzate Fernández, A. M., González Pedroza, M. G., 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*. *Polibotanica*, 58(29), 149-157. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.10>
- Monge, M. (2009). Nanopartículas de plata: métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas. *Anales de Química*, 105(1), 33-41. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2931286>
- Olvera-Vargas, L. A., Pardo-Núñez, J., & Aguilar-Rivera, N. (22 de marzo de 2022). Detección de *Agave angustifolia* y *Agave cupreata* con técnicas geomáticas en Guerrero, México. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 23(2): e2241. doi:DOI: https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2241
- Rashid, M., Chowdhury, M., & Sultana, N. (2013). In-vitro Screening of some Chemicals and Biocontrol Agents against *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*, the Causal Agent of Soft Rot of Potato (*Solanum tuberosum*). *The Agriculturists*, 11(2), 1-9. <https://doi.org/10.3329/agric.v11i2.17480>
- Rojas-Avelizapa , N. G., Regalado-Infante , P. E., Dávila Lezama , M. d., Llarena Hernández , R. C., & Rojas-Avelizapa, L. I. (2020). Actividad antimicrobiana de nanopartículas de plata contra bacterias fitopatógenas. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 8(2), 1-7. <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v8i2.173>
- SAGARPA. (2017). *Ficha técnica pudrición blanda del cogollo del agave*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación . Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/244028/Ficha_Tcnica_Pectobacterium_carotovorum_en_agave_Versi_n_FINAL.pdf
- Santos Ruiz, P. A., & Barrios, L. N. (2022). Aplicación de pigmentos producidos por *Streptomyces coelicolor* en la síntesis de nanopartículas de plata con actividad antimicrobiana. *Hechos Microbiológicos*, 13(1), 37-46. doi: <https://doi.org/10.17533/udea.hm.v13n1a04>
- Solis, K. D., Palacios, J. E., Toledano, Y., Garibo, M. A., & Garibo, D. (2019). Síntesis de nanopartículas de plata a partir del extracto acuoso de *Annona muricata* y su efecto antimicrobiano. *Academia Journals*, 2481-2488. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/352196984_SINTESIS_DE_NANOPARTICULAS_DE_PLATA_A_PARTIR_DEL_EXTRACTO_ACUOSO_Annona_muricata_Y_SU_EFECTO_ANTIMICROBIANO
- Villamizar G, R., & Monroy P, L. (2015). Uso de Nanopartículas de plata en el control de microorganismos patógenos presentes en alimentos. @ *Limentech Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 13(1), 54-59. Obtenido de https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portalIG/home_206/recursos/general/02032016/alimentech.pdf

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

EFECTO DE OSMOLITOS, INHIBIDORES Y REGULADORES DEL CRECIMIENTO VEGETAL EN LA CONSERVACIÓN *in vitro* DE TRES ESPECIES DE *Agave* spp.

EFFECT OF OSMOLYTES, INHIBITORS, AND PLANT GROWTH REGULATORS ON THE *in vitro* CONSERVATION OF THREE *Agave* spp. SPECIES

Vega García, J.A., A.M. Arzate Fernández, H. G. García Núñez y J.I. Reyes-Díaz
EFECTO DE OSMOLITOS, INHIBIDORES Y REGULADORES DEL CRECIMIENTO
VEGETAL EN LA CONSERVACIÓN *in vitro* DE TRES ESPECIES DE *Agave* spp.
EFFECT OF OSMOLYTES, INHIBITORS, AND PLANT GROWTH REGULATORS ON
THE *in vitro* CONSERVATION OF THREE *Agave* spp. SPECIES



Efecto de osmolitos, inhibidores y reguladores del crecimiento vegetal en la conservación *in vitro* de tres especies de *Agave* spp.**Effect of osmolytes, inhibitors, and plant growth regulators on the *in vitro* conservation of three *Agave* spp. species**

Jesús Antonio Vega García,
Amaury Martín Arzate
Fernández, Hilda G. García
Núñez, Jesús Ignacio Reyes-
Díaz

**EFFECTO DE OSMOLITOS,
INHIBIDORES Y
REGULADORES DEL
CRECIMIENTO VEGETAL
EN LA CONSERVACIÓN *in
vitro* DE TRES ESPECIES DE
Agave spp.**

**EFFECT OF OSMOLYTES,
INHIBITORS, AND PLANT
GROWTH REGULATORS
ON THE *in vitro*
CONSERVATION OF
THREE *Agave* spp. SPECIES**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 225-236. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.14

Jesús Antonio Vega-García

Amaury Martín Arzate-Fernández: Autor de correspondencia:
amaury1963@yahoo.com.mx / <https://orcid.org/0000-0001-8603-0099>

Hilda G. García-Núñez

*Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento (CIEAF)
Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEMéx, Toluca, Estado de México, México*

Jesús Ignacio Reyes-Díaz <https://orcid.org/0000-0001-9234-6575>

*Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento (CIEAF).
Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEMéx, Toluca, Estado de México, México*

Dirección de Procesos Alimentarios y Química Área Biotecnología

*Unidad Académica de Capulhuac, Universidad Tecnológica del Valle de Toluca
Lerma, México*

RESUMEN: El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes tratamientos para la conservación *in vitro* de tres especies de *agave*: *Agave tequilana*, *A. salmiana* y *A. marmorata*, durante un período de 4 meses. Se adicionó al medio de cultivo MS los osmolitos: Polietilenglicol (PEG) a 10 y 15 g L⁻¹ y Manitol a 40 y 50 g L⁻¹, el inhibidor Paclobutrazol (PBZ) a 1, 3 y 5 mg L⁻¹, y los reguladores del crecimiento vegetal: Ácido Abscísico (ABA) a 1, 3 y 5 mg L⁻¹ y Ácido Salicílico (AS) a 1, 5 y 10 mg L⁻¹. Después de 120 días de cultivo *in vitro*, se evaluaron las variables, como el número y largo de hojas y raíces, el peso de la planta, y la altura total de la planta. También se determinó el porcentaje de supervivencia a los 120 días. Finalmente se realizó una aclimatación en invernadero durante 30 días para evaluar la supervivencia en condiciones *ex vitro*. Después de este periodo, las tres especies de *Agave* mostraron una notable capacidad de adaptación y supervivencia en el invernadero. Los tratamientos con ABA fueron particularmente eficaces, en concentraciones de 1, 3 y 5 mg L⁻¹ para *A. tequilana* y *A. salmiana*, 5 mg L⁻¹ para *A. marmorata*, demostrando ser los más efectivos. Estos tratamientos mostraron una inhibición significativa del crecimiento, y en consecuencia una alternativa para la conservación *in vitro* de las especies estudiadas. Se observó un 100 % de supervivencia para las tres especies de *agave* evaluadas.

Palabras clave: Inhibidores, Reguladores, Osmolitos, Conservación, *Agave*.

ABSTRACT: The objective of this study was to evaluate the effect of different treatments for the *in vitro* conservation of three *agave* species: *Agave tequilana*, *A. salmiana*, and *A. marmorata* over a period of 4 months. Osmolytes were added to the MS culture medium: Polyethylene Glycol (PEG) at 10 and 15 g L⁻¹, and Mannitol at 40 and 50 g L⁻¹; the inhibitor Paclobutrazol (PBZ) at 1, 3, and 5 mg L⁻¹; and plant growth regulators: Abscisic Acid (ABA) at 1, 3, and 5 mg L⁻¹, and Salicylic Acid (SA) at 1, 5, and 10 mg L⁻¹. After 120 days of *in vitro* culture, variables such as the number and length of leaves and roots, plant weight, and total plant height were evaluated. The survival rate was also determined at 120 days. Finally, acclimatization was conducted in a greenhouse over 30 days to assess survival under *ex vitro* conditions. After this period, the three *agave* species demonstrated notable adaptation and survival in the greenhouse. Treatments with ABA were particularly effective at concentrations of 1, 3, and 5 mg L⁻¹ for *A. tequilana* and *A. salmiana*, and 5 mg L⁻¹ for *A. marmorata*, proving to be the most

effective. These treatments showed significant growth inhibition, thus providing an alternative for the *in vitro* conservation of the studied species. A 100% survival rate was observed for all three agave species evaluated.

Key words: Inhibitors, Regulators, Osmolytes, Conservation, *Agave*.

INTRODUCCIÓN

Los agaves, son plantas emblemáticas de México, tienen un papel crucial tanto cultural como económico en el país. Además de su uso tradicional en la producción de tequila y mezcal, los científicos están explorando diversas aplicaciones industriales de estas plantas, con el desafío de asegurar que su explotación no comprometa la sustentabilidad ni el medio ambiente (Nava-Cruz, 2014).

El ciclo de vida de los agaves varía entre 10 y 20 años, después de florecer, la planta muere, lo que hace que su regeneración natural sea lenta y difícil. Asimismo, las plantas obtenidas por semilla tienen un desarrollo lento y una baja tasa de éxito en el trasplante por lo que la reproducción asexual mediante hijuelos es considerado el método más empleado para su propagación (Arzate-Fernández A. M.-F., 2011) (Arzate-Fernández, y otros, 2016). Sin embargo, la baja eficiencia de estos métodos resalta la necesidad de alternativas efectivas para la conservación y propagación a gran escala de estas especies.

El cultivo de tejidos vegetales se ha propuesto como una solución viable para la conservación, propagación masiva y mejoramiento genético de especies del género *Agave* (Martínez-Martínez, 2021). Estas estrategias no solo podrían garantizar la preservación de las especies, sino también su uso sostenible a largo plazo (Silva, 2011). Sin embargo, uno de los principales desafíos del mantenimiento prolongado de cultivos *in vitro* es su elevado costo, debido principalmente a la mano de obra, cambio o sustitución frecuente de medios de cultivo y al alto consumo energético necesario para la refrigeración o al uso de materiales como el nitrógeno líquido (Bello-Bello J. J.-G.-A., 2015). Por lo tanto, es crucial desarrollar estrategias de conservación *in vitro* que permitan ralentizar (retardar) el crecimiento de las plantas sin comprometer su viabilidad, posibilitando así el almacenamiento de un gran número de especímenes en espacios reducidos y listos para ser utilizados cuando se requiera (García-Águila, 2007), así como reducir el riesgo de contaminación por manipulación y disminuir los costos asociados a la preparación de medios de cultivo.

En investigaciones previas, se logró establecer un banco de germoplasma *in vitro* de varias especies de *Agave* bajo condiciones de crecimiento retardado, utilizando osmolitos como manitol y sorbitol, que reducen la absorción de agua sin afectar la viabilidad de las plantas (Pérez-Molphe, 2012). La ralentización del crecimiento celular inducida por agentes osmóticos como el manitol y el polietilenglicol (PEG) ha sido documentada en otros cultivos como papaya (Acosta-Pérez, 2005), malanga (Rayas-Cabrera, 2013) y caña de azúcar (Bello-Bello J. J.-P.-A.-V.-S., 2014), donde estos compuestos aumentan el gradiente de concentración del medio, reduciendo el potencial osmótico de la planta y dificultando la absorción de agua y nutrientes.

Por otra parte, se ha investigado el uso de inhibidores de las giberelinas, como el paclobutrazol (PBZ), en plantas como caña de azúcar, orquídeas y agaves. Estos inhibidores bloquean la enzima ent-kaureno oxidasa, responsable de la biosíntesis de giberelinas, lo que resulta en un crecimiento más lento (Spinoso-Castillo, Pérez-Sato, & Schettino-Salomón, 2022).

Por otro lado, reguladores del crecimiento vegetal (RCV) como el ácido salicílico (AS) han demostrado inducir resistencia en frutos como el mango (Quiróz-López, 2021). Sin embargo, en *Agave*, aunque bajas concentraciones de ácido salicílico pueden ser beneficiosas, por el contrario concentraciones elevadas pueden causar inhibición del crecimiento (Roque-Otero, 2023). El ácido abscísico (ABA), es una fitohormona derivada de los carotenoides, juega un papel clave en la regulación de la dormancia de las semillas, inhibición de la germinación y promoción de la senescencia. Aunque su uso en altos niveles puede afectar negativamente el desarrollo vegetal, el ABA también regula el cierre estomático, lo que ayuda a reducir la transpiración (Alcántara-Cortés, 2019). Su efecto inhibitorio en el crecimiento ha sido comprobado en cultivos como camote, yuca, caña de azúcar y papa (Espinosa-Reyes, 2002) (Barroero, 2008) (Bello-Bello J. J.-P.-A.-V.-S., 2014) (Páez de Cásares, 2016).

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de dos osmolitos, dos reguladores y un inhibidor del crecimiento vegetal en la conservación *in vitro* de tres especies de *Agave*, con el fin de desacelerar su metabolismo y prolongar los intervalos entre transferencias para su propagación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de explantes a partir de semillas

Se utilizaron semillas de *Agave tequilana*, *A. salmiana* y *A. marmorata*, proporcionadas por el Laboratorio de Biología Molecular Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEMéx. Las semillas fueron desinfectadas siguiendo el protocolo descrito por (Aguilar-Rito, 2023). Posteriormente, se establecieron en un medio MS (Murashige & Skoog, 1962) suplementado con 30 g L⁻¹ de sacarosa, carbón activado (0.5 g L⁻¹) y gelificado con agar (3 g L⁻¹), ajustado a un pH de 5.7 ± 0.2. Después de 60 días de germinación, se seleccionó la zona meristemática de las plántulas, que se diseccionó en explantes de aproximadamente 2 cm de longitud, remanentes de raíz y hojas fueron eliminados.

Evaluación de tratamientos de ralentización

Los explantes (incluida la zona meristemática) fueron incubados en frascos de vidrio con 20 ml de medio MS suplementado con 30 g L⁻¹ de sacarosa y 3 g L⁻¹ de agar, en condiciones controladas de 25 ± 2 °C, con luz indirecta (33 µmol m⁻² s⁻¹) incubadas en un fotoperiodo de 18/16 h, durante 120 días. Se evaluaron los siguientes tratamientos: a) Osmolitos, Manitol a 40 y 50 g L⁻¹ (Materiales y Abastos Especializados, S.A. de C.V.) y Polietilenglicol 6000 (PEG) a 10 y 15 g L⁻¹ (Aldrich Chemistry); b) Inhibidores de crecimiento, Paclobutrazol (PBZ) a 1, 3 y 5 mg L⁻¹ (Sichuan Runer Technology Co., Ltd.) y c) Reguladores del crecimiento vegetal (RCV), Ácido salicílico (AS) a 1, 5 y 10 mg L⁻¹, y Ácido abscísico (ABA) a 1, 3 y 5 mg L⁻¹ (Sigma Life Science). Después de 120 días, se midieron las siguientes variables: longitud y cantidad de raíces y hojas, altura total y peso de las plantas. El porcentaje de supervivencia se calculó dividiendo el número de plantas que sobrevivieron entre el número total de plantas cultivadas *in vitro*.

Aclimatación en invernadero

Después de 4 meses de ralentización, y una vez medidas las variables, las plántulas obtenidas fueron transferidas a espumas fenólicas dentro de microtúneles en invernadero, con una temperatura controlada entre 28 ± 2 °C y una humedad relativa del 60 al 80%. Se analizó el porcentaje de supervivencia de las plántulas en estas condiciones (se dividió del total de las plantas obtenidas después de germinadas las semillas, entre el total de las plantas que sobrevivieron después de 30 días en aclimatación).

Análisis estadístico

Se utilizó un diseño completamente aleatorio, con 14 tratamientos, cada tratamiento consistió en un frasco con cinco explantes en su interior, se realizaron cinco repeticiones de cada tratamiento. El análisis de varianza (ANOVA) se realizó utilizando el paquete estadístico Infostat, seguido de una prueba de comparaciones múltiples de Tukey con un nivel de significancia de 0.05.

RESULTADOS

Ralentización *in vitro*

Tabla 1. Efecto de osmolitos, inhibidores y reguladores del crecimiento vegetal en la ralentización *in vitro* de *A. tequilana*.

Table 1. Effect of osmolytes, inhibitors, and plant growth regulators on the *in vitro* ralentization of *A. tequilana*.

| Tratamiento | Dosis (mg L ⁻¹) | Sv (%) | Peso total de planta (g) | Altura de planta (cm) | Número de Hojas | Número de raíces | Largo de hojas (cm) | Largo de raíces (cm) |
|----------------|-----------------------------|--------|--------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Testigo | MS | 100 | 1.82 A | 8.60 AB | 3.00 ABCD | 6.60 ABC | 17.00 AB | 10.20 AB |
| | 1 | 100 | 0.16 D | 3.40 C | 1.60 BCD | 1.80 BC | 3.70 CD | 1.40 B |
| ABA | 3 | 100 | 0.10 D | 2.40 C | 1.40 CD | 1.60 C | 2.90 CD | 0.7 B |
| | 5 | 100 | 0.06 D | 1.60 C | 1.20 D | 1.20 C | 2.00 D | 0.32 B |
| | 1 | 100 | 0.98 B | 9.80 A | 2.60 ABCD | 1.40 C | 18.80 A | 7.80 AB |
| PBZ | 3 | 100 | 0.84 BC | 2.40 C | 2.80 ABCD | 1.80 BC | 12.60 ABCD | 8.40 AB |
| | 5 | 100 | 0.58 BCD | 2.40 C | 3.60 ABC | 6.60 A | 4.60 CD | 10.80 AB |
| | 1 | 100 | 1.02 B | 4.80 ABC | 3.80 AB | 5.80 AB | 14.40 ABC | 13.00 A |
| AS | 5 | 100 | 0.34 CD | 5.00 ABC | 2.80 ABCD | 1.40 C | 10.00 ABCD | 4.40 AB |
| | 10 | 100 | 0.28 CD | 3.40 C | 4.80 A | 5.20 ABC | 5.20 BCD | 5.40 AB |
| PEG | 10000 | 90 | 0.48 BCD | 4.60 BC | 1.40 CD | 1.40 C | 3.80 CD | 1.00 B |
| | 15000 | 80 | 0.22 D | 2.80 C | 1.40 CD | 1.20 C | 3.20 CD | 1.80 B |
| | 40000 | 100 | 0.28 CD | 3.60 CD | 2.20 BCD | 1.80 BC | 4.20 CD | 3.60 AB |
| MANITOL | 50000 | 100 | 0.05 D | 4.60 BC | 1.80 BCD | 1.20 C | 8.40 ABCD | 4.40 AB |

MS: Medio MS, Sv: Supervivencia. Los valores representan la media aritmética después de 120 días de tratamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

MS: Medium MS. Sv: Survival. The values represent the arithmetic mean after 120 days of treatment. Means with the same letter are not significantly different ($p > 0.05$).

Los resultados de la ralentización *in vitro* de las tres especies de *Agave* se obtuvieron después de 120 días de cultivo (Tabla 1). Los mejores resultados sobre la ralentización del crecimiento durante el proceso de conservación se observaron utilizando ácido abscísico (ABA). En la Figura 1 se observa el nivel de respuesta de las plantas cultivadas en medio suplementado con ABA y los testigos cultivados en medio MS, al cabo de 120 días después de iniciado el cultivo. Se observa una marcada diferencia en el desarrollo y viabilidad de las plantas tratadas con ABA en comparación con los testigos ya que su desarrollo fue notablemente menor.

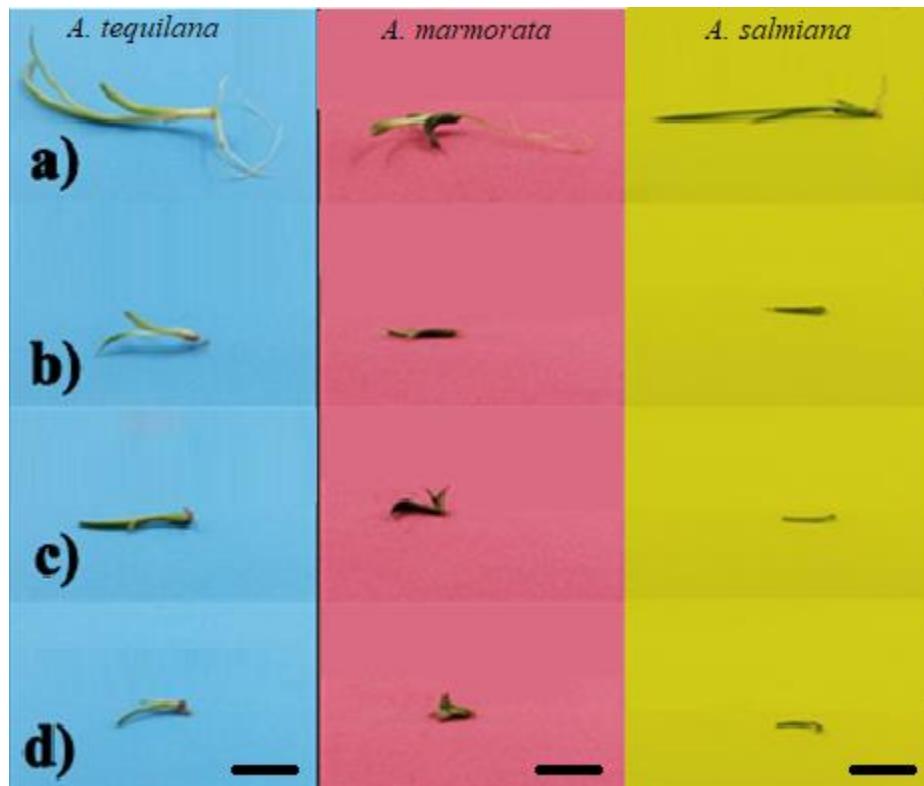


Figura 1. Nivel de desarrollo de plantas de agave cultivadas *in vitro* en medio suplementado con ABA y sin RCV a los 120 días.

Figure 1. Developmental stage of agave plants cultivated *in vitro* in medium supplemented with ABA and without PGR at 120 days.

a) Testigos, b) ABA 1 mg L⁻¹, c) ABA 3 mg L⁻¹, d) ABA 5 mg L⁻¹. Barra mide 2 cm.

a) Controls, b) ABA 1 mg L⁻¹, c) ABA 3 mg L⁻¹, d) ABA 5 mg L⁻¹. Scale bar represents 2 cm.

Efecto de los tratamientos en *Agave tequilana*

Los resultados para *Agave tequilana* mostraron una supervivencia del 100% en todos los tratamientos, excepto en los sometidos a PEG a concentraciones de 10 y 15 g L⁻¹, donde las tasas de supervivencia fueron ligeramente menores, alcanzando el 90% y 80%, respectivamente. Los tratamientos con ABA a 3 y 5 mg L⁻¹, PEG a 15 g L⁻¹ y Manitol a 50 g L⁻¹ mostraron una reducción significativa en el peso total de las plantas, con valores desde 0.06 a 0.22 g en comparación con 1.82 g del testigo (Tabla 1).

En términos de altura de la planta, los tratamientos que tuvieron mayor reducción fueron con ABA a 1, 3 y 5 mg L⁻¹, PBZ a 2 y 5 mg L⁻¹ y PEG a 15 g L⁻¹, con valores significativamente menores en comparación con el testigo, indicando un efecto inhibitorio del crecimiento vertical. El tratamiento que tuvo menor número de hojas (1.2) fue con ABA a 5 mg L⁻¹, en comparación con los testigos (3.0).

Los resultados en los que se observó el menor número de raíces (1.2) fueron ABA con 5 mg L⁻¹, PEG con 15 g L⁻¹ y Manitol a 50 g L⁻¹, así mismo el menor crecimiento de las hojas (2 cm) se encontró en el tratamiento de ABA con 5 mg L⁻¹, en cuanto al largo de las raíces se observó un crecimiento igual o menor a 1cm para aquellos tratamientos de ABA con 3 y 5 mg L⁻¹ y de PEG con 10 g L⁻¹.

Efecto de los tratamientos en *Agave marmorata*

En *A. marmorata*, todos los tratamientos lograron un 100% de supervivencia. En cuanto al peso total de planta, los tratamientos con biomasa menor a 0.1 g fueron con ABA a 3 y 5 mg L⁻¹, con PEG a 15 g L⁻¹ y Manitol a 50 g L⁻¹ (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de osmolitos, inhibidores y reguladores del crecimiento vegetal en la ralentización *in vitro* de *A. marmorata*.

Table 2. Effect of osmolytes, inhibitors, and plant growth regulators on the *in vitro* ralentization of *A. marmorata*.

| Tratamiento | Dosis (mg L ⁻¹) | Sv (%) | Peso total de planta (g) | Altura de planta (cm) | Número de Hojas | Número de raíces | Largo de hojas (cm) | Largo de raíces (cm) |
|----------------|-----------------------------|--------|--------------------------|-----------------------|-----------------|------------------|---------------------|----------------------|
| Testigo | MS | 100 | 0.90 A | 2.80 ABC | 2.00 A | 1.60 A | 6.20 A | 6.40 A |
| ABA | 1 | 100 | 0.08 C | 2.00 ABCD | 1.00 A | 0.80 A | 1.10 BC | 0.28 B |
| | 3 | 100 | 0.04 C | 1.20 CD | 1.40 A | 0.20 A | 0.80 C | 0.04 B |
| | 5 | 100 | 0.04 C | 1.00 D | 1.20 A | 0.40 A | 0.60 C | 0.02 B |
| PBZ | 1 | 100 | 0.24 ABC | 1.20 CD | 2.40 A | 0.20 A | 1.40 BC | 0.04 B |
| | 3 | 100 | 0.18 C | 2.00 ABCD | 2.00 A | 2.00 A | 1.80 BC | 1.10 AB |
| | 5 | 100 | 0.40 ABC | 1.50 CD | 1.20 A | 1.00 A | 1.40 BC | 1.80 AB |
| AS | 1 | 100 | 0.24 ABC | 3.20 AB | 3.00 A | 1.40 A | 4.20 AB | 3.40 AB |
| | 5 | 100 | 0.86 AB | 3.40 A | 1.80 A | 1.00 A | 3.80 ABC | 3.40 AB |
| | 10 | 100 | 0.22 BC | 1.60 BCD | 1.80 A | 0.80 A | 2.60 BC | 2.00 AB |
| PEG | 10000 | 100 | 0.30 ABC | 2.00 ABCD | 2.00 A | 1.60 A | 2.60 BC | 2.10 AB |
| | 15000 | 100 | 0.08 C | 1.80 ABCD | 1.40 A | 0.80 A | 2.00 BC | 1.20 AB |
| MANITOL | 40000 | 100 | 0.28 ABC | 1.20 CD | 1.00 A | 1.00 A | 1.20 BC | 4.30 AB |
| | 50000 | 100 | 0.08 C | 1.80 ABCD | 0.40 A | 0.20 A | 1.00 BC | 0.40 B |

MS: Medio MS, Sv: Supervivencia. Los valores representan la media aritmética después de 120 días de tratamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

MS: Medium MS. Sv: Survival. The values represent the arithmetic mean after 120 days of treatment. Means with the same letter are not significantly different ($p > 0.05$).

Para la altura de la planta, se observó que el tratamiento con ABA a 5 mg L⁻¹ fue el que tuvo menor crecimiento (1 cm), lo que podría estar relacionado con una mayor concentración y tipo de regulador de crecimiento. No se encontraron diferencias significativas en el número de hojas y raíces en todos los tratamientos, lo que sugiere que estos parámetros no se vieron significativamente afectados por ninguno de los tratamientos aplicados. Mientras que en aquellos tratamientos que lograron una longitud en hoja menor a 1 cm fueron con ABA a 3 y 5 mg L⁻¹, y Manitol con 50 g L⁻¹, logrando con el tratamiento de 5 mg L⁻¹ABA un crecimiento de 103 veces menor respecto al testigo. Así mismo, se observó que los tratamientos con un crecimiento de raíces menor a 0.5 cm fueron con ABA a 1, 3 y 5 mg L⁻¹, con PBZ a 1 mg L⁻¹ y con Manitol a 50 g L⁻¹. Sin embargo, se enfatiza que con 5 mg L⁻¹ de ABA rerepresentó un crecimiento 320 veces menor con respecto al testigo.

Tabla 3. Efecto de osmolitos, inhibidores y reguladores del crecimiento vegetal en la ralentización *in vitro* de *A. salmiana*.

Table 3. Effect of osmolytes, inhibitors, and plant growth regulators on the *in vitro* ralentization of *A. salmiana*.

| Tratamiento | Dosis (mg L ⁻¹) | Sv (%) | Peso total de planta (g) | Altura de planta (cm) | Número de hojas | Número de raíces | Largo de hojas (cm) | Largo de raíces (cm) |
|-------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| Testigo | MS | 100 | 0.24 BC | 7.40 A | 2.60 AB | 1.40 AB | 9.60 A | 3.60 A |
| ABA | 1 | 100 | 0.03 C | 1.10 E | 0.20 B | 0.40 AB | 0.10 DE | 0.20 C |
| | 3 | 100 | 0.02 C | 1.00 E | 0.00 B | 0.60 AB | 0.00 E | 0.18 C |
| | 5 | 100 | 0.02 C | 1.00 E | 0.00 B | 0.40 AB | 0.00 E | 0.10 C |
| | 1 | 100 | 0.52 A | 5.70 AB | 4.80 A | 1.80 AB | 7.40 AB | 2.70 ABC |
| PBZ | 3 | 100 | 0.36 AB | 3.60 BCD | 3.40 AB | 1.20 AB | 5.00 ABCD | 1.90 ABC |
| | 5 | 100 | 0.10 BC | 2.20 CDE | 2.80 AB | 2.20 A | 2.20 CDE | 3.44 AB |
| | 1 | 100 | 0.10 BC | 3.90 BC | 1.80 AB | 0.80 AB | 5.60 ABC | 0.78 ABC |
| AS | 5 | 100 | 0.09 BC | 2.40 CDE | 3.20 AB | 2.20 A | 2.80 BCDE | 0.58 ABC |
| | 10 | 100 | 0.08 C | 2.00 CDE | 1.00 AB | 0.00 B | 1.00 CDE | 0.00 C |
| | 10000 | 100 | 0.07 C | 2.90 CDE | 1.20 AB | 0.80 AB | 3.60 BCDE | 0.32 C |
| PEG | 15000 | 90 | 0.06 C | 1.20 E | 0.40 B | 0.20 B | 0.40 DE | 0.30 C |
| | 40000 | 100 | 0.02 C | 1.40 DE | 1.00 AB | 0.40 AB | 1.20 CDE | 0.70 ABC |
| | 50000 | 90 | 0.06 C | 1.20 E | 0.80 B | 0.20 B | 1.40 CDE | 0.40 BC |
| | | | | | | | | |

MS: Medio MS, Sv: Supervivencia. Los valores representan la media aritmética después de 120 días de tratamiento. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

MS: Medium MS. Sv: Survival. The values represent the arithmetic mean after 120 days of treatment. Means with the same letter are not significantly different ($p > 0.05$).

Efecto de los tratamientos en *Agave salmiana*

Para *A. salmiana*, la supervivencia fue del 100% en todos los tratamientos, excepto en aquellos con PEG a 15 g L⁻¹ y Manitol a 50 g L⁻¹, donde la supervivencia en ambos fue del 90%. Los tratamientos que tuvieron un peso total de la planta menor o igual a 0.1 g fueron con ABA a 1, 3 y 5 mg L⁻¹, con PBZ a 5 mg L⁻¹, con AS a 1, 5 y 10 mg L⁻¹, con PEG a 10 y 15 g L⁻¹ y con Manitol a 40 y 50 g L⁻¹, mostrando una mayor reducción de biomasa (Tabla 3).

Se observó una diferencia significativa en la altura de las plantas; siendo aquellos en los que se alcanzó un crecimiento vertical promedio menor a 1.1 cm, el cual fue equivalente a 6.4 veces respecto al testigo, en los siguientes tratamientos: con ABA a 1, 3 y 5 mg L⁻¹, con PEG a 15 g L⁻¹ y con Manitol a 40 y 50 g L⁻¹, lo que podría ser una ventaja para la conservación prolongada en condiciones *in vitro*. Con respecto al número de hojas se observó una amplia reducción en los tratamientos que tenían ABA con 1 mg L⁻¹; ya que con 3 y 5 mg L⁻¹ resultó inhibitorio. De igual manera, con PEG a 10 g L⁻¹ y Manitol a 40 g L⁻¹ se observó una hoja en promedio. Mientras que para el menor número de raíces (0.2) fueron los tratamientos que contenían PEG a 15 g L⁻¹ y Manitol a 50 g L⁻¹, ya que con AS a 10 mg L⁻¹ resultó inhibitorio. Por otra parte, la menor longitud en hojas (0.1-0.4 cm) se observó en los tratamientos con ABA a 1 mg L⁻¹ y con PEG a 15 g L⁻¹, respectivamente; ya que con ABA a 3 y 5 mg L⁻¹ resultó inhibitorio en la formación de raíces; mientras que las raíces que presentaron un crecimiento menor a 0.5 cm, es decir 7.2 veces menos con respecto al testigo, fueron aquellas provenientes de los tratamientos con ABA 1, 3 y 5 mg L⁻¹, PEG a 10 y 15 g L⁻¹ y Manitol a 50 g L⁻¹, observándose un efecto inhibitorio con AS a 10 mg L⁻¹.

Aclimatación en invernadero

Durante el periodo de aclimatación en el invernadero, se observó una supervivencia del 100% para las tres especies de *Agave*. En la Figura 2 se muestran plantas de *A. tequilana*, *A. marmorata* y *A. salmiana* después de 30 días de aclimatación, evidenciando un desarrollo saludable.



A. tequilana



A. marmorata



A. salmiana

Figura 2. Plántulas de *Agave* después de 30 días de aclimatación en invernadero.
Figure 2. *Agave* seedlings after 30 days of acclimatization in greenhouse.

DISCUSIÓN

Comparación de las tres especies de *Agave*

En este estudio, los resultados mostraron que la viabilidad de los explantes de *A. tequilana* y *A. salmiana* fueron afectados por los osmorreguladores, lo que coincide con lo reportado por (Bello-Bello J. J.-P.-A.-V.-S., 2014) quienes señalan que en la conservación *in vitro* de caña de azúcar en presencia de manitol, tuvo un impacto negativo en la supervivencia y el crecimiento de las plántulas. En particular, los tratamientos con 15, 30 y 45 g L⁻¹ de manitol alcanzaron tasas de supervivencia del 80%, 70% y 43%, respectivamente. De igual manera, (Bello-Bello J. J.-G.-A., 2015) señalaron que con 10, 20 y 30 g L⁻¹ de manitol presentaron tasas de supervivencia del 90%, 70% y 53%, respectivamente en *Vainilla planifolia*. También reportaron que los porcentajes de supervivencia con PEG fueron menores en comparación con los de manitol, alcanzando 83%, 70% y 43% para las concentraciones de 10, 20 y 30 g L⁻¹, respectivamente. En el presente trabajo, para *A. marmorata* no se vio afectado por los osmorreguladores, lo que coincide con lo reportado. (Pérez-Molphe, 2012) señalaron que los brotes de diez especies de *Agave* cultivados *in vitro* en presencia de manitol a una concentración de 50 g L⁻¹, no presentaron indicios de daño ni cambios en su morfología; únicamente se observó una reducción en su crecimiento.

Por otro lado, logramos observar que con paclobutrazol se disminuyeron ciertas variables de crecimiento como el peso y el largo total en las tres especies de *Agave*, lo cual coincide con lo reportado por (De-Sá, 2020) quienes señalaron que en *Manihot pseudo glaziovii*, con 0.1 mg L⁻¹ de PBZ tuvo un impacto notable en su conservación *in vitro*. Para *M. violacea*, la mejor dosis para su conservación fue de 0.2 mg L⁻¹ de PBZ. Mientras que para *M. flabelifolia*, las concentraciones utilizadas de PBZ no resultaron efectivas para la conservación *in vitro*. (Ramírez-Mosqueda M. L.-A.-C.-D., 2024) mostraron que después de 12 meses de conservación *in vitro* de la especie *Guarianthe skinneri* (Bateman) Dressler & W. E. Higgins, se obtuvo una reducción en la longitud de los brotes conservados con 2 mg L⁻¹ de PBZ. (Bello-Bello J. J.-P.-A.-V.-S., 2014) observaron que las plantas de caña de azúcar se conservaron *in vitro* en condiciones de crecimiento lento inducido por PBZ a concentraciones de 1, 2 y 3 mg L⁻¹, retrasándose su desarrollo sin comprometer la supervivencia. (Spinoso-Castillo, Pérez-Sato, & Schettino-Salomón, 2022) demostraron que en antíró y caña de azúcar, la concentración de 1 mg L⁻¹ de PBZ fue la más efectiva para la conservación *in vitro* sin comprometer la supervivencia, mientras que, en agave, la mejor concentración fue de 3 mg L⁻¹ de PBZ. (Bello-Bello J. J.-G.-A., 2015) utilizaron concentraciones de 1, 2 y 3 mg L⁻¹ de PBZ para la conservación *in vitro* de *V. planifolia*, logrando mantener una supervivencia del 100% de los brotes. No obstante, el uso de este compuesto provocó anomalías tanto en la región apical como en el sistema radical de las plántulas de *V. planifolia*. En nuestro experimento no se observaron anomalías en las plantas de agave cultivadas con PBZ.

Por otro lado, el ácido salicílico (AS) se presenta como uno de los tratamientos que, a bajas concentraciones, promueve el crecimiento de las plantas, incrementando el número y la longitud de hojas y raíces. Sin embargo, a dosis elevadas, se observa una disminución en el peso, la altura y la longitud de hojas y raíces, lo que concuerda con lo expuesto por (Roque-Otero, 2023) quien sostiene que el AS tuvo un comportamiento diferente para cada especie de *Agave*, reportando un incremento significativo en la longitud de la raíz, a una concentración de 1 y 3.6 µM de AS, menciona que las plantas de agave responden positivamente a este regulador aplicado en bajas dosis y si se aplica en dosis elevadas puede producir inhibición del crecimiento.

Los resultados sugieren al ABA como el factor determinante para lograr la ralentización del crecimiento *in vitro* como estrategia de conservación. Estos hallazgos están respaldados por la literatura existente sobre el efecto del ABA en la conservación *in vitro* de diversas especies vegetales. (Páez-Cásares & González-Valladares, 2001) investigaron el efecto de 1.5 mg L⁻¹ de ABA en la variedad Kennebec de papa, observando un desarrollo moderado tanto a nivel aéreo como radical, lo cual contrasta con los resultados obtenidos en las especies de *Agave* estudiadas. Asimismo, (Espinosa-Reyes, 2002) determinaron que dosis de 5.0 y 10.0 mg L⁻¹ de ABA fueron efectivas para la conservación *in vitro* del boniato, reduciendo significativamente el número de raíces, yemas y longitud del tallo, aunque manteniendo altos porcentajes de supervivencia. Por su parte, (Barrueto, 2008) confirmaron el efecto inhibitorio del ABA sobre la brotación de yemas axilares de yuca, con concentraciones de 20 y 30 µM inhibieron la brotación por 90 días; lo que

coincide con nuestros resultados, ya que en las tres especies de *Agave* se observó una inhibición de los explantes después de 120 días de cultivo *in vitro*. Por otro lado, (Bello-Bello J. J.-P.-A.-V.-S., 2014) encontraron que concentraciones elevadas de ABA redujeron los porcentajes de supervivencia en cultivos de caña de azúcar, afectando negativamente el crecimiento y la diferenciación celular. Sin embargo, en nuestro estudio, las plantas tratadas con ABA no tuvieron problemas de supervivencia, logrando un 100% tanto *in vitro* como en invernadero. (Bello-Bello J. J.-G.-A., 2015) establecieron un método de conservación *in vitro* para *V. planifolia* utilizando 3 mg L⁻¹ de ABA, logrando una alta viabilidad con subcultivos cada 180 días, y destacaron el papel del ABA como inhibidor del crecimiento y regulador de fitohormonas. En el presente experimento, se observó que concentraciones de 1, 3 y 5 mg L⁻¹ de ABA fueron las más efectivas para ralentizar el crecimiento. Además, (Ramírez-Mosqueda M. A.-C.-T.-B., 2018) demostraron que concentraciones de 0.5 mg L⁻¹ de ABA en cultivos de *Laelia anceps* redujeron la cantidad de brotes, pero mantuvieron una alta supervivencia. Estos estudios reflejan la diversidad de efectos fisiológicos del ABA, destacando su papel crucial en la regulación del crecimiento y en los programas de conservación y regeneración *in vitro*. El ABA inhibe la elongación y la división celular, y aunque afecta negativamente el crecimiento, no compromete la supervivencia de las plantas, lo que subraya su utilidad en los protocolos de conservación *in vitro*.

CONCLUSIONES

Los tratamientos con ácido abscísico (ABA) fueron particularmente efectivos en inhibir el crecimiento, a concentraciones de 1, 3 y 5 mg L⁻¹ para *A. tequilana* y *A. salmiana*, y con 5 mg L⁻¹ para *A. marmorata*. Estos tratamientos mostraron diferencias en comparación con el testigo, manteniendo una supervivencia del 100%, lo que resalta la eficacia del ABA en los protocolos de conservación *in vitro*. Por otro lado, el tratamiento con PEG a 15 g L⁻¹ en *A. salmiana* redujo el desarrollo de las plantas, pero también afectó negativamente la supervivencia. Los tratamientos con PBZ, Manitol, PEG y AS no lograron uniformidad en todas las variables, indicando que no inhibieron el crecimiento de manera efectiva. Esto refuerza la importancia del ABA como una herramienta clave en la conservación y manejo *in vitro* de especies de *Agave*, destacando su papel integral en los protocolos de conservación, a diferencia de otros tratamientos que no mostraron la misma eficacia en la inhibición del crecimiento ni en la conservación de la supervivencia. Las tres especies de *Agave* demostraron una alta capacidad de adaptación y supervivencia en condiciones de invernadero.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Pérez, K. G.-A. (2005). Conservación *in vitro* a corto plazo de ápices de plantas del híbrido de papaya IBP 42-99. *Biotecnología Vegetal*, Vol. 5, No. 1: 47 - 50.
- Aguilar-Rito, M. G.-F.-N.-M. (2023). Establecimiento de un protocolo eficiente de desinfección *in vitro* en semillas de siete especies de *Agave* spp. *Revista Mexicana de Fitopatología*.
- Al-Abdallat, A. M.-Q. (2017). Preservación *in vitro* de plantas transgénicas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) que sobreexpresan el factor de transcripción SIAREB1 relacionado con el estrés. *Revista internacional de ciencias moleculares*, N° 7, 1477.
- Alcántara-Cortés, J. S.-G.-C.-M. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, 109-129.
- Arzate-Fernández, A. M., Piña-Escutia, J. L., Norman-Mondragón, T. H., Reyes-Díaz, J. I., Guevara-Suárez, K. L., & Vázquez-García, L. M. (2016). Regeneración de agave mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) a partir de embriones somáticos encapsulados. *Revista fitotecnia mexicana*, 39(4), 359-366.

Recibido:
10/junio/2024

Aceptado:
14/diciembre/2024

- Arzate-Fernández, A. M.-F. (2011). Capacidad embriogénica de callos inducidos en ejes embrionarios cigóticos de *Agave angustifolia* Haw. *Revista fitotecnia mexicana*, 101-106.
- Barrueto, C. P. (2008). Importancia del ácido abscísico (ABA) en la conservación *in vitro* de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 304-308.
- Bello-Bello, J. J.-G.-A. (2015). Conservación de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks.) bajo condiciones de lento crecimiento *in vitro*. *Revista fitotecnia mexicana*, 165-171.
- Bello-Bello, J. J.-P.-A.-V.-S. (2014). Comparación del efecto de osmorreguladores e inhibidores del crecimiento en la conservación *in vitro* de caña de azúcar. *Agrociencia*, 439-446.
- De-Sá, J. F.-S.-S.-d.-L.-C. (2020). Efectos de diferentes dosis de paclobutrazol y sacarosa en la mínima *in vitro* crecimiento de especies silvestres de manihot. *Revista Brasileira de Ciencias Agrárias*.
- Espinosa-Reyes, A. S.-H.-P.-P. (2002). Empleo de ácido abscísico, manitol y la disminución de la concentración de las sales del medio de cultivo en la conservación *in vitro* de *Ipomoea batatas*. *Biotecnología vegetal*, 39-42.
- García-Águila, L. d. (2007). Aspectos básicos de la conservación *in vitro* de germoplasma vegetal. *Biotecnología Vegetal*, Vol. 7, No. 2: 67 - 79.
- Martínez-Martínez, S. Y.-F.-A.-V.-M. (2021). Regeneration of agave marmorata roelz plants in temporary immersion systems, via organogenesis and somatic embryogenesis. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 24.
- Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A Revised Medium for Rapid Growth and Bio Assays with Tobacco Tissue Cultures. *Physiologia Plantarum*, 473-497.
- Nava-Cruz, N. Y.-M. (2014). *Agave* biotechnology: an overview. *Critical Review in Biotechnology*, 546-559.
- Páez de Cásares, J. &. (2016). Conservación *in vitro* de dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L) bajo condiciones de crecimiento mínimo. *Revista Latinoamericana De La Papa*, 121-129.
- Páez-Cásares, J., & González-Valladares, R. (2001). Conservación *in vitro* de dos variedades de papa (*Solanum tuberosum* L) bajo condiciones de crecimiento mínimo. *Revista Latinoamericana de la Papa*, 121-129.
- Pérez-Molphe, B. E.-A.-R. (2012). Conservación *in vitro* de germoplasma de *Agave* spp. Bajo condiciones de crecimiento retardado. *Revista fitotecnia mexicana*, 35(4), 279-287.
- Quiróz-López, E. P.-M.-B.-S.-R.-L.-H. (2021). Efecto del ácido salicílico y metil jasmonato sobre *Colletotrichum* sp. en frutos de mango. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, Vol. 24, N° 2.
- Ramírez-Mosqueda, M. A.-C.-T.-B. (2018). Conservación y regeneración *in vitro* de *Laelia anceps* Lindl. *Revista Sudaficana de Botánica*, 219-223.
- Ramírez-Mosqueda, M. L.-A.-C.-D. (2024). Conservación *in vitro* de *Guarianthe skinneri*; (Bateman) Dressler & W. E. Higgins por mínimo crecimiento. *Polibotánica*, 58 (29).
- Rayas-Cabrera, A. C.-J.-P.-P.-T.-V. (2013). Efecto del manitol y el nitrato de plata en la conservación *in vitro* de la malanga (*Xanthosoma* spp.). *Revista Colombiana de Biotecnología*, Vol XV N° 1, 167-171.
- Roque-Otero, A. M. (31 de Mayo de 2023). Efecto del ácido salicílico en el incremento de biomasa y azúcares reductores en *Agave cupreata* Trel. & Berger y *Agave salmiana* gentry. *Tesis de Maestría*. Toluca., Estado de México., México: Universidad autónoma del Estado de México.
- Silva, T. P. (2011). Conservación *in vitro* de *Piper aduncum* y *Piper hispidinervum* en condiciones de crecimiento lento. *Pesq. Agropec. Bras.*, 46, 384-389.
- Spinoso-Castillo, J. L., Pérez-Sato, J. A., & Schettino-Salomón, S. S. (2022). Un método alternativo para la conservación *in vitro* a mediano plazo de diferentes especies de plantas mediante inhibidores de giberelinas. *Biología celular y del desarrollo in vitro: plantas*, 606-614.
- Spinoso-Castillo, J. L.-S.-S. (2022). Un método alternativo para la conservación *in vitro* a mediano plazo de diferentes especies de plantas mediante inhibidores de giberelinas. *Biología celular y del desarrollo in vitro: plantas*, 606-614.

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

**EVALUACIÓN DEL EFECTO
CITOTÓXICO DEL EXTRACTO
ETANÓLICO Y SAPONINAS TERPÉNICAS
DE *Solanum elaeagnifolium* SOBRE células
DE CÁNCER DE MAMA TRIPLE
NEGATIVO**

**EVALUATION OF THE CYTOTOXIC
EFFECT OF ETHANOLIC EXTRACT AND
TERPENIC SAPONINS FROM *Solanum*
elaeagnifolium ON TRIPLE-NEGATIVE
BREAST CANCER CELLS**

Alvarez Quezada, O.A., I. Neri Vargas y C.L. Vargas Requena

EVALUACIÓN DEL EFECTO CITOTÓXICO DEL EXTRACTO ETANÓLICO Y SAPONINAS TERPÉNICAS DE *Solanum elaeagnifolium* SOBRE CÉLULAS DE CÁNCER DE MAMA TRIPLE NEGATIVO

EVALUATION OF THE CYTOTOXIC EFFECT OF ETHANOLIC EXTRACT AND TERPENIC SAPONINS FROM *Solanum elaeagnifolium* ON TRIPLE-NEGATIVE BREAST CANCER CELLS



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0
Atribución-No Comercial ([CC BY-NC 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).

Evaluación del efecto citotóxico del extracto etanólico y saponinas terpélicas de *Solanum elaeagnifolium* sobre células de cáncer de mama triple negativo

Evaluation of the cytotoxic effect of ethanolic extract and terpenic saponins from *Solanum elaeagnifolium* on triple-negative breast cancer cells

Oscar Alberto Alvarez
Quezada, Imelda Neri Vargas y
Claudia Lucia Vargas Requena

**EVALUACIÓN DEL EFECTO
CITOTÓXICO DEL
EXTRACTO ETANÓLICO Y
SAPONINAS TERPÉNICAS
DE *Solanum elaeagnifolium*
SOBRE CÉLULAS DE
CÁNCER DE MAMA TRIPLE
NEGATIVO**

**EVALUATION OF THE
CYTOTOXIC EFFECT OF
ETHANOLIC EXTRACT
AND TERPENIC SAPONINS
FROM *Solanum elaeagnifolium*
ON TRIPLE-NEGATIVE
BREAST CANCER CELLS**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 237-250. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polibotanica.59.15](https://doi.org/10.18387/polibotanica.59.15)

Oscar Alberto Alvarez-Quezada <https://orcid.org/0000-0003-0753-3099>

Imelda Neri-Vargas

Claudia Lucía Vargas-Requena. Autora de correspondencia: cvgargas@uacj.mx
<https://orcid.org/0000-0001-7612-1616>

*Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Instituto de Ciencias Biomédicas,
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. Plutarco Elías Calles #1210
Fovissste Chamizal Ciudad Juárez, Chih., Méx. C.P. 32310*

RESUMEN: En México existen al menos 300 especies de plantas, agrupadas en 90 familias, que se cree poseen propiedades para combatir el cáncer. En ciertos miembros de la familia Solanaceae, se han identificado propiedades anticancerígenas potenciales a través de estudios *in vitro*. Por lo tanto, el presente trabajo se centró en la identificación de biomoléculas con actividad antineoplásica en el extracto etanólico del fruto de *Solanum elaeagnifolium*. Los resultados mostraron que dicho extracto presentó actividad citotóxica frente a células de cáncer de mama triple negativo (MDA-MB-231). Las pruebas fitoquímicas demostraron la presencia de taninos, flavonoides, terpenos, glicósidos cardenolídos y saponinas terpélicas. Las últimas, fueron aisladas como una mezcla de saponinas crudas y se observó que presentaban una IC_{50} de 14.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ frente a las células MDA-MB-231. La mortalidad en fibroblastos embrionarios de ratón a esta concentración se mantuvo por debajo del 20%, indicando selectividad por las células tumorales. La muerte celular inducida mostró un patrón de degradación del ADN y características morfológicas típicas de la apoptosis. Sin embargo, se requieren más estudios para aclarar el mecanismo de acción preciso inducido por la fracción de saponinas terpélicas obtenidas.

Palabras clave: cáncer de mama, triple negativo, *Solanum elaeagnifolium*, saponinas, apoptosis.

ABSTRACT In Mexico, there are at least 300 species of plants, grouped into 90 families, believed to have cancer-fighting properties. In certain members of the Solanaceae family, potential anticancer properties have been identified through *in vitro* studies. Therefore, this study focused on identifying biomolecules with antineoplastic activity in the ethanolic extract of the fruit of *Solanum elaeagnifolium*. The results showed that this extract exhibited cytotoxic activity against triple-negative breast cancer cells (MDA-MB-231). Additionally, phytochemicals such as tannins, flavonoids, terpenes, cardenolide glycosides, and terpenic saponins were identified. The terpenic saponins were isolated as a crude mixture and exhibited an IC_{50} of 14.5 $\mu\text{g}/\text{mL}$ against MDA-MB-231 cells. The mortality in mouse embryonic fibroblasts at this concentration remained below 20%, indicating selectivity for tumor cells. The induced cell death exhibited a pattern of DNA degradation and morphological features typical of apoptosis. However, further studies are needed to clarify the precise mechanism of action induced by the obtained terpenic saponin fraction.

Key words: breast cancer, triple negative, *Solanum elaeagnifolium*, saponins, apoptosis.

INTRODUCCIÓN

El cáncer es un grupo de enfermedades caracterizadas por la presencia de mutaciones genéticas que implican la sustitución, adición o delección de nucleótidos, y que afectan el ciclo y muerte celular (Matlashewski *et al.*, 1984; Shtivelman, Lifshitz, Gale, & Canaani, 1985). Según datos de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), el cáncer es la segunda causa de muerte en la población americana. En 2018, se diagnosticaron 3,8 millones de nuevos casos y se registraron 1,4 millones de muertes por estas enfermedades. Los cánceres más comunes en los hombres son el de próstata (21,7%), pulmón (11,5%) y colorrectal (8,0%), mientras que en las mujeres el más prevalente es el de mama (25,2%), seguido del de pulmón (8,5%) y colorrectal (8,2%) (Bray *et al.*, 2024). En México, el cáncer de mama tiene la mayor incidencia y se encuentra entre los más mortales, superado solo por el cáncer de piel no melanoma y el de próstata (Beltran-Ontiveros *et al.*, 2024).

Los tratamientos para el cáncer de mama incluyen cirugías parciales, radicales y totales, así como el uso de quimioterapia y radioterapia. Uno de los principales inconvenientes de los tratamientos actuales es su baja selectividad, lo que provoca efectos adversos en los pacientes que afectan su calidad de vida (Kerr *et al.*, 2022; Waks & Winer, 2019). Por ello, diversas investigaciones se han enfocado en encontrar moléculas con mayor especificidad, siendo las plantas las fuentes más exploradas debido a la diversidad de compuestos que integran su metaboloma y a la facilidad de extracción (Calderón-Montaño *et al.*, 2021; Jiménez-González *et al.*, 2023). México cuenta con alrededor de 5,000 plantas medicinales, de las cuales se cree que 300 especies tienen propiedades anticancerígenas (Alonso-Castro *et al.*, 2011; Cruz-Pérez *et al.*, 2021).

Las solanáceas del género *Solanum* han cobrado gran importancia farmacológica debido a las propiedades antineoplásicas de sus terpenos, alcaloides, aceites esenciales e incluso proteínas (Aguilar-Santamaría *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2008; Yao *et al.*, 2013). *S. elaeagnifolium* es un miembro de la familia Solanaceae en el cual se han encontrado altas concentraciones de glicoalcaloides pertenecientes a la clasificación de alcaloides esteroideos, siendo la α-solanina y la solanidina los más reportados (Delbrouck *et al.*, 2023; Hawas *et al.*, 2013; Sammani, Shammaa, & Chehna, 2013). La α-solanina estimula receptores específicos en las mitocondrias celulares, activando la producción del gen supresor BAX e inhibiendo la expresión de Bcl-2, una proteína antiapoptótica. A través de estos procesos de regulación de la expresión de diferentes marcadores apoptóticos, la α-solanina induce apoptosis en líneas celulares de cáncer de mama (Mohsenikia *et al.*, 2013).

Otros compuestos identificados en el extracto metanólico del fruto de *S. elaeagnifolium* son el ácido quínico, el ácido clorogénico y el ácido dicafeoilquínico, los dos últimos considerados compuestos fenólicos. Este extracto mostró un efecto citotóxico sobre células HeLa (cáncer de cuello uterino) y MCF-7 (cáncer de mama), sin presentar efectos tóxicos sobre las células Vero (derivadas del riñón de un mono verde africano) usadas como control de células sanas. Por ello, se consideró que el extracto presentaba un efecto selectivo sobre líneas celulares tumorales (Hernández O. *et al.*, 2017).

Todo esto presenta a *S. elaeagnifolium* como una fuente potencial de moléculas con actividad anticancerígena. Por esta razón, en el presente trabajo se evaluó el efecto citotóxico del extracto etanólico y de la fracción de saponinas terpélicas aisladas del fruto de *S. elaeagnifolium* en un modelo de células de cáncer de mama triple negativo, MDA-MB-231.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y extracción

La recolección de ejemplares de *S. elaeagnifolium* Cav. (Solanaceae) se llevó a cabo entre agosto y octubre de 2016, enfocándose en aquellas plantas cuyos frutos presentaban un color amarillo verdoso. Las muestras fueron recolectadas en una zona de Ciudad Juárez, Chihuahua, México, ubicada en las coordenadas 31°36'21.8"N 106°22'59.9"W. El ejemplar fue identificado por la Dra. Coyolxauhqui Figueroa-Batalla, registrado con el numero #2602 y depositado en el herbario del Instituto de Ciencias Biomédicas de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua,

Méjico. Las muestras fueron tratadas con hipoclorito de sodio al 1% y agua destilada; posteriormente, se llevó a cabo un proceso de secado a 45°C seguido de pulverización mecánica. La extracción se realizó a partir de 10 g de muestra de fruto que se procesaron por extracción fraccionada en un equipo Soxhlet, con ciclos de reflujo de 4 horas y utilizando como solventes hexano, acetato de etilo y etanol. Para concentrar los productos de extracción, se utilizó un equipo Büchi Rotavapor R-114 a 45°C y 49 cm Hg de presión.

Pruebas Fitoquímicas preliminares

El extracto etanólico seco obtenido se resuspendió en una solución de etanol al 30% en agua. Posteriormente, esta solución se sometió a pruebas fitoquímicas para la detección de metabolitos secundarios como alcaloides, fenoles, terpenos, glucósidos cardenólidos y saponinas.

Identificación de alcaloides

El proceso de identificación se inició colocando 0.5 mL del extracto en un tubo de ensayo, para posteriormente agregar 2 mL de HCl al 5%. Luego de su homogeneización, se agregaron 2 gotas de reactivo de Dragendorff (solución a: 40% de nitrato de bismuto en 20 mL de ácido nítrico al 30% en agua + solución b: 50 mL de yoduro de potasio al 54.4% en agua). La formación de un precipitado de color naranja a rojo indica la presencia de alcaloides.

Identificación de compuestos fenólicos

Prueba de acetato de plomo para taninos. En un tubo de ensayo se agregaron 5 mL del extracto y cuatro gotas de acetato de plomo al 1%; un precipitado amarillo indica la presencia de taninos. Prueba de alcalinización de flavonoïdes. La prueba consistió en colocar en un tubo de ensayo 1 mL del extracto y 5 gotas de hidróxido de sodio al 50%; la reacción es positiva si aparece un color amarillo intenso que desaparece cuando se añaden 5 gotas de HCl.

Identificación de glicósidos cardenólidos

La prueba legal para los glucósidos cardenólidos. Se colocaron 2 mL del extracto y 0.5 mL de HCl concentrado en un tubo de ensayo, la mezcla se incubó durante 4 h; posteriormente se añadió 1 mL de piridina y cuatro gotas de nitroprusiato de sodio. Luego, se alcalinizó la solución con hidróxido de sodio, la aparición de un color rosado a rojo indica una prueba positiva.

Identificación de saponinas

Prueba de espuma. Se colocaron 3 mL del extracto en un tubo de ensayo y se agitó vigorosamente durante 2 min; una espuma 1 cm de altura y estable durante al menos 1 hora es indicativa de una prueba positiva.

Prueba de Rosenthaler. Para la identificación de las saponinas se colocaron 5 mL del extracto en un tubo de ensayo de vidrio al que se le agregó 1 mL de vainillina al 1% en etanol. Luego, se agregó 1 mL de ácido sulfúrico concentrado. La formación de un anillo violeta se consideró como positivo.

Efecto hemolítico. La prueba de realizó utilizando una suspensión de sangre humana entera al 1% en tampón salino de fosfato (PBS 1 X; NaCl al 0.8%, KCl al 0.02%, Na₂HPO₄ al 0.114%, KH₂PO₄ al 0.02%). Las muestras se analizaron combinando 490 µL de la suspensión de sangre con diluciones de los extractos. Se utilizó dodecilsulfato de sodio (SDS) como control positivo para la hemólisis a una concentración final de 10 µg/mL y PBS como control negativo. Las muestras se incubaron a 37°C durante 24 h. El efecto hemolítico se observó con la aparición de color rojo en la suspensión.

Identificación de esteroides y terpenos

Los terpenos se identificaron mediante la prueba de Liebermann-Burchard. Para ello, se colocaron 5 mL del extracto en un tubo de ensayo de vidrio, al que se le añadió lentamente y a lo largo de las paredes, 1 mL de cloroformo, seguido de 1 mL de anhídrido acético y 2 mL de ácido sulfúrico concentrado. La aparición de un anillo rojo-violeta se consideró un resultado positivo. Para identificar los esteroides, se modificaron las proporciones y se colocaron 1 mL del extracto

en un tubo de ensayo junto con 10 mL de cloroformo, seguido de 1 mL de anhídrido acético y un volumen igual de ácido sulfúrico. En este caso, la capa superior se tornará roja y la capa de ácido sulfúrico mostrará un color amarillo-verde fluorescente si hay esteroides presentes.

Obtención de fracción de saponinas terpélicas

Las saponinas fueron concentradas utilizando 1 g de extracto etanólico (EtOH) diluido en 10 mL de una mezcla de etanol-agua, en una proporción de 1:3. La solución fue lavada con n-butanol, recuperado para concentrarlo. El producto obtenido se diluyó en 10 mL de etanol-agua (1:3) y se lavó al menos dos veces con 10 mL de éter etílico. La fase acuosa fue recuperada y se concentró con ayuda de un concentrador Eppendorf® modelo 5301. La masa de la fracción de saponinas terpélicas obtenidas (Esapo) se calculó por diferencia de peso.

Líneas y cultivo celulares

La línea celular de cáncer de mama humano (MDA-MB-231) y los fibroblastos de ratón (3T3) se obtuvieron de la Colección Americana de Cultivos Tipo (ATCC, Manassas, VA, EE. UU.). Las líneas celulares se nutrieron con medio Eagle modificado por Dulbecco (DMEM), suplementado con suero fetal bovino al 10% y al 1% de una solución de 10,000 unidades de penicilina, 10 mg de estreptomicina y 25 µg de anfotericina por mL (Sigma-Aldrich®, A5955). La incubación de las células se realizó bajo condiciones de cultivo, a 37 °C, con 5% de CO₂ y una humedad relativa del 50%.

Ensayo citotóxico

Las líneas celulares se sembraron en una placa de 96 pocillos a una densidad de 5,000 células por pocillo. El extracto etanólico y la fracción de saponinas se disolvieron en medio de cultivo a concentraciones que variaron entre 1 y 80 µg/mL, y se incubaron durante 24, 48 y 72 horas en condiciones de cultivo. Despues de la incubación, se añadieron 20 µL de solución de MTT (5 mg/mL; Sigma-Aldrich®, M2128) por pozo y se incubaron durante 1 hora más. Luego, el líquido de cada pocillo fue decantado, y se añadieron 100 µL de DMSO a cada uno. A continuación, se agitaron los pocillos durante 1 minuto a 100 rpm. La absorbancia de las muestras se leyó a 570 nm utilizando el lector de microplacas Benchmark Plus™ de BioRAD. Cada concentración fue evaluada en 9 réplicas.

Cambios morfológicos inducidos por muerte celular

En una caja de cultivo de 6 pocillos, se sembraron 50 mil células MDA-MB-231 por pozo y se incubaron durante 96 h en condiciones de cultivo. Pasado este tiempo, las células se trataron con el CI₅₀ de extracto etanólico de *S. elaeagnifolium* (14.33 µg/mL) y CI₅₀ de saponinas (14.5 µg/mL). El control negativo fueron células no expuestas a ningún extracto. El ensayo se llevó a cabo con una incubación durante 24, 48 y 72 h, en condiciones de cultivo. Transcurrido el tiempo, se eliminó cuidadosamente el medio y se realizaron dos lavados con PBS 1X para eliminar las células no adherentes. A continuación, las células se fijaron con Spray Fix disquim® (laca de polietilenglicol y polivinilpirrolidona, PVP, en medio alcoholico). Posteriormente, se añadió a los pozos 1 mL de azul de anilina al 1% y se dejó actuar durante 30 min, transcurrido el tiempo se eliminaron los residuos de colorante. Luego, se realizó el destañido utilizando ácido acético al 0.05%, lavando en 3 ocasiones. Finalmente, las muestras se secaron y se realizó su observación en un microscopio óptico invertido.

Fragmentación del ADN

El ensayo comenzó con 1,000,000 de células tumorales sembradas en placas de 25 cm², incubadas en condiciones de cultivo durante 24 h. Posteriormente, se trataron con 14.5 µg/mL de la fracción de saponinas y se incubaron durante 24 h más. El control positivo para la necrosis fueron células llevadas a ebullición en agua y el control positivo para la apoptosis fueron células tratadas con Taxol® a 0.25 µg/mL. Cuando finalizó la incubación, se recuperaron las células flotantes y adheridas por centrifugación a 2,500 rpm por 5 min. Luego, los sedimentos se trataron con 100 µL de tampón de lisis (Tris-HCL 1 mM, EDTA 10 mM y SDS al 0.5%; pH 8) durante 10 minutos a 4°C, las muestras se centrifugaron a 10,000 rpm durante 30 minutos y la solución acuosa fue

recuperada. Enseguida, se agregaron 5 µL de proteinasa K (20 mg/mL) y se incubaron durante 1 h. Cuando terminó este tiempo se agregaron 20 µL de cloruro de sodio 5 M y 120 µL de isopropanol frío y se incubaron toda la noche a 4°C. Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas a 10,000 rpm durante 30 min y el precipitado fue resuspendido en 30 µL de tampón TE (Tris-HCL 10 mM y EDTA 1 mM a pH 8,0). Finalmente, el ADN fue cuantificado y evaluado mediante análisis de electroforesis, se utilizaron 2,500 ng de ADN por muestra y el corrimiento electroforético se realizó en un gel de agarosa al 1.8%.

Análisis estadístico de los datos

El análisis estadístico para evaluar el efecto de las diferentes concentraciones de extractos y los tiempos de incubación se llevó a cabo mediante un análisis de varianza de dos vías (ANOVA) con un nivel de significancia de $p<0.01$. Se realizaron comparaciones múltiples utilizando las pruebas de Tukey y Dunnett, con un nivel de significancia de $p<0.05$. Las CI_{50} se calcularon mediante un análisis de regresión no lineal, considerando los valores de las 9 réplicas de cada tratamiento. La comparación del efecto de la CI_{50} de Esapo en los tiempos de incubación de 24, 48 y 72 horas se realizó mediante la prueba *t-student*, con un nivel de significancia de $p<0.05$. Los datos se presentan en el gráfico acompañados de su desviación estándar. El análisis de los datos y la elaboración de los gráficos se realizaron con el programa GraphPad Prism versión 6.0.

RESULTADOS

Identificación de metabolitos

El extracto etanólico del fruto de *S. elaeagnifolium*, previamente obtenido mediante extracción fraccionada, mostró actividad positiva para fenoles, taninos, terpenos, glicósidos cardenólidos y saponinas (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la identificación de metabolitos secundarios del extracto de fruto de *S. elaeagnifolium*.

Table 1. Results of the identification of secondary metabolites of the *S. elaeagnifolium* fruit extract.

| Ensayo | Metabolito identificado | Observación |
|------------------------------|-------------------------|---------------------|
| Dragendorff | Alcaloides | Negativo |
| Alcalinización | Compuestos fenólicos | Positivo |
| Acetato de plomo | Taninos | Positivo |
| Liberman-Burchard | Esteroides/Terpenos | Positivo a terpenos |
| Prueba Legal | Glicósidos cardenólidos | Positivo |
| Prueba de espuma/Rosenthaler | Saponinas | Positivo |

Potencial citotóxico de los metabolitos de *S. elaeagnifolium*

En primer lugar, se probaron concentraciones en un intervalo entre 5 y 250 µg/mL de EetOH sobre células cancerosas de mama triple negativas MDA-MB-231. Esto se hizo para seleccionar las concentraciones citotóxicas óptimas, además de conocer su comportamiento a diferentes tiempos de incubación. Después de exponer a las células con diferentes concentraciones de extracto y en diferentes tiempos de incubación, se tomaron fotografías para observar la estabilidad del monocapa celular. En la Figura 1 se observa que las células no expuestas (control) incrementan su confluencia a medida que aumenta el tiempo de incubación, llegando a formar una monocapa al cabo de 72 h de incubación. Por otro lado, se observa que las concentraciones de EetOH utilizadas inducen una menor cantidad de células en comparación con el control. A partir de 100 µg/mL, se nota un marcado impedimento en la formación de la monocapa, y las células muestran una pérdida de la morfología epitelial, adoptando una forma redondeada.

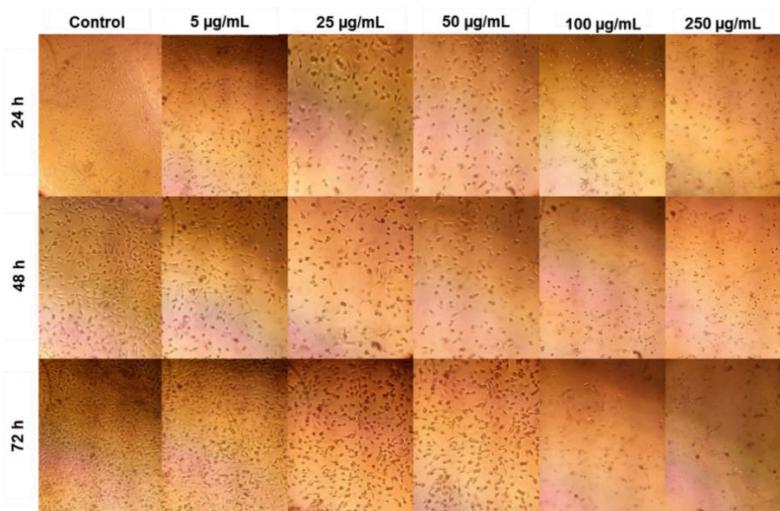


Figura 1. Evaluación del efecto de EetOH sobre la inhibición de la formación de monocapa de células MDA-MB-21 tratadas con concentraciones de 5 a 250 µg/mL con incubación de 24, 48 y 72 h.

Figure 1. Evaluation of the effect of EetOH on the inhibition of monolayer formation of MDA-MB-21 cells treated with concentrations of 5 to 250 µg/mL with incubation of 24, 48 and 72 h.

Con base en los resultados mostrados anteriormente, se decidió evaluar el efecto de concentraciones inferiores a 100 µg/mL sobre células MDA-MB-231, ajustándose a un intervalo entre 5 y 80 µg/mL con incubaciones de 24, 48 y 72 h. Los análisis de comparaciones múltiples indican que para el EetOH todas las concentraciones presentan un incremento significativo en el valor de la mortalidad con respecto al control. Los resultados indican que, en los diferentes tiempos de incubación, a las concentraciones de 5 y 10 µg/mL las células presentan una mortalidad inferior al 38%, mientras que con 20 µg/mL aumenta a más del 60% durante los 3 días. En concentraciones que oscilan entre 40 y 80 µg/mL, la muerte es superior al 80% para todos (Figura 2A). La CI₅₀ se calculó en un valor de 14.3 µg/mL para las 24 h de exposición. El Esapo se evaluó a concentraciones de 1, 5, 10, 20, 40 y 80 µg/mL. En esta fracción de saponinas se identificó que todas las concentraciones indujeron valores significativos de mortandad a los 3 tiempos de incubación, con respecto al control. La concentración de 20 µg/mL indujo la muerte de más del 60% de las células MDA-MB 231 en los tres tiempos de incubación. En el caso de 40 y 80 µg/mL se logró una tasa de mortalidad superior al 80% (Figura 2B). La CI₅₀ calculada para este caso fue de 14.5 µg/mL. Esta concentración se utilizó para evaluar el efecto de las saponinas en células sanas; el modelo utilizado fue la línea celular de fibroblastos embrionarios de ratón 3T3. En estas células se observó que a las 24 h la muerte celular fue del 19% (Figura 2C) y se mantuvo sin cambios significativos hasta las 72 h. Esto significa que la fracción de saponinas terpélicas muestran selectividad por las células tumorales.

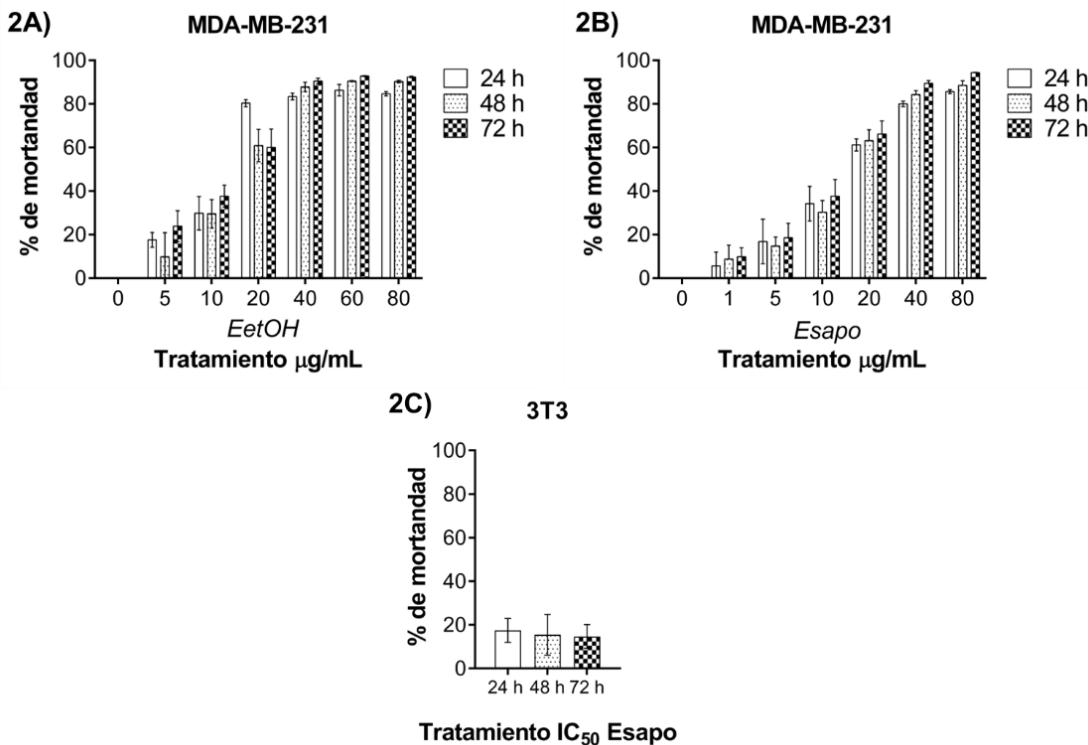


Figura 2. Citotoxicidad inducida por el extracto etanólico (2A) y saponinas (2B) del obtenido fruto de *S. elaeagnifolium* sobre células MDA-MB-21 de cáncer de mama. Efecto de la concentración de 14.5 $\mu\text{g/mL}$ saponinas de *S. elaeagnifolium* sobre fibroblastos de ratón 3T3 a 24, 48 y 72 h (2C).

Figure 2. Cytotoxicity induced by the ethanolic extract (2A) and saponins (2B) of the fruit obtained from *S. elaeagnifolium* on MDA-MB-21 breast cancer cells. Effect of the concentration of 14.5 $\mu\text{g/mL}$ saponins from *S. elaeagnifolium* on 3T3 mouse fibroblasts at 24, 48 and 72 h (2C).

Análisis morfológico

La evaluación morfológica reveló que las células MDA-MB-231 no expuestas a los extractos se observan alargadas, con un núcleo único e integral y un citoplasma abundante. También se pueden apreciar las interacciones célula-célula y célula-matriz extracelular (Figura 3). La exposición a EetOH indujo cambios a partir de tiempos cortos, por lo que las incubaciones se dieron a las 4 y 8 h, con un seguimiento hasta las 48 h. En todos los tiempos de incubación se identifican células con condensación de cromatina de diferentes tipos, como las de tipo arriñonado o algunas que se asemejan a un núcleo gigantesco. Por otro lado, se observaron cambios en la forma de la membrana plasmática con células parecidas a palomitas de maíz, debido a invaginaciones membranales presentadas. También se observan células con núcleos en ebullición, que se asemejan al burbujeo provocado en un líquido por la acción de la temperatura. Además, se aprecian burbujas citoplasmáticas en el centro de las células y entre los fragmentos de membrana (Figura 3) (Cairrao & Domingos, 2010; Chaabane *et al.*, 2013).

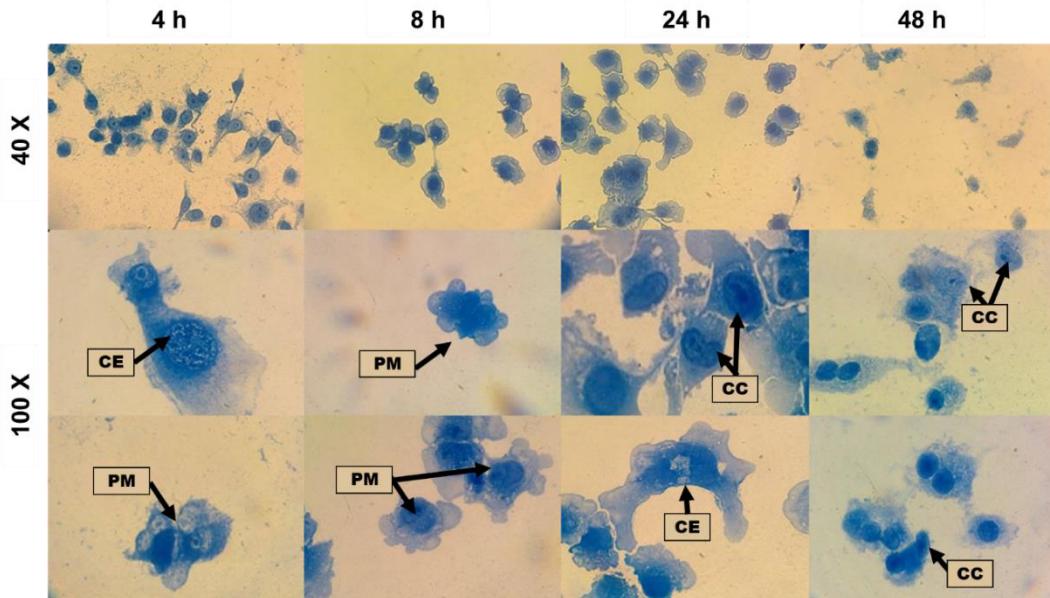


Figura 3. Análisis morfológico de células de cáncer de mama MDA-MB-231 tratadas con IC_{50} de EetOH a 24, 48 y 72 h. (PM) Células con forma de palomita de maíz, (CC) Células con condensación de la cromatina y (CE) Células en ebullición.

Figure 3. Morphological analysis of MDA-MB-231 breast cancer cells treated with IC_{50} of EetOH at 24, 48 and 72 h. (PM) Popcorn-shaped cells, (CC) Cells with chromatin condensation and (CE) Boiling cells.

En el caso de Esapo los principales cambios morfológicos aparecieron después de las 24 h. La morfología presentada fue similar a la inducida por EetOH. Los cambios morfológicos más comunes fueron la condensación de la cromatina en forma de media luna, la presencia de cuerpos apoptóticos y algunas células presentaron estallamiento, algo común de la necrosis (Figura 4) (Yeung *et al.*, 1999).

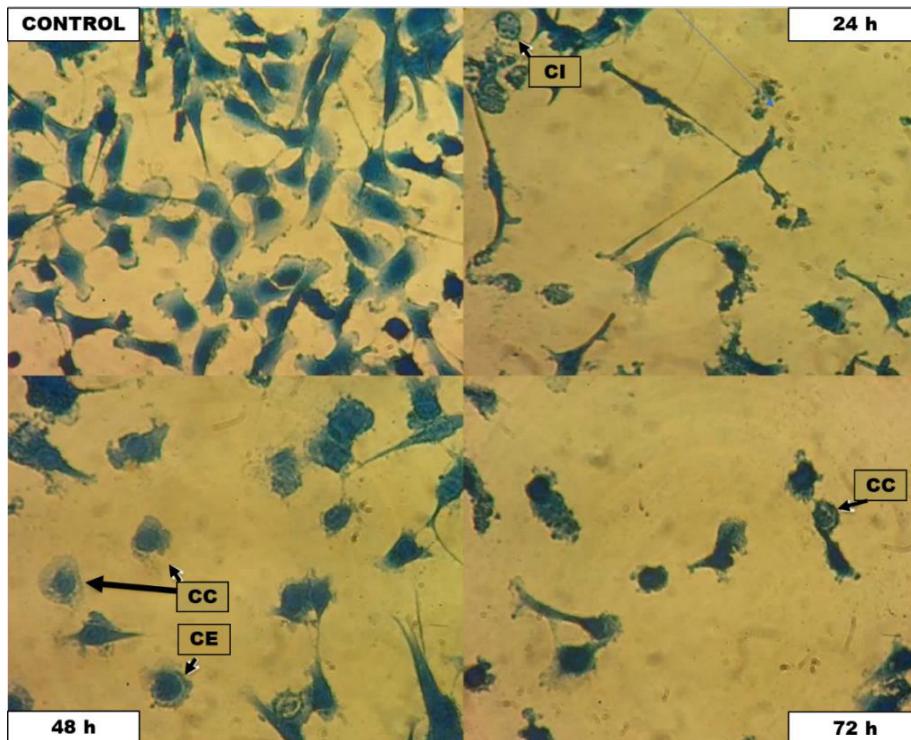


Figura 4. Análisis morfológico de células de cáncer de mama MDA-MB-231 tratadas con CI₅₀ de EetOH a 24, 48 y 72 h. (CC) Células con condensación de la cromatina, (CI) Células con invaginaciones membranales y (CE) Células en ebullición.

Figure 4. Morphological analysis of MDA-MB-231 breast cancer cells treated with IC₅₀ of EetOH at 24, 48 and 72 h. (CC) Cells with chromatin condensation, (CI) Cells with membrane invaginations and (CE) Boiling cells.

Evaluación del patrón de fragmentación del ADN

El carril 2 del gel de agarosa al 1.8% (Figura 5) se presenta ADN extraído de las células control donde, aunque se aprecia la ligera aparición de bandas referentes a la fragmentación del ADN, la más abundante es la del ADN integral localizado en la parte superior. En el carril 3 se colocó ADN de células tratadas con ebullición, donde se puede observar una fragmentación no específica que es típica de una célula que murió por necrosis. En los carriles 4 y 5 se cargó ADN de células expuestas a Taxol durante 24 y 48 h; este fármaco provoca la inhibición de la proliferación y muerte celular por apoptosis (Yeung et al., 1999); por lo tanto, las bandas observadas a 200, 400 y 600 pb son características de la escisión del ADN generada por la activación de las endonucleasas (Huang et al., 2010). En los carriles 6 y 7 se observa el patrón de fragmentación del ADN obtenido de células expuestas a la CI₅₀ de Esapo con tiempos de incubación de 24 y 48 h. En los carriles 8 y 9, el ADN de las células expuesto a una concentración de 30 µg/mL Esapo con incubaciones de 24 y 48 h. En ambos casos el patrón de fragmentación es idéntico al presentado por el taxol. Las bandas observadas a 700 y a 1500 pb corresponden a ARN ribosómico.

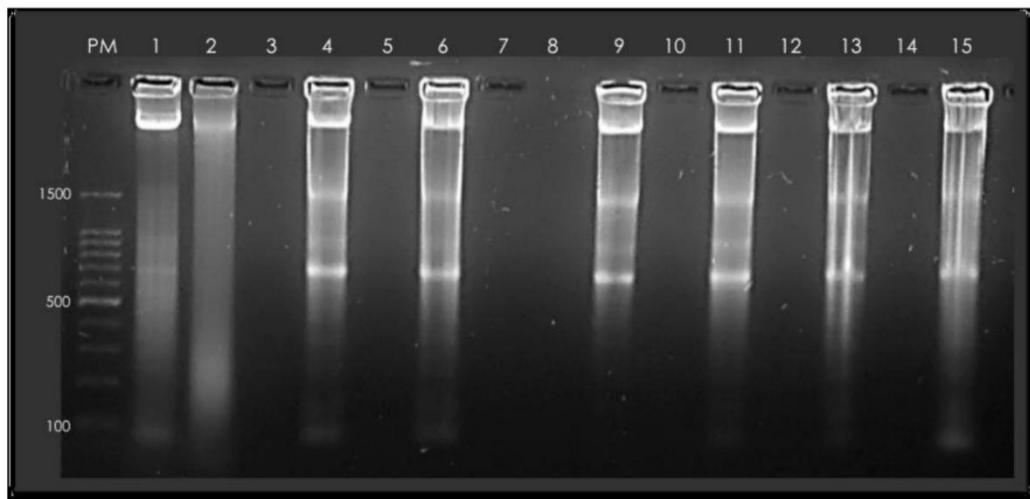


Figura 5. Perfil de fragmentación del ADN extraído de células MDA-MB-231. PM) marcador de peso molecular de 100 a 1000 pb, 1) células control, 2) células necróticas, 4) y 6) células expuestas a 0,25 µg/mL de taxol durante 24 y 48 h respectivamente, 9) y 11) células expuestas a 15 µg/mL de Esapo durante 24 y 48 h respectivamente, 13) y 15) células expuestas a 30 µg/mL de Esapo durante 24 y 48 h.

Figure 5. Fragmentation profile of DNA extracted from MDA-MB-231 cells. PM) molecular weight marker from 100 to 1000 bp, 1) control cells, 2) necrotic cells, 4) and 6) cells exposed to 0.25 µg/mL of taxol for 24 and 48 h respectively, 9) and 11) cells exposed to 15 µg/mL of Esapo for 24 and 48 h respectively, 13) and 15) cells exposed to 30 µg/mL of Esapo for 24 and 48 h.

DISCUSIÓN

En EetOH se pudo identificar la presencia de compuestos fenólicos y glucósidos, como las saponinas que son heterósidos cuyas geninas pueden ser esteroides (neutrales) o triterpenoides (ácidas). Una forma de identificar el tipo de saponina es la prueba de Liebermann-Burchard, que en esta investigación mostro un resultado positivo. Esto permite inferir la presencia de saponinas triterpénicas; lo cual concuerda con el hecho de que las plantas superiores pertenecientes a la clase de las dicotiledóneas son una rica fuente de saponinas triterpénicas (saponósidos); grupo al que pertenece la familia Solanaceae (Delporte, 2010; Huang, Syu, & Lin, 2010). Sin embargo, anteriormente no se ha identificado este tipo de moléculas en *S. elaeagnifolium*. Al comparar lo identificado en EetOH con lo reportado en diferentes frutos de otras especies del género *Solanum*, se identifica que contienen principalmente compuestos fenólicos cumarínicos, lactonas sesquiterpénicas, glucósidos y terpenos. En algunos casos solo difieren en la presencia de los alcaloides, un ejemplo de esto es el extracto acuoso de *S. aethiopicum* L. y los extractos metanólicos de *S. incanum* (Chinedu *et al.*, 2011; Sambo *et al.*, 2016). Específicamente, en *S. elaeagnifolium*, un informe donde se realizó el fraccionamiento dirigido de un extracto de su fruta, se logró la identificación de moléculas como lactonas sesquiterpénicas, alcaloides y cumarinas (Hernández O. *et al.*, 2017). Contrariamente, en el presente trabajo la identificación de los alcaloides no se logró mediante pruebas fitoquímicas, esto puede deberse a que sus concentraciones son muy bajas y por lo tanto no fueron perceptibles en la reacción. Sin embargo, el dato concordante es la presencia de compuestos fenólicos, ya que previamente se ha podido identificar al ácido quínico, ácido clorogénico y ácido dicafeoilquínico en extractos metanólicos de *S. elaeagnifolium*. En otro estudio realizado con extractos de diferentes solventes realizados con semillas de *S. elaeagnifolium*, el extracto metanólico presentó mayor rendimiento, demostrando que las semillas son ricas en compuestos polares; esto fue confirmado por la presencia predominante de saponinas y taninos (Feki *et al.*, 2014). En la presente investigación, los análisis fitoquímicos demostraron que las saponinas identificadas en los frutos corresponden a saponinas triterpénicas. Este informe es el primero en mostrar la presencia de este tipo de

saponinas en la planta *S. elaeagnifolium*, según nuestra revisión de la literatura, ya que estudios previos solo habían evidenciado aquellas de tipo esteroide y de tipo alcaloide esterooidal.

Estudios realizados en *S. nigrum*, demostraron que el extracto etanólico de su fruto maduro presenta una tasa de mortalidad del 70% a una concentración de 50 µg/mL sobre células de cáncer de mama (MCF-7), después de 12 h de incubación (Son *et al.*, 2003). Mientras que los extractos etanólicos del fruto verde de esta planta presentaron valores de CI_{50} de 12.66, 16.6 y 47 µg/mL en las células MCF-7 de cáncer de mama, HepG2 de cáncer de hígado y T47D de cáncer mamario, respectivamente (Anindyajati *et al.*, 2010; El-Hawary *et al.*, 2015). Por otro lado, un extracto metanólico de dicho fruto presentó efecto citotóxico sobre una línea celular de cáncer de cuello uterino (HeLa) y de riñón de mono verde (Vero), con valores de CI_{50} de 10 y 0.0196 mg/mL respectivamente (Patel *et al.*, 2009). Esto permite apreciar que la CI_{50} de Esapo (14.3 µg/mL) en la línea de cáncer de mama MDA-MB-231, es muy similar a la reportada para *S. nigrum* contra la línea MCF-7.

En un trabajo de fraccionamiento del extracto metánolico del fruto de *S. elaeagnifolium* mediante cromatografía líquida al vacío, una de las fracciones obtenidas (F VLC7) mostró actividad citotóxica contra las líneas tumorales MCF-7, HeLa y células Vero. El tratamiento con 100 µg/mL, redujo la viabilidad en un 39, 15 y 66% para las células Vero, HeLa y MCF-7, respectivamente. En este caso, F VLC7 evidenció la presencia de ácido quínico, ácido clorogénico, ácido dicafeoilquínico y un alcaloide, a los cuales se les atribuyó la actividad biológica evaluada (Hernández *et al.*, 2017). Las diferencias entre el efecto y las concentraciones utilizadas en los ejemplos mencionados anteriormente pueden sugerir que, al aislar parcial o totalmente los metabolitos secundarios presentes en un extracto se pueden perder algunas interacciones farmacológicas. Es decir, puede ser que las moléculas presentes en los extractos totales presenten un efecto sinérgico que se pierde al fraccionarlos (Caesar & Cech, 2019).

Los reportes de saponinas en plantas del género *Solanum* como *S. elaeagnifolium*, *S. nigrum* y *S. villosum* indican solo la presencia de saponinas de tipo esteroidal y alcaloide esteroideo(Sammami *et al.*, 2013). Sin embargo, también se ha reportado que plantas como *S. melongena* y *S. lycompersicum* poseen la estructura enzimática para la biosíntesis de lupeol, α-amirina y β-amirina que corresponde a las bases agliconas de saponinas triterpenicas (Kwon *et al.*, 2015; Yasumoto *et al.*, 2017). Esta información podría dar sustento a hecho de haber identificado saponinas terpélicas en esta investigación. En cuanto a saponinas esteroideas de solanáceas, se ha identificado que las saponinas contenidas en las hojas de *S. trilobatum* inhiben el crecimiento de células Hep-2 del carcinoma epitelial a una CI_{50} de 1,000 µg/mL mediante la activación de la apoptosis (Kanchana & Balakrishnan, 2011). Mientras que la solasodina aislada de frutos inmaduros de *S. xanthocarpum* mostró actividad citotóxica contra células HeLa con una CI_{50} de 12.7 µg/mL e inhibió el 94.96% del crecimiento de la línea celular de leucemia mieloide humana U937 a 40 µg/mL (Bhattacharya *et al.*, 2013). En este trabajo la concentración utilizada de Esapo (14.5 µg/mL) fue menor de las que se han utilizado para otros concentrados de moléculas, por lo cual consideramos que presenta potencial como tratamiento contra el cáncer.

CONCLUSIONES

La presencia de metabolitos secundarios en el extracto etanólico (EetOH) es diversa. En esta ocasión, se identificaron compuestos fenólicos, taninos, esteroides, terpenos, glicósidos cardenólidos y saponinas terpélicas. El extracto etanólico mostró un efecto citotóxico sobre las células de cáncer de mama, presentando una CI_{50} de 14.33 µg/mL. Por otro lado, Esapo provocó la muerte de las células MDA-MB-231 hasta en un 80% con una concentración inhibidora media de 14.5 µg/mL. Al aplicar esta concentración sobre fibroblastos embrionarios de ratón, solo se indujo un 20% de mortalidad, lo cual evidencia su selectividad. Las CI_{50} calculadas para el EetOH y el Esapo prácticamente no presentan variación, pero hay que considerar que los procesos de purificación pueden impedir las interacciones farmacológicas sinérgicas que pueden presentar diferentes moléculas en un extracto total.

Además, en las células MDA-MB-231, ambos extractos produjeron la formación de cuerpos burbujeantes a nivel citoplasmático, invaginaciones de membrana, condensación de cromatina y

fragmentación del núcleo. Aún es necesario realizar más estudios para determinar el tipo de saponinas presentes en dicho extracto y el mecanismo bajo el cual actúan. Sin embargo, el presente trabajo abre un campo de investigación para buscar nuevos posibles tratamientos contra el cáncer de mama a partir del fruto de *S. elaeagnifolium*.

LITERATURA CITADA

- Anindyajati, A., Sarmoko, S., Putri, D. D. P., Hermawan, A., & Meiyanto, E. (2010). Combination of *Solanum nigrum* L. Herb Ethanolic Extract and Doxorubicin Performs Synergism on T47D Breast Cancer Cells. *Indonesian Journal of Cancer Chemoprevention*, 1(2), 78.
<https://doi.org/10.14499/indonesianjcanchemoprev1iss2pp78-84>
- Bhattacharya, S., Kohli, S., & Chaudhary, A. S. (2013). Isolation of Solasodine from the Unripe Fruits of *Solanum xanthocarpum* Schrad and Wendl. (Solanaceae) and it's Anti Cancer Activity. *Austral - Asian Journal of Cancer*, 12(3), 199–213.
- Caesar, L. K., & Cech, N. B. (2019). Synergy and antagonism in natural products extract: when 1 +1 does not equal 2. *Nat Prod Rep.*, 36(6), 869–888.
<https://doi.org/10.1039/c9np00011a.Synergy>
- Cairrao, F., & Domingos, P. M. (2010). Apoptosis : Molecular Mechanisms Apoptosis : Molecular Mechanisms. *Encyclopedia of Life Sciences*, January, 1–8.
<https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0001150.pub2>
- Chaabane, W., User, S. D., El-Gazzah, M., Jaksik, R., Sajjadi, E., Rzeszowska-Wolny, J., & Łos, M. J. (2013). Autophagy, apoptosis, mitoptosis and necrosis: Interdependence between those pathways and effects on cancer. *Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis*, 61(1), 43–58. <https://doi.org/10.1007/s00005-012-0205-y>
- Chinedu, S. N., Olasumbo, A. C., Eboji, O. K., Emiloju, O. C., Olajumoke, K., & Dania, D. I. (2011). Proximate and Phytochemical Analyses of *Solanum aethiopicum* L. and *Solanum macrocarpon* L. Fruits. *Research Journal of Chemical Sciences*, 1(3), 63–71.
- El-Hawary, S. S., Mohammed, R., Zid, S. F. A., Rateb, M. E., Sayed, A. M., & Abouzid, S. F. (2015). Cytotoxicity of *Solanum nigrum* L green fruits on breast (MCF-7) and liver (HepG-2) cancer cell lines. ~ 87 ~ *The Pharma Innovation Journal*, 3(11), 87–89.
- Feki, H., Koubaa, I., & Damak, M. (2014). Secondary metabolites and antioxidant activity of seed extracts from *Solanum elaeagnifolium* Cav. *Mediterranean Journal of Chemistry*, 2(5), 639–647. <https://doi.org/10.13171/mjc.2.5.2014.05.01.22>
- Hernández O., L., Carranza R., P., Cobos P., L. E., López L., L. I., Ascasio V., J. A., & Silva Belmares, S. Y. (2017). Bioguided fractionation from *Solanum elaeagnifolium* to evaluate toxicity on cellular lines and breast tumor explants. *Vitae*, 24(2), 124–131. <https://doi.org/10.17533/udea.vitae.v24n2a05>
- Huang, H. C., Syu, K. Y., & Lin, J. K. (2010). Chemical composition of *Solanum nigrum* linn extract and induction of autophagy by leaf water extract and its major flavonoids in AU565 breast cancer cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(15), 8699–8708. <https://doi.org/10.1021/jf101003v>
- Kanchana, A., & Balakrishnan, M. (2011). Anti-cancer effect of saponins isolated from *Solanum trilobatum* leaf extract and induction of apoptosis in human larynx cancer cell lines. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(SUPPL. 4), 356–364.
- Kwon, H. H., Yoon, J. Y., Park, S. Y., Min, S., Kim, Y. Il, Park, J. Y., Lee, Y. S., Thiboutot, D. M., & Suh, D. H. (2015). Activity-guided purification identifies lupeol, a pentacyclic triterpene, as a therapeutic agent targeting multiple pathogenic factors of acne. *Journal of Investigative Dermatology*, 135(6), 1491–1500. <https://doi.org/10.1038/jid.2015.29>
- Patel, S., Gheewala, N., Suthar, A., & Shah, A. (2009). *In-vitro* cytotoxicity activity of *Solanum nigrum* extract against Hela cell line and Vero cell line. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 1(SUPPL. 1), 38–46.

Recibido:
4/junio/2024

Aceptado:
4/noviembre/2024

- Sammani, A., Shammaa, E., & Chehna, F. (2013). Qualitative and quantitative steroidal alkaloids of solanum species distributed widely in Syria by TLC and HPLC. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 23(2), 23–27.
- Son, Y. O., Kim, J., Lim, J. C., Chung, Y., Chung, G. H., & Lee, J. C. (2003). Ripe fruits of *Solanum nigrum* L. inhibits cell growth and induces apoptosis in MCF-7 cells. *Food and Chemical Toxicology*, 41(10), 1421–1428. [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(03\)00161-3](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(03)00161-3)
- Yasumoto, S., Seki, H., Shimizu, Y., Fukushima, E. O., & Muranaka, T. (2017). Functional characterization of CYP716 family P450 enzymes in triterpenoid biosynthesis in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 8(JANUARY). <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00021>
- Yeung, T. K., Germond, C., Chen, X., & Wang, Z. (1999). The Mode of Action of Taxol: Apoptosis at Low Concentration and Necrosis at High Concentration. *Biochemical and Biophysical Research*, 263, 398–404.

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

EFFECTO ANTIFÚNGICO DE EXTRACTOS ETANÓLICOS DE PLANTAS MEDICINALES DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA CONTRA *Phytophthora* sp. Y *Rhizoctonia* sp.

ANTIFUNGAL EFFECT OF THE ETANOLIC EXTRACTS FROM MEDICINAL PLANTS OF THE SIERRA NORTE DE PUEBLA AGAINST *Phytophthora* sp. AND *Rhizoctonia* sp.

Bernal Alzate, J., L.M. Hernández Loaiza, F.J. Camacho Martínez, K.A. Arroyo Guevara, L. Ortega-Hernández y J. Trocoli Carmona

EFECTO ANTIFÚNGICO DE EXTRACTOS ETANÓLICOS DE PLANTAS MEDICINALES DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA CONTRA *Phytophthora* sp. Y *Rhizoctonia* sp.

ANTIFUNGAL EFFECT OF THE ETANOLIC EXTRACTS FROM MEDICINAL PLANTS OF THE SIERRA NORTE DE PUEBLA AGAINST *Phytophthora* sp. AND *Rhizoctonia* sp.



Efecto antifúngico de extractos etanólicos de plantas medicinales de la Sierra Norte de Puebla contra *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp.

Antifungal effect of the etanolic extracts from medicinal plants of the Sierra Norte de Puebla against *Phytophthora* sp. and *Rhizoctonia* sp.

José Bernal Alzate, Luis Manuel Hernández Loaiza, Francisco Javier Camacho Martínez, Karla Arroyo Guevara, Laura Ortega-Hernández, Juana Trocoli Carmona

EFFECTO ANTIFÚNGICO DE EXTRACTOS ETANÓLICOS DE PLANTAS MEDICINALES DE LA SIERRA NORTE DE PUEBLA CONTRA *Phytophthora* sp. Y *Rhizoctonia* sp.

ANTIFUNGAL EFFECT OF THE ETANOLIC EXTRACTS FROM MEDICINAL PLANTS OF THE SIERRA NORTE DE PUEBLA AGAINST *Phytophthora* sp. AND *Rhizoctonia* sp.

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 251-260. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.16

José Bernal-Alzate. Autor de correspondencia: Claudio.bernal@iepa.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0000-1411-2677>

Luis Manuel Hernández-Loaiza <https://orcid.org/0009-0001-8086-783X>
Universidad interseterrana del estado de Puebla Ahuacatlán UIEPA Los llanos Km carretera Amixtlán San Andrés Tlayehualancingo, 73330 Amixtlán, Puebla.
Departamento de ingeniería agroindustrial

Francisco Javier Camacho-Martínez <https://orcid.org/0009-0002-3222-2081>
Karla Arroyo-Guevara <https://orcid.org/0009-0002-5481-3413>

Universidad interseterrana del estado de Puebla Ahuacatlán UIEPA Los llanos Km carretera Amixtlán San Andrés Tlayehualancingo, 73330 Amixtlán, Puebla.
Departamento de ingeniería en biotecnología.

Laura Ortega-Hernández <https://orcid.org/0000-0002-5565-7152>
Universidad interseterrana del estado de Puebla Ahuacatlán UIEPA Los llanos Km carretera Amixtlán San Andrés Tlayehualancingo, 73330 Amixtlán, Puebla.
Departamento de ingeniería en enfermería.

Juana Trocoli-Carmona <https://orcid.org/0009-0000-3460-103X>
Universidad interseterrana del estado de Puebla Ahuacatlán UIEPA Los llanos Km carretera Amixtlán San Andrés Tlayehualancingo, 73330 Amixtlán, Puebla.
Departamento de ingeniería agroindustrial.

RESUMEN: *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp. son patógenos de relevancia agronómica debido a su capacidad de causar daños en diferentes etapas del ciclo productivo de las plantas. Por lo que se ha motivado a la búsqueda de alternativas sostenibles para su manejo. El objetivo del presente trabajo consistió en la obtención de extractos de las plantas medicinales *Cyathea divergens*, *Bocconia frutescens* y *Cnidoscolus multilobus* y su uso en el control de los agentes causales de damping off *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp. Para esto se prepararon extractos etanólicos y se realizó una caracterización fitoquímica parcial para determinar la presencia de metabolitos de interés, posteriormente se determinó el porcentaje de inhibición de crecimiento micelial (% ICP) mediante la prueba de medio envenenado utilizando una concentración de 10,000 ppm teniendo como control los medios con etanol para descartar el efecto inhibitorio del solvente. Para ambos patógenos el mayor % ICP fue el de *B. frutescens* con un 82% para *Phytophthora* sp. y un 53% para *Rhizoctonia* sp. en ambos casos el concentrado con menor %ICP lo presentó *C. divergens*. Por lo que el estudio mostró la efectividad antifúngica estadísticamente representativa ($p \leq 0.05$) de las plantas estudiadas de la Sierra Norte de Puebla, sugiriendo su uso para futuras investigaciones.

Palabras clave: *biocontrol, biofumigante, Bocconia frutescens.*

ABSTRACT: *Phytophthora* sp. and *Rhizoctonia* sp. are pathogens of agronomic relevance due to their ability to cause damage at different stages of the productive cycle

of plants. Therefore, the search for sustainable alternatives for its management has been motivated. The objective of the present work was to obtain extracts from the medicinal plants *Cyathea divergens*, *Bocconia frutescens* and *Cnidoscolus multilobus* and their use in the control of the causal agents of damping off *Phytophthora* sp. and *Rhizoctonia* sp. For this, ethanolic extracts were prepared and a partial phytochemical characterization was carried out to determine the presence of metabolites of interest. Subsequently, the percentage of inhibition of mycelial growth (% ICP) was determined by means of the poisoned medium test using a concentration of 10, 000 ppm having as a control the media with ethanol to rule out the inhibitory effect of the solvent. For both pathogens, the highest % ICP was that of *B. frutescens* with 82% for *Phytophthora* sp. and 53% for *Rhizoctonia* sp. In both cases, the concentrate with the lowest % ICP was presented by *C. divergens*. Therefore, the study showed the statistically representative antifungal effectiveness ($p \leq 0.05$) of the studied plants from the Sierra Norte de Puebla, suggesting its use for future research.

Key words: *biocontrol, biofumigants, Bocconia frutescens*.

INTRODUCCIÓN

Los patógenos como *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp. son agentes causales de ahorcamiento del tallo o damping off y desempeñan un papel importante en la patología vegetal, sirviendo como modelo de estudio para el manejo de enfermedades que causen perdidas en todas las etapas del cultivo y que representan una amenaza a nivel mundial ya que su capacidad para causar daños en diferentes etapas del ciclo de vida de las plantas es evidente. Aunque los síntomas de ambas enfermedades normalmente son más notorios en etapa de emergencia y en plántula también pueden causar pudriciones de raíz, tallos, amarillamientos en hojas, marchitamientos y finalmente la muerte de la planta, (Giachero *et al.*, 2022).

Aunque el uso de agroquímicos ha sido la alternativa tradicional para el manejo para el manejo de estos fitopatógenos, la tendencia actual apunta a alternativas más sostenibles, como el uso de productos biológicos (Akber *et al.*, 2023), y el uso de metabolitos secundarios extraídos de plantas. En este sentido las plantas medicinales destacan por tener propiedades con efectos beneficiosos para la salud humana o animal. Estas se han utilizado desde tiempos ancestrales por diversas culturas y pueblos que poseen un amplio conocimiento de sus propiedades y usos. Sin embargo, sus aplicaciones se extienden más allá de las terapéuticas ya que sus usos en otras industrias como la agrícola han sido documentados. Algunas de estas aplicaciones incluyen el uso de concentrados de plantas para formular biopelículas que mejoran la vida post cosecha de frutas, también como biofumigante, como agentes naturales que controlan plagas en los cultivos sin afectar al medio ambiente ni a la salud humana (Castresan *et al.*, 2013; Moreno Paredes & Cedeño Luzardo, 2021).

En el estado de Puebla, México, la gran diversidad de especies de plantas medicinales que se distribuyen en diferentes regiones y ecosistemas ha sido documentada (Rodríguez Landa-Guerrero *et al.*, 2020), para algunas de estas plantas se han encontrado usos que van desde la industria alimenticia hasta la farmacéutica. Ejemplos destacables incluyen a *Cyathea divergens* y otras ciatáceas que han sido investigadas por sus propiedades antinflamatorias y antimicrobianas, también se han estudiado debido a su contenido de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante (Chaparro-Hernández *et al.*, 2022; Nath *et al.*, 2019), *Bocconia frutescens* de la cual se conocen sus usos para combatir algunas enfermedades en plantas, tener efectos insecticidas, además de que contener una alta concentración de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante (López-Guzmán, 2018; Montes R. *et al.*, 2013; Yu *et al.*, 2014a), *Cnidoscolus multilobus* y otras plantas del mismo género de la cuales se existen amplios estudios de su uso potencial farmacológico y nutricional (De Oliveira-Júnior *et al.*, 2018; Lyons *et al.*, 2020; Padilla-Camberos *et al.*, 2021).

A pesar de este conocimiento, aún existe una brecha significativa en la literatura científica en cuanto a la descripción y caracterización los efectos antifúngicos de las plantas anteriormente mencionadas especialmente frente a los patógenos *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp. En este contexto la presente investigación ha tenido como objetivo la obtención de extractos etanólicos a

partir de las plantas medicinales *Cyathea divergens*, *Bocconia frutescens* y *Cnidoscolus multilobus* y su uso en el control de los agentes causales de damping off *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp.

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección y obtención de las plantas

Las plantas *Cyathea divergens*, *Bocconia frutescens* y *Cnidoscolus multilobus* se seleccionaron en base a literatura consultada y el conocimiento de los pobladores de la región en sus usos medicinales. Fueron identificadas taxonómicamente mediante la aplicación en línea *Plants of the world online* (POWO) además de ser registradas en el herbario de la Universidad Interserrana del Estado de Puebla Ahuacatlán con los números de Voucher 0041, 0042 y 0043 a cargo de la ingeniería en biotecnología, también se corroboraron sus usos en el libro “Catálogo de plantas útiles de la Sierra Norte de Puebla, México” (Alfaro *et al.*, 1995). Las plantas seleccionadas fueron obtenidas en tres distintas colectas en la sierra norte de Puebla siendo el municipio Tepango de Rodríguez (20°00'10"N 97°47'49"O) el más cercano a las colectas, el 24 de febrero se colectaron partes de tallo cortando hasta la mitad sin derribar la planta de *C. divergens*, el 27 de febrero se colectaron hojas jóvenes con un largo de 30 a 35 cm y un ancho de 20 a 25 cm de *B. frutescen*, finalmente, el 4 de abril de 2023 se colectó raíz de *C. multilobus*, las muestras se tomaron según el uso común que tienen las partes de la planta, se mantuvieron en bolsas plásticas perforadas y en hielera hasta su procesamiento.

Las cepas de *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp., fueron donadas por el Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto politécnico nacional y fueron identificadas y corroboradas hasta género morfológicamente. Para reactivarlas se dispusieron discos de 5 mm de diámetro en medios PDA (Difco™) y EMA (Difco™) ambos adquiridos de AVANTOR PERFORMANCE MATERIALS MX.

Preparación de los extractos etanólicos

Los extractos evaluados fueron producidos en las instalaciones del laboratorio de microbiología de la Universidad Interserrana del Estado de Puebla. Se utilizó el método descrito Benítez-Benítez *et al.*, (2020) con modificaciones en los tiempos de maceración; las muestras colectadas se lavaron con agua corriente durante dos minutos y posteriormente se sumergieron en hipoclorito de sodio al 1% durante cuatro minutos, seguido de un lavado con abundante agua destilada para retirar el exceso de hipoclorito y secados a la sombra por 24 h. Para obtener el concentrado etanólico se tomó una muestra de 100 g de material vegetal por cada 400 mL de etanol al 96%, y se mezclaron matraces Erlenmeyer, las mezclas se mantuvieron en etanol durante dos semanas para posteriormente ser filtrada en papel filtro Whatman No.1. El concentrado se transfirió a frascos ámbar y refrigeró a 4 °C para su posterior utilización.

Análisis fitoquímico de los concentrados

Se llevó a cabo una caracterización fitoquímica parcial con el fin de identificar las posibles familias de compuestos fitoquímicos presentes que podrían estar contribuyendo a la actividad de inhibición del crecimiento de los hongos, en caso de que esta se presente. Se utilizaron diversas técnicas cualitativas, las cuales se describen de manera concisa en el manual de prácticas de farmacognosia de la Universidad Veracruzana (Rodríguez Landa *et al.*, 2020) brevemente a continuación:

Determinación de alcaloides (Dragendorff)

Para preparar el reactivo de Dragendorff, se combinaron 8 g de nitrato de bismuto con 20 mL de ácido nítrico al 30%, junto con una solución de 27.2 g de yoduro de potasio en 50 mL de agua. La mezcla se dejó reposar durante 24 h, se decantó en un matraz y se aforó a 100 mL. Para el desarrollo de la técnica, se colocaron 3 gotas del extracto en un tubo de ensayo y se añadieron 3 gotas del reactivo. La formación de precipitados naranja-marrón indica la presencia de alcaloides.

Determinación de flavonoides (Shinoda)

En un tubo de ensayo, se dispusieron 3 gotas del extracto junto con un trozo de cinta de magnesio de 0.5 cm² y se agregaron 4 gotas de HCl concentrado, todo bajo la campana de extracción. Se considera positivo para flavonas, flavonoides o flavonoles si la coloración cambia hacia tonos naranja, rojo o rojo azulado.

Determinación de saponinas (Test afrosimétrico)

Se colocaron 3 mL del concentrado en un tubo de ensayo, al cual se le añadieron 5 mL de agua destilada. La mezcla fue calentada a ebullición en baño maría durante 2 min y se agitó vigorosamente. Se evaluó la aparición de espuma persistente, la persistencia en minutos de la espuma se califica con cruces: 5-20 min (+ poco persistente), entre 20-25 min como (++ medianamente persistente), y más de 30 min como (+++ altamente persistente).

Determinación de Glucósidos cardiotónicos (terpenoides y esteroideos) (Liberman-Burchard)

En un tubo de ensayo se depositaron 5 gotas del extracto, seguido de la adición de 0.5 mL de anhídrido acético y 0.5 mL de cloroformo. La mezcla fue enfriada a 0 °C, y posteriormente se agregaron 2 gotas de ácido sulfúrico. La aparición de un color azul, que luego transita hacia el naranja antes de transformarse en verde, indica un resultado positivo.

Determinación de cumarinas (Baljet)

Se preparó la Solución A mediante la disolución de ácido pícrico al 1% en etanol, mientras que la Solución B se obtuvo al disolver hidróxido de sodio al 10 % en agua destilada. Para la prueba, se añadieron 4 gotas del concentrado y 3 gotas de una solución preparada combinando equitativamente las Soluciones A y B (1:1). Un cambio de color hacia tonos naranja o rojo oscuro se considera positivo para la presencia de cumarinas.

Evaluación del porcentaje de inhibición de crecimiento de los hongos con los extractos

Se evaluaron los tres extractos antes mencionados, sobre *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp. utilizando la técnica de cultivo envenenado considerando una concentración de 10, 000 ppm de cada extracto, como control se utilizaron medios con etanol de 96% a 10, 000 ppm para descartar el solvente como posible inhibidor de crecimiento de los patógenos. Se utilizaron dos medios de cultivo EMA y PDA en placas de 60 mm de diámetro. Los hongos aislados en los respectivos medios de cultivo con 10 días de maduración se resembraron utilizando un sacabocados de 5 mm de diámetro y colocándolos en la orilla de la placa. Las placas fueron selladas y colocadas de manera invertida y se incubaron a 26 ± 2 °C. El crecimiento radial de los hongos fue medido cada 24 h con un vernier digital de la marca Truper ® tomando en cuenta el máximo de crecimiento de 96 h para *Rhizoctonia* sp. y 140 h para *Phytophthora* sp. tiempo que llevó a los controles para colonizar el 100% de la caja Petri.

El porcentaje de inhibición de crecimiento del patógeno fue calculado por la fórmula descrita por Arce-Araya *et al.* (2019) la cual se describe en la ecuación 1:

Ecuación 1: Porcentaje de inhibición de crecimiento micelial (% ICP)

$$\% ICP = \frac{(Crecimiento radial sin extracto - crecimiento radial con extracto)}{crecimiento radial sin extracto} * 100$$

Diseño experimental y análisis estadístico

Se utilizó tres repeticiones por cada uno de las combinaciones y se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con un ANOVA de un factor para determinar el efecto del tratamiento (Medio + extracto) y se realizó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey para determinar las diferencias entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). Los datos fueron analizados con el programa estadístico Microsoft Excel LTSC Profesional Plus 2021 con licencia corporativa de la Universidad Interserrana del Estado de Puebla Ahuacatlán.

RESULTADOS

El perfil fitoquímico realizado se describe en la *tabla 1* en donde se observó presencia de flavonoides, siendo estos junto a esteroles los únicos compuestos que se presentaron en las tres plantas de manera similar. Por otra parte, destacó la ausencia de alcaloides en *C. divergens* siendo positivos estos compuestos para las otras plantas. Asimismo, la ausencia de triterpenos en *C. multilobous* fue evidente. Finalmente, solo en *B. frutescens* se observó la ausencia de cumarinas.

Tabla 1. Compuestos fitoquímicos de los extractos etanólicos de *C. divergens*, *B. frutescens*, *C. multilobus* colectados en la Sierra Norte de Puebla

Table 1. Phytochemical compounds of the ethanolic extracts of *C. divergens*, *B. frutescens*, *C. multilobus* collected in the Sierra Norte of Puebla

| Plantas | Alcaloides | Saponinas | Flavonoides | Triterpenos y esteroides | Coumarinas | Esteroles |
|----------------------|------------|-----------|-------------|--------------------------|------------|-----------|
| <i>C. multilobus</i> | + | +++ | + | - | + | + |
| <i>C. divergens</i> | - | + | + | + | + | + |
| <i>B. frutescens</i> | + | + | + | + | - | + |

Para saponinas + poco persistente, ++ medianamente persistente y +++ altamente persistente, para el resto de los de las pruebas + presencia y - ausencia del grupo de los compuestos fitoquímicos.

Los efectos inhibitorios de los concentrados se detallan en la tabla 2, para *Phytophthora* sp. el extracto *B. frutescens* presentó el mayor ICP con un 82% de inhibición del patógeno en ambos medios de cultivo, en comparación con el menor efecto inhibitorio que fue *C. multilobus* en el medio de cultivo EMA con un ICP de 70%, el resto de las combinaciones se mantuvieron con porcentajes menores al antes mencionado. Para *Rhizoctonia* sp. el efecto de *B. frutescens* nuevamente fue el que mayor ICP presentó con 51% para el medio PDA y 53% para el medio EMA, por otra parte, los concentrados que tuvieron menor ICP para este patógeno fueron los de la planta *Cyathea divergens* 33% para el medio EMA y 15% de inhibición en PDA.

Tabla 2. Porcentaje de inhibición de crecimiento micelial de los concentrados de plantas de *C. divergens*, *B. frutescens*, *C. multilobus* obtenidos en la Sierra Norte de Puebla sobre aislamientos fúngicos de *Rhizoctonia* sp. y *Phytophthora* sp.

Table 2. Percentage of inhibition of mycelial growth of plant extracts of *C. divergens*, *B. frutescens*, *C. multilobus* obtained in the Sierra Norte of Puebla on fungal isolates of *Rhizoctonia* sp. and *Phytophthora* sp.

| Tratamiento | Fitopatógeno | |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | <i>Phytophthora</i> sp. | <i>Rhizoctonia</i> sp. |
| EMA + Etanol | 0,00 ± 0,00 ^a | 0,00 ± 0,00 ^a |
| EMA + <i>Cyathea divergens</i> | 77,78 ± 0,90 ^{cd} | 33,32 ± 27,74 ^{abc} |
| EMA + <i>Bocconia frutescens</i> | 82,16 ± 2,64 ^d | 51,47 ± 13,80 ^c |
| EMA + <i>Cnidoscolus multilobus</i> | 70,15 ± 0,92 ^b | 45,41 ± 12,89 ^{bc} |
| PDA + Etanol | 0,00 ± 0,00 ^a | 0,00 ± 0,00 ^a |
| PDA + <i>Cyathea divergens</i> | 75,18 ± 5,38 ^{bc} | 14,90 ± 4,36 ^{ab} |
| PDA + <i>Bocconia frutescens</i> | 82,31 ± 1,89 ^d | 53,26 ± 6,33 ^c |
| PDA + <i>Cnidoscolus multilobus</i> | 78,27 ± 2,57 ^{cd} | 44,86 ± 5,07 ^{bc} |

Medias con superíndice común en la misma columna no son significativamente diferentes ($p > 0,05$) según la prueba de comparaciones múltiples de Tukey.

DISCUSIÓN

Los flavonoides son compuestos fenólicos ampliamente distribuidos en el reino vegetal y han sido objeto de numerosos estudios debido a sus diversos efectos biológicos, que incluyen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antimicrobianas, sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en el área médica, por ejemplo, se ha comprobado su eficacia frente a bacterias de interés médico como *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus*, del mismo modo, se ha estudiado a estos compuestos con el objetivo de determinar su efecto antifúngico frente a *Candida albicans*, *Candida glabatula*, *Aspergillus fumigatus*, entre otros (El Moussaoui *et al.*, 2019; Mohotti *et al.*, 2020; Olicón-Hernández *et al.*, 2019); por otra parte, las cumarinas son compuestos que también se encuentran considerados dentro del grupo de los flavonoides y su uso también se ha documentado en el área biomédica para determinar su efecto inhibitorio contra *A. fumigatus* y *Candida* sp. y frente algunos hongos de interés agrícola como *Fusarium solani* y *Rhizoctonia solani* (Navarro-García *et al.*, 2011), estos compuestos se encontraron presentes en los extractos de las plantas estudiadas y al igual que en otros estudios los extractos presentaron una actividad fungistática inhibiendo el crecimiento de los patógenos el mismo efecto ha sido reportado por otros autores (Faizal *et al.*, 2020; Joaquín-Ramos *et al.*, 2020b; Rodriguez A., 2015), se conocen diversos mecanismos de acción de estos compuestos se sabe que actúan en la degradación de la membrana plasmática de los microrganismos, alterando su funcionamiento mitocondrial, inhibiendo la división celular e incluso inhibiendo la síntesis de proteínas (Al Aboody & Mickymary, 2020; Montagner *et al.*, 2008).

Los alcaloides son biomoléculas de presencia relativamente común en plantas, pero de funciones y mecanismos complejos, sus usos médicos van desde efectos antitumorales, diuréticos, antivirales, antihipertensivos, entre otros (Badri *et al.*, 2019), aunque el mecanismo de acción de estas moléculas va depender del tipo de alcaloide estudiado, se conoce que el efecto antibacterial se debe principalmente a la inhibición de la síntesis de ácido nucleico en la pared celular de microrganismos (Cushnie *et al.*, 2014), en este trabajo se observó la presencia de estos compuestos en *C. multilobus* y *B. frutescens*, Yu *et al.*, (2014b), mencionan como los alcaloides específicamente de la familia de las papaveráceas como *B. frutescens* tienen un efecto de inhibición de hasta el 50% contra *Phytophthora capsici*; por otra parte Pacheco-Hernández *et al.*, (2020), mencionan que la actividad antifúngica de *C. multilobus* puede deberse a la alta producción de ácidos orgánicos extraídos de la planta, sin embargo, estos autores utilizaron las partes aéreas de la planta y en el presente trabajo solo se utilizó la raíz de la planta para elaborar los extractos, esto debido a que en base al conocimiento popular de la región y la corroboración mediante revisión bibliográfica esta es la parte de la planta que se utiliza con fines medicinales. En esta investigación el menor ICP se presentó para *Rhizoctonia* sp. esto puede deberse a la patogenicidad del patógeno, ya que otros autores han observado que las incidencias y el índice de severidad son mayores en *Rhizoctonia* sp. que *Phytophthora* sp. (Alfiky *et al.*, 2022; Gómez-Hernández *et al.*, 2018; Parajuli & Baysal-Gurel, 2022); en algunos estudios se ha demostrado que metabolitos secundarios como las saponinas presentan actividad antifúngica frente a microrganismos como *Botrytis cinerea* y *Fusarium oxysporum* esto pudiendo explicar parcialmente la inhibición del crecimiento de los hongos para este estudio (Joaquín-Ramos *et al.*, 2020a; Porsche *et al.*, 2018), aunque se documentado el mecanismo de las saponinas en la interacción con células animales en plantas su efecto protector se debe a dos factores primero la actividad de las saponinas incrementada en respuesta al ataque de patógenos aumentando la activación de la enzima diguanilato ciclase la cual es enzima clave involucrada en la producción de celulosa en las plantas la segunda como fuente importante de monosacáridos en la planta (Francis *et al.*, 2003).

Los registros de otros autores mencionan que *C. divergens* se utiliza principalmente y se limitan a artesanías u ornamentales y muy pocas veces con efectos medicinales o con algún efecto antifúngico (Martínez *et al.*, 2007).

CONCLUSIONES

Se mostró a efectividad antifúngica estadísticamente representativa ($p \leq 0.05$) de las plantas estudiadas en el presente trabajo procedentes de la Sierra Norte de Puebla siendo *B. frutescens* el concentrado que mayor inhibición presentó y *C. divergens* el que menor efectividad tuvo. La eficacia que puede ser atribuida a la presencia de algunos metabolitos como alcaloides, saponinas y cumarinas. Por otra parte, a pesar de la riqueza de especies de plantas medicinales en la región, existe aún una brecha significativa en la literatura científica en cuanto a la descripción y caracterización de los efectos antifúngicos de estas plantas frente a microrganismos como *Phytophthora* sp. y *Rhizoctonia* sp. Los resultados bajo condiciones de laboratorio sugieren el potencial de estas plantas como una alternativa sostenible, sumado a esto la diversidad de metabolitos presentes sugieren un potencial multifuncional en las plantas estudiadas para la protección de cultivos. Se requiere realizar extractos con diferentes solventes, partes de la planta y condiciones edafoclimáticas que permitan identificar la extracción y eficacia máxima de los extractos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Interserrana del Estado de Puebla por el apoyo y la disponibilidad para realizar este trabajo en las instalaciones.

Al CONCYTEP por financiar parte de este proyecto mediante la convocatoria “Apoyo a nuevos investigadores 2022”.

A los doctores Solano-Báez Alma Rosa y Márquez-Licona Guillermo, profesores del Centro de Desarrollo de Productos Bióticos, Instituto Politécnico Nacional, 62731, Yautepec, Morelos, México, por proporcionar los patógenos utilizados en el presente trabajo.

LITERATURA CITADA

- Akber, M. A., Mubeen, M., Sohail, M. A., Khan, S. W., Solanki, M. K., Khalid, R., Abbas, A., Divvella, P. K., & Zhou, L. (2023). Global distribution, traditional and modern detection, diagnostic, and management approaches of *Rhizoctonia solani* associated with legume crops. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1091288>
- Al Aboody, M. S., & Mickymaray, S. (2020). Anti-Fungal Efficacy and Mechanisms of Flavonoids. *Antibiotics*, 9(2), 45. <https://doi.org/10.3390/antibiotics9020045>
- Alfaro, M. A. M., Oliva, V. E., Cruz, M. M., García, G., Olazcoaga, G. T., & León, A. W. (1995). Catálogo de plantas útiles de la Sierra Norte de Puebla, México. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:140594750>
- Alfiky, A., L'Haridon, F., Abou-Mansour, E., & Weisskopf, L. (2022). Disease Inhibiting Effect of Strain *Bacillus subtilis* EG21 and Its Metabolites Against Potato Pathogens *Phytophthora infestans* and *Rhizoctonia solani*. *Phytopathology®*, 112(10), 2099–2109. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-12-21-0530-R>
- Arce-Araya, C., Varela-Benavides, I., & Torres-Portuguez, S. (2019). Inhibición del crecimiento micelial de hongos asociados a antracnosis en ñame (*Dioscorea alata*). *Agronomía Mesoamericana*, 381–393. <https://doi.org/10.15517/am.v30i2.32653>
- Badri, S., Basu, V. R., S. K. B., K. C., & D. A. (2019). A Review on Pharmacological Activities of Alkaloids. *World Journal of Current Medical and Pharmaceutical Research*, 1(6), 230–234. <https://doi.org/10.37022/WJCMR.2019.01068>
- Benítez-Benítez, R., Sarria-Villa, R. A., Gallo-Corredor, J. A., Pérez Pacheco, N. O., Álvarez Sandoval, J. H., & Giraldo Aristizabal, C. I. (2020). Obtención y rendimiento del extracto etanólico de dos plantas medicinales. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 15(1), 31–40. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3597>

- Castresan, J. E., Rosenbaum, J., & González, L. A. (2013). Estudio de la efectividad de tres aceites esenciales para el control de áfidos en pimiento, *Capsicum annuum* L. *Idesia (Arica)*, 31(3), 49–58. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292013000300007>
- Chaparro-Hernández, I., Rodríguez-Ramírez, J., Barriada-Bernal, L. G., & Méndez-Lagunas, L. (2022). Tree ferns (Cyatheaceae) as a source of phenolic compounds – A review. *Journal of Herbal Medicine*, 35, 100587. <https://doi.org/10.1016/j.hermed.2022.100587>
- Cushnie, T. P. T., Cushnie, B., & Lamb, A. J. (2014). Alkaloids: An overview of their antibacterial, antibiotic-enhancing and antivirulence activities. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 44(5), 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2014.06.001>
- De Oliveira-Júnior, R. G., Ferraz, C. A. A., De Oliveira, A. P., Araújo, C. S., Oliveira, L. F. D. S., Picot, L., Rolim, L. A., Rolim-Neto, P. J., & Almeida, J. R. G. D. S. (2018). Phytochemical and pharmacological aspects of *Cnidoscolus* Pohl species: A systematic review. *Phytomedicine*, 50, 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.phymed.2017.08.017>
- El Moussaoui, A., Jawhari, F. Z., Almehdi, A. M., Elmsellem, H., Fikri Benbrahim, K., Bousta, D., & Bari, A. (2019). Antibacterial, antifungal and antioxidant activity of total polyphenols of *Withania frutescens* L. *Bioorganic Chemistry*, 93, 103337. <https://doi.org/10.1016/j.bioorg.2019.103337>
- Faizal, A., Taufik, I., Firda Rachmani, A., & Prihartini Azar, A. W. (2020). Antioxidant and antibacterial properties of tree fern Cyathea contaminans. *Biodiversitas*, 21(5), 2201–2205. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d210548>
- Francis, G., Kerem, Z., Makkar, H., & Becker, K. (2003). The biological action of saponins in animal systems: A review. *The British journal of nutrition*, 88, 587–605. <https://doi.org/10.1079/BJN2002725>
- Giachero, M. L., Declerck, S., & Marquez, N. (2022). Phytophthora Root Rot: Importance of the Disease, Current and Novel Methods of Control. *Agronomy*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/agronomy12030610>
- Gómez-Hernández, D., Carrillo-Rodríguez, J. C., Chávez-Servia, C., & Perales-Segovia. (2018). Pathogenicity of *Phytophthora capsici* Leon and *Rhizoctonia solani* Khün, on seedlings of ‘costeño’ pepper (*Capsicum annuum* L.). *Revista Bio ciencias*, 5(1). <https://revistabiociencias.uan.edu.mx/index.php/BIOCIENCIAS/article/view/356/639#info>
- Joaquín-Ramos, A. D. J., López-Palestina, C. U., Pinedo-Espinoza, J. M., Altamirano-Romo, S. E., Santiago-Saenz, Y. O., Aguirre-Mancilla, C. L., & Gutiérrez-Tlahque, J. (2020b). Phenolic compounds, antioxidant properties and antifungal activity of jarilla (*Barkleyanthus salicifolius* [Kunth] H. Rob & Brettell). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(3), 352–360. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000300352>
- López-Guzmán, S. (2018). Los alcaloides de *Bocconia frutescens* L. y su actividad contra hongos fitopatógenos [Licenciatura, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. https://www.researchgate.net/profile/Samuel-Guzman/publication/337485707_UNIVERSIDAD_DE_CIENCIAS_Y_ARTES_DE_CHIAPAS_SAMUEL_LOPEZ_GUZMAN/links/5ddb7fa592851c1fedaf62a0/UNIVERSIDAD-DE-CIENCIAS-Y-ARTES-DE-CHIAPAS-SAMUEL-LOPEZ-GUZMAN.pdf
- Lyons, G., Dean, G., Tongaiaba, R., Halavatau, S., Nakabuta, K., Lonalona, M., & Susumu, G. (2020). Macro- and Micronutrients from Traditional Food Plants Could Improve Nutrition and Reduce Non-Communicable Diseases of Islanders on Atolls in the South Pacific. *Plants*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/plants9080942>
- Martínez, M., Evangelista Oliva, V., Basurto, F., Cruz, M., & Cruz-Rivas, A. (2007). Flora útil de los cafetales en la Sierra Norte de Puebla, México Useful plants of the Sierra Norte de Puebla, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78.
- Mohotti, S., Rajendran, S., Muhammad, T., Strömstedt, A. A., Adhikari, A., Burman, R., De Silva, E. D., Göransson, U., Hettiarachchi, C. M., & Gunasekera, S. (2020). Screening for bioactive secondary metabolites in Sri Lankan medicinal plants by microfractionation and targeted isolation of antimicrobial flavonoids from *Derris scandens*. *Journal of Ethnopharmacology*, 246, 112158. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2019.112158>

Recibido:
17/abril/2024

Aceptado:
23/octubre/2024

- Montagner, C., De Souza, S. M., Groposo, C., Delle Monache, F., Smânia, E. F. A., & Smânia Jr, A. (2008). Antifungal Activity of Coumarins. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 63(1–2), 21–28. <https://doi.org/10.1515/znc-2008-1-205>
- Montes R, C., Reña, C. S., & Gutierrez, V. (2013). Efecto insecticida del extracto de *Bocconia frutescens* L. sobre larvas de Chisas. 11, 19–28.
- Moreno Paredes, M., & Cedeño Luzardo, E. (2021). Evaluación del efecto antagónico de una biopelícula con extractos de *Samanea saman* frente a *Colletotrichum gloeosporioides* responsable de la antracnosis en mango. *Bionatura*, 6(1), 1466–1472. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.5>
- Nath, K., Talukdar, A. D., Bhattacharya, M. K., Bhowmik, D., Chetri, S., Choudhury, D., Mitra, A., & Choudhury, N. A. (2019). *Cyathea gigantea* (Cyatheaceae) as an antimicrobial agent against multidrug resistant organisms. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 19(1), 279. <https://doi.org/10.1186/s12906-019-2696-0>
- Navarro-García, V. M., Rojas, G., Avilés, M., Fuentes, M., & Zepeda, G. (2011). *In vitro* antifungal activity of coumarin extracted from *Loeselia mexicana* Brand. *Mycoses*, 54(5). <https://doi.org/10.1111/j.1439-0507.2010.01993.x>
- Olicón-Hernández, D. R., Camacho-Morales, R. L., Pozo, C., González-López, J., & Aranda, E. (2019). Evaluation of diclofenac biodegradation by the ascomycete fungus *Penicillium oxalicum* at flask and bench bioreactor scales. *Science of The Total Environment*, 662, 607–614. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.248>
- Pacheco-Hernández, Y., Villa-Ruano, N., Rubio-Rosas, E., & Vásquez-Lara, I. (2020). Chemical profiling of the urticating trichomes from *Cnidoscolus multilobus* (“mala mujer”) and their antimicrobial activity. *Polibotánica*, 50: 137–146. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.50.10>
- Padilla-Camberos, E., Torres-Gonzalez, O. R., Sanchez-Hernandez, I. M., Diaz-Martinez, N. E., Hernandez-Perez, O. R., & Flores-Fernandez, J. M. (2021). Anti-Inflammatory Activity of *Cnidoscolus aconitifolius* (Mill.) Ethyl Acetate Extract on Croton Oil-Induced Mouse Ear Edema. *Applied Sciences*, 11(20). <https://doi.org/10.3390/app11209697>
- Parajuli, M., & Baysal-Gurel, F. (2022). Control of *Phytophthora* and *Rhizoctonia* Root Rot on Red Maple Using Fungicides and Biofungicides. *HortScience*, 57(10), 1306–1312. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI116673-22>
- Porsche, F. M., Molitor, D., Beyer, M., Charton, S., André, C., & Kollar, A. (2018). Antifungal Activity of Saponins from the Fruit Pericarp of *Sapindus mukorossi* against *Venturia inaequalis* and *Botrytis cinerea*. *Plant Disease*, 102(5), 991–1000. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-17-0906-RE>
- Rodriguez A., O. E. (2015). Actividad antioxidante de extractos de hojas de *Bocconia frutescens* L. (Papaveraceae). *Revista de Tecnología | Journal of Technology* | Págs. 21-36, 14, 21–36. <https://doi.org/10.18270/rt.v14i2.1868>
- Rodríguez Landa, J. F., Hernández Lozano, M., & Méndez Ventura, L. M. (2020). *Manual de prácticas de farmacognosia* [Manual]. <https://www.uv.mx/qfb/files/2020/09/Guia-de-Farmacognosia.pdf>
- Yu, X., Gao, X., Zhu, Z., Cao, Y., Zhang, Q., Tu, P., & Chai, X. (2014a). Alkaloids from the Tribe *Bocconieae* (Papaveraceae): A Chemical and Biological Review. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 19, 13042–13060. <https://doi.org/10.3390/molecules190913042>
- Yu, X., Gao, X., Zhu, Z., Cao, Y., Zhang, Q., Tu, P., & Chai, X. (2014b). Alkaloids from the Tribe *Bocconieae* (Papaveraceae): A Chemical and Biological Review. *Molecules*, 19(9), 13042–13060. <https://doi.org/10.3390/molecules190913042>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

EFECTO DE TRES FERTILIZANTES ORGÁNICOS FOLIARES EN EL CRECIMIENTO DE *Agastache* *mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)

EFFECT OF THREE ORGANIC FERTILIZERS ON THE GROWTH OF *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)

Hernández Ramírez, U., S. Rojas Hernández, M.A. Gruintal Santos, J. Morales Barrera, M. Vázquez Villamar y T. Romero Rosales

EFEITO DE TRES FERTILIZANTES ORGÁNICOS FOLIARES EN EL CRECIMIENTO DE *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)

EFFECT OF THREE ORGANIC FERTILIZERS ON THE GROWTH OF *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0
Atribución-No Comercial ([CC BY-NC 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)).

Efecto de tres fertilizantes orgánicos foliares en el crecimiento de *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)

Effect of three organic fertilizers on the growth of *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)

Uriel Hernández Ramírez, Saúl Rojas Hernández, Miguel Ángel Gruinal Santos, Judith Morales Barrera, Mirna Vázquez Villamar, Teolincacihuatl Romero Rosales

EFFECTO DE TRES FERTILIZANTES ORGÁNICOS FOLIARES EN EL CRECIMIENTO DE *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)

EFFECT OF THREE ORGANIC FERTILIZERS ON THE GROWTH OF *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* (Lamiaceae)

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 261-274. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.17

Uriel Hernández-Ramírez <https://orcid.org/0000-0002-0255-3624>

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>

Unidad Académica de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Km 3 Carretera Nacional Altamirano- Iguala Frente al 34 Batallón de Infantería. Col. Querenditas Apartado Postal # 12, C.P. 40660 Cd. Altamirano, Gro., México

Miguel Angel Gruinal-Santos <https://orcid.org/0000-0002-7654-1239>

Judith Morales-Barrera <https://orcid.org/0009-0003-5929-5202>
Mirna Vázquez-Villamar <https://orcid.org/0000-0002-5322-3537>

Teolincacihuatl Romero-Rosales. Autora de correspondencia: 18029@uagro.mx
<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

RESUMEN: En los últimos años, la extracción de plantas medicinales del medio ambiente ha aumentado considerablemente, lo que ha afectado a las poblaciones silvestres. *Agastache mexicana* (Kunth) Lint et Epling ssp. *mexicana* Bye, Linares et Ramamoorthy, conocida como toronjil morado, es una planta endémica de México, ampliamente utilizada para tratar diversos malestares. A pesar de los numerosos estudios sobre sus aplicaciones, la información disponible sobre su reproducción y conservación es limitada. Además, su semilla presenta un bajo porcentaje de germinación (39%), lo que pone en riesgo la permanencia de esta especie en su hábitat natural. Por esta razón, se evaluaron tres fertilizantes orgánicos (lixiviado de lombriz, IMPULSSOOR ROOT y MAXIM) en el crecimiento vegetativo de *A. mexicana* ssp. *mexicana*, utilizando un diseño completamente al azar. Las variables evaluadas fueron: altura de planta (AP), número de rizomas (NDR), número de brotes (NDB), peso húmedo (PH), peso seco (PS) y área foliar (AF). Se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en todas las variables evaluadas. El lixiviado de lombriz demostró ser el mejor fertilizante foliar, mostrando un efecto positivo en las variables de *A. mexicana* ssp. *mexicana* después de doce semanas de evaluación.

Palabras clave: Nutrición vegetal, plantas medicinales, herbolaria, foliar, humus.

ABSTRACT: In recent years, the extraction of medicinal plants from the environment has increased considerably, which has affected wild populations. *Agastache mexicana* (Kunth) Lint et Epling ssp. *mexicana* Bye, Linares et Ramamoorthy, known as toronjil morado, is an endemic plant of Mexico, widely used to treat various ailments. Despite numerous studies on its applications, the available information on its reproduction and conservation is limited. Additionally, its seeds exhibit a low germination rate (39%), putting the survival of this species in its natural habitat at risk. For this reason, three

organic fertilizers (worm leachate, IMPULSSOOR ROOT, and MAXIM) were evaluated in the vegetative growth of *A. mexicana* ssp. *mexicana*, using a completely randomized design. The variables evaluated were: plant height (PH), number of rhizomes (NR), number of shoots (NS), fresh weight (FW), dry weight (DW), and leaf area (LA). Significant differences ($p \leq 0.05$) were observed in all evaluated variables. The worm leachate proved to be the best foliar fertilizer, showing a positive effect on the variables of *A. mexicana* ssp. *mexicana* after twelve weeks of evaluation.

Key words: Nutrition, medicinal plants, herbalism, foliar

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha aumentado la investigación en las plantas medicinales y aromáticas debido a los amplios usos y por la necesidad de la extracción de sus metabolitos secundarios y fabricación de diferentes productos en el mundo (Silva-Castellano *et al.*, 2021). Algunas plantas medicinales se cultivan a gran escala, pero la mayor parte se cosechan de plantas silvestres, afectando así a sus poblaciones, una de las especies afectadas es *Agastache mexicana* subspecie *mexicana* planta endémica de México (Martínez-Gordillo *et al.*, 2017), que se encuentra distribuida en los estados de Querétaro, Tlaxcala, Hidalgo, Guanajuato, Morelos, Puebla, Ciudad de México, Chihuahua, Veracruz, Michoacán y Guerrero (Palma-Tenango *et al.*, 2021), esta planta ha sido reportada con actividad antifúngica como alternativa para la protección de granos de trigo en postcosecha (Juárez *et al.*, 2015; Juárez *et al.*, 2021), como remedio para tratar heridas, purulencias infectadas y la psoriasis (Martínez-Galicia, 2018). Se ha utilizado también como antiespasmódico, espasmolítico, estomaquico, para tratar heridas, ulceras, dolor y fiebre (Hieronimi, 2010; (Ventura-Martínez *et al.*, 2017). Algunos estudios además sugieren el uso de flavonoides derivados de esta planta (7-ACAG) como tratamiento farmacológico alternativo para el daño cerebral traumático (Gálvez *et al.*, 2015). Recientemente fue reportada como una alternativa para aliviar algunos malestares del SARSCoV-2, (Covid-19) (Leos-Malagon *et al.*, 2020). A pesar de diversos estudios antes mencionados sobre sus usos, hay una escasa información que permita su reproducción y conservación, que se base en la fenología de la planta y que pueda ser utilizada para aumentar los contenidos de biomasa del cultivo, a esto le agregamos que su semilla tiene bajo % de germinación solo 39% (Torres-Díaz, 2019), por lo que se está poniendo en riesgo la permanencia de esta especie en el medio ambiente de manera silvestre por una tasa alta de extracción para venta, así mismo esta práctica limita la propagación natural de la especie porque se corta la parte vegetativa y no le permiten llegar a su madurez fisiológica para la producción y dispersión natural de semillas.

En la actualidad existe la necesidad de producir alimentos que además de ser cultivados de manera sostenible, sean inocuos, es decir que no causen ningún daño al consumidor, si no es inocuo, no es un alimento (FAO/OMS, 2021).

Al presente se siguen usando cantidades excesivas de agroquímicos y fertilizantes con altos niveles de toxicidad, que persisten mayor tiempo en el medio ambiente debido a su estabilidad química, lenta degradación, alta persistencia, estos han afectado las características biológicas del suelo y han provocado contaminación del agua (Abreu *et al.*, 2018; Polanco-Rodríguez *et al.*, 2019 y Parabá-Guzmán *et al.*, 2021). Así mismo Ramírez-Mandujano *et al.* (2016) mencionan que la fertilización foliar favorece al desarrollo, rendimiento y consecuentemente la calidad del producto además de corregir deficiencias de nutrientes en las plantas. Sin embargo, es importante que estos fertilizantes sean de fuentes orgánicas como alternativas más amigables con el medio ambiente, se requiere cambiar la agricultura llamada convencional o moderna por una agricultura agroecológica (Burgo-Bencomo *et al.*, 2018). Una de ellas es el uso de biofertilizantes y bioestimulantes (Reyes-Pérez *et al.*, 2021), el uso de lixiviado de lombriz, elementos fulvicos, húmicos, aminoácidos y micronutrientes se reportan con efectos positivos en varios cultivos como: chile, *Capsicum annuum* var. *annuum*. Martínez-Scott y Ruiz-Hernández (2018), *Caléndula officinalis* L. Milanés *et al.* (2005), jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) Pérez-González *et al.* (2005). Estos influyen en varias respuestas fisiológicas de los cultivos, con ello se puede potencializar la calidad de las cosechas. También minimizan el uso de fertilizantes químicos, aumentan la fertilidad del suelo y permiten la producción de cultivos sostenibles (Itelima *et al.*,

2018). Considerando la importancia antes mencionada de esta planta y la carencia de información sobre su manejo agronómico, nuestro objetivo fue evaluar tres fertilizantes orgánicos foliares en el crecimiento vegetativo de *A. mexicana* subspecie *mexicana*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

La investigación fue realizada en el rancho agroecológico el Romerito ubicado al sureste del municipio de Taxco de Alarcón, Guerrero, México; entre las coordenadas a 18°35'06.83" N y 99°40'21.09" O, con una altitud de 2,334 msnm. El clima es considerado Cwb templado con lluvias en verano, La temperatura media anual en Taxco es a igual es 18.4 °C, la precipitación aproximada es de 1,252 mm (García, 2004). Durante el experimento (28 de febrero a 20 junio del 2021) se registró la temperatura media de 16.2 °C, máxima de 41.5 °C, mínima de 4.1 °C, humedad relativa promedio de 71.1%, estas variables fueron registradas con un datalogger marca Elitech HC 4RC.

Material biológico y sustrato

Las plantas adultas de *A. mexicana* subspecie *mexicana* provenientes de la localidad San Miguel Tianguistenco del municipio San Martín Texmelucan, Puebla, fueron colectadas en noviembre del 2019, estas fueron previamente adaptadas al clima del lugar del experimento, durante 15 meses se dejaron crecer libremente sin ningún manejo solamente agua, pasado este tiempo se extrajeron hijuelos de 20 cm de raíz a la última hoja apical con siete hojas verdaderas, además se le impregnó enraizador en polvo Rootex® (aminoácidos, ácidos orgánicos y nutrientes) a la raíz de cada explante. El trasplante se realizó por la tarde para evitar la deshidratación de la plántula, se utilizaron bolsas de polietileno de 30 x 30 cm, y se aplicó un riego de 500 mL por bolsa, como sustrato se utilizó “tierra de monte” de clase textural franco, el contenido de nutrientes se encuentra en el Cuadro 1. Después del trasplante se aplicaron dos litros de agua en intervalos de siete días.

Cuadro 1. Resultados del análisis de fertilidad del suelo utilizado.

Table 1. Results of the used soil fertility analysis.

| M.O | pH | CE | N-NO ³ | P | K | Ca | Mg | Na | Fe | Zn | Mn | Cu | B | S |
|-----|------|------|-------------------|------|-----|------|-----|------|-----|------|------|------|------|------|
| % | dS/m | --- | --- | --- | --- | --- | ppm | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 11 | 6.85 | 0.34 | 8.49 | 19.4 | 193 | 2781 | 248 | 26.6 | 129 | 2.54 | 18.2 | 0.47 | 0.14 | 28.1 |

Tratamientos y variables

Se permitió que las plantas crecieran libremente durante 30 días. Posteriormente, se realizó una homogenización de las plantas, efectuando un corte a cinco centímetros de altura desde la base del tallo hasta el ápice. Se utilizó un diseño completamente al azar, de cuatro tratamientos y siete repeticiones: T0; Testigo (no incluyó ningún fertilizante solo agua), T1; Lixiviado de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) relación 1:4 con agua (Cuadro 2), T2; IMPULSSOOR ROOT® 5 mL/L (03-2.3-3 NPK+biológicos, micorrizas, Ácido Indol Butírico, elementos húmicos, fulvicos y micronutrientes) y T3; MAXIM® 5 mL/L (ácidos húmicos 65%, ácidos fulvicos 20%, L-aminoácidos 12% y ácidos carboxílicos 3%). Los productos fueron aplicados una vez por semana en toda la planta por aspersión con atomizador, haciendo énfasis en las áreas de crecimiento vegetativo en acción (Trinidad-Santos y Aguilar-Manjarrez, 1999).

Cuadro 2. Análisis de lixiviado de lombriz utilizado en la investigación (Fertilab®).**Table 2.** Analysis of worm leachate used in research (Fertilab®).

| Determinación | Contenido |
|---|-----------|
| pH | 8.99 |
| Relación C/N | 4.76 |
| Conductividad eléctrica (dS/m ⁻¹) | 5.80 |
| Nitrógeno total (mg L ⁻¹) | 0.02 |
| Fósforo total (mg L ⁻¹) | 0.0002 |
| Potasio (mg L ⁻¹) | 0.18 |
| Calcio (mg L ⁻¹) | 0.0038 |
| Magnesio (mg L ⁻¹) | 0.0031 |
| Sodio (mg L ⁻¹) | 0.02 |
| Azufre (mg L ⁻¹) | 0.0094 |
| Materia orgánica (mg L ⁻¹) | 0.20 |
| Carbono orgánico (mg L ⁻¹) | 0.12 |
| Hierro (mg L ⁻¹) | 0.000473 |
| Cobre (mg L ⁻¹) | 0.000024 |
| Manganese (mg L ⁻¹) | 0.000231 |
| Zinc (mg L ⁻¹) | 0.000011 |
| Boro (mg L ⁻¹) | 0.00001 |

Las variables agronómicas evaluadas fueron: Altura de planta (cm) tomada del suelo a la hoja apical más alta con un flexómetro (AP), número de rizomas (NDR), número de brotes que fueron emitidos por planta (NRB), peso seco obtenido con ayuda de una balanza analítica (Isolab modelo 602.31.003), (PS; g), con tejido vegetal secado a 60 °C en estufa (RIOSSA DIGITAL, HCF-62) durante 24 h; y área foliar (AF; cm²), calculada mediante el software ImageJ (Schneider *et al.*, 2012). Las variables mencionadas fueron evaluadas a las tres, seis, nueve y doce semanas, se utilizaron siete plantas por tratamiento por cada corte.

Análisis estadísticos

Los resultados de los componentes agronómicos y de rendimiento se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), y una prueba ($P \leq 0.05$), para comparar las medias entre los tratamientos evaluados, estos análisis fueron realizados con el software SAS (*Statistical Analysis System*) versión 9.4. 2004.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza tuvo diferencias en la variable altura de la planta (Figura 1) se observó que el tratamiento T1 (Lixiviado de lombriz) presentó mayor valor 62.62 cm superando estadísticamente a los otros tratamientos un 47.29% mayor que T3 (Ecomaxim) 36.38% mayor que T2 (IMPULSOOR) y 38.49% mayor que T0 (Testigo, sin fertilizante) a las doce semanas de evaluación. Estos resultados coinciden con los de Martínez-Scott y Ruiz-Hernández (2018) al reportar un efecto positivo ($p \leq 0.05$) de lixiviado de lombriz + ácidos húmicos en la altura de *Capsicum annuum* var. *annum*. De igual forma Cedeño-Solorzano *et al.* (2020), observaron, mayor altura (73.78 cm) por efecto de lixiviado de lombriz en comparación con el testigo (sin fertilización) y la fertilización química en la altura de la planta, en el mismo cultivo, pero en este caso híbrido Quetzal. El efecto positivo de la aplicación de humus líquido también lo reportan López Pérez *et al.* (2019) donde generó mayor altura, en plantas de *Allium sativum* L. Por su parte Milanés *et al.* (2005) reportan mayor altura en plantas de *Caléndula officinalis* L. (44.4 cm) y *Matricaria recutita* L. (38.3 cm) con la aplicación de humus sólido con respecto al testigo. Los efectos positivos del lixiviado de lombriz en respuesta a la altura de las plantas se le atribuyen al contenido de hormonas vegetales y ácidos fenólicos presentes en el mismo, también una respuesta activa al estrés biótico y abiótico (Aremu *et al.*, 2015).

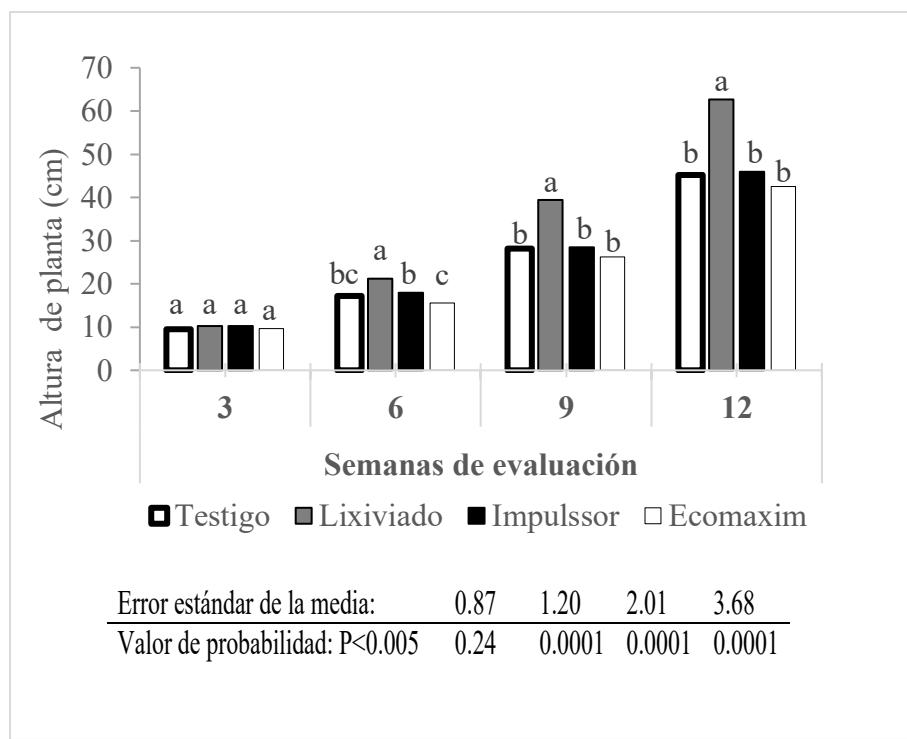


Figura 1. Efecto de fertilizantes foliares en la altura de la planta de toronjil *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* en doce semanas de crecimiento.

Figure 1. Effect of foliar fertilizers on the height of the lemon balm plant *Agastache mexicana* subspecies in twelve weeks of growth.

El análisis de varianza para la variable producción de rizomas, presentó diferencias significativas ($p < 0.05$) en donde el tratamiento T1 (Lixiviado de lombriz) resultó con mayor cantidad de rizomas, en comparación de los otros tratamientos, (1.1 y 2.57) en la semana nueve y doce respectivamente de evaluación, (Figura 2), es posible que el estudio tenga limitaciones que impiden una comparación directa debido a que no son las mismas especies, no obstante, algunos autores como Ticona y Choque (2021) recomiendan aplicaciones de lixiviado de humus en rizomas de plátano (*Mussa* spp.) ya que tiene efectos significativos favorables en el comportamiento morfológico de estos mismos, esto es relevante debido a que una característica de *A. mexicana* subespecie *mexicana* es que permite la reproducción asexual a través de rizomas, por lo cual, puede ser una alternativa para su propagación, además de que sus semillas tienen bajo porcentaje de germinación (39%) y estas presentan dormancia física (Torres-Díaz, 2019). Con respecto al T2 Impulsor y T3 Ecomaxim a las doce semanas de evaluación, aunque hubo más rizomas que T0 (testigo) no se generaron diferencias significativas.

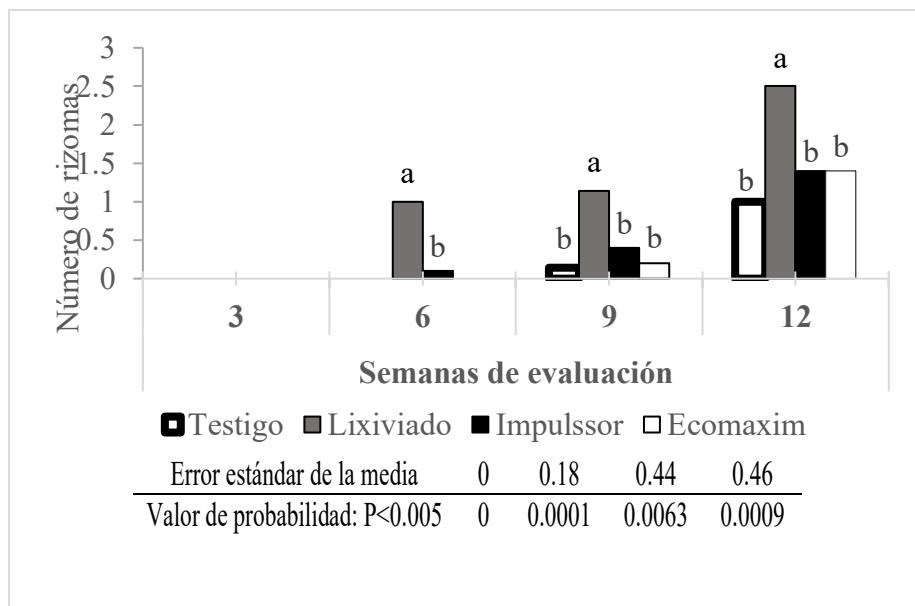


Figura 2. Efecto de fertilizantes foliares en el número de rizomas de plantas de toronjil *A. mexicana* subespecie *mexicana* en doce semanas de crecimiento.

Figure 2. Effect of foliar fertilizers on the number of rhizomes of toronjil *A. mexicana* subspecies *mexicana* balm plants in twelve weeks of growth.

Para el caso de la variable número de brotes, el análisis de varianza presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), para el T1 (Lixiviado de lombriz) registró mayor número de brotes 10.85, superando a los otros tratamientos, T3: 6.2 brotes (Ecomaxim), T2: 6.4 brotes (IMPULSOOR) y T0: (Testigo, sin fertilizante) 5.5 brotes respectivamente, (Figura 3), algo similar reportan Villalba-Martínez *et al.* (2018) en la planta de *Stevia rebaudiana* Bertoni., donde se aplicó humus sólido de lombriz, obteniendo un mayor número de brotes (9.2) superando a la aplicación de gallinaza. Pérez-González *et al.* (2005) encontraron efecto positivo también en la aplicación de líxiviado en la producción de ramas en jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) Con respecto al T2 Impulsoor y T3 Ecomaxim a las doce semanas de evaluación, aunque hubo mayor número de brotes 6.4 y 6.2 respectivamente no hubo diferencias significativas en comparación con el T0 (testigo) que generó solo 5.5 brotes.

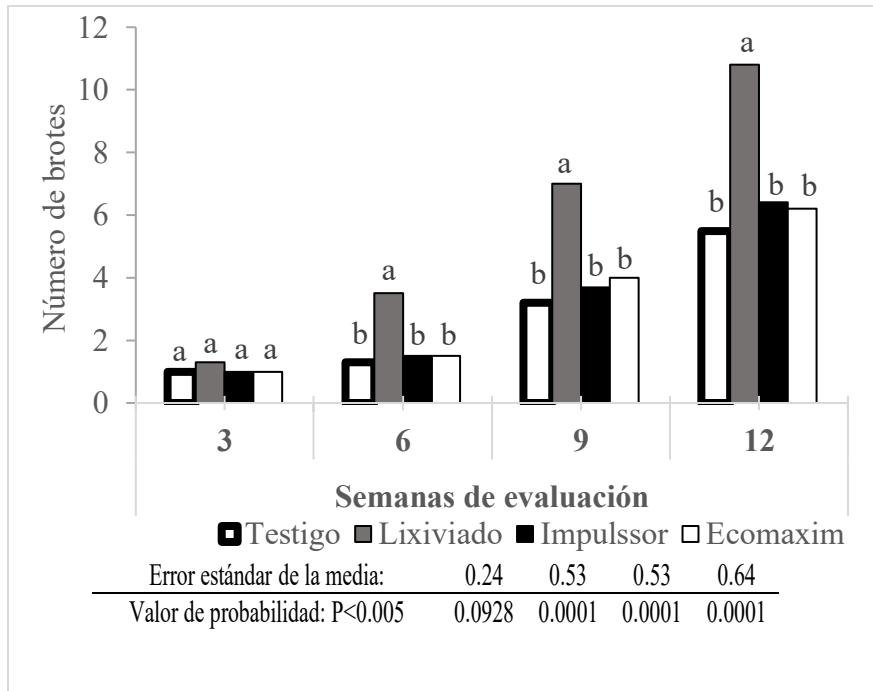


Figura 3. Efecto de fertilizantes foliares en el número de brotes de plantas de toronjil *A. mexicana* subespecie *mexicana* en doce semanas de crecimiento.

Figure 3. Effect of foliar fertilizers on the number of shoots of toronjil balm plants *A. mexicana mexicana* subspecies in twelve weeks of growth.

En cuanto al peso húmedo y peso seco de planta, el análisis de varianza siguió en la misma tendencia el tratamiento T1, (Lixiviado de lombriz) presentó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) con valores sobresalientes (31.6 g) en húmedo y (6.17 g) en seco con respecto a los demás tratamientos (Figura 4 y 5), esta información coincide con lo reportado por Borges *et al.* (2014) donde al incrementar la concentración de humus líquido de lombriz se incrementó el peso seco (9 g) de *Morus alba L.*, con respecto al testigo. A su vez Milanés *et al.* (2005) y Rasche-Álvarez *et al.* (2021) reportan efectos positivos en el peso seco cuando se aplicó humus sólido de lombriz en *Calendula officinalis L.* y *Matricaria recutita L.* Esto debido al contenido de vitaminas, enzimas, hormonas de crecimiento vegetal, macro y micronutrientes que tienen efecto en plantas medicinales (Prabha *et al.*, 2007). Para el caso de T2 Impulsor y T3 Ecomaxim a las doce semanas de evaluación, aunque hubo mayor peso húmedo y consecuentemente mayor peso seco, sin embargo, no hubo diferencias significativas en comparación con el T0 (testigo) en las variables mencionadas.

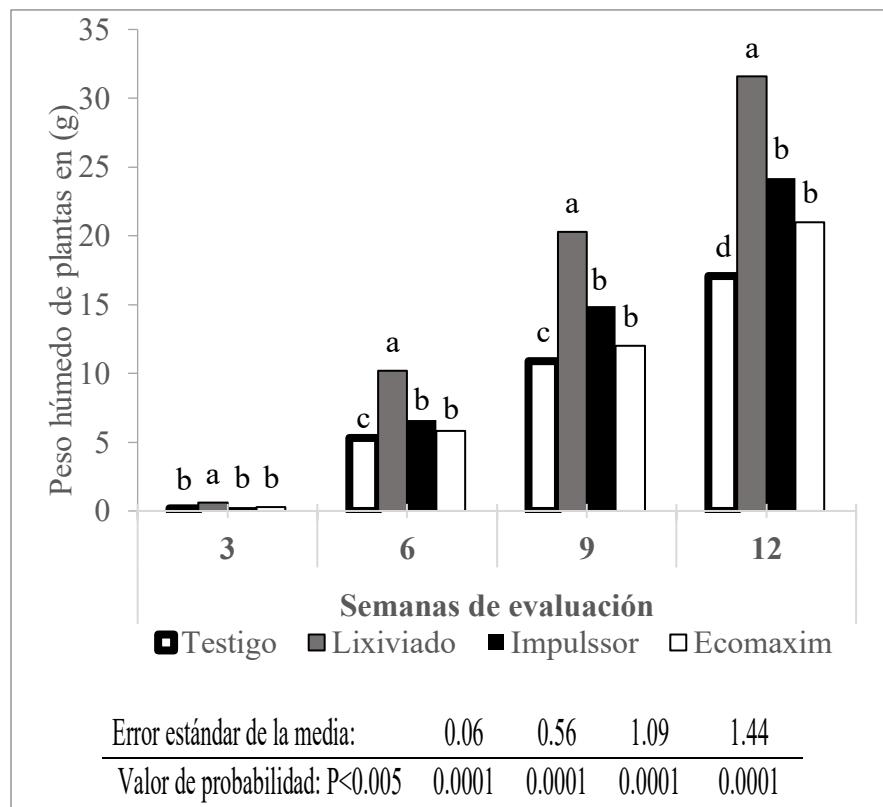


Figura 4. Efecto de fertilizantes foliares en el peso húmedo (g) de plantas de toronjil *A. mexicana* subespecie *mexicana* en doce semanas de crecimiento.

Figure 4. Effect of foliar fertilizers on the wet weight (g) of toronjil balm plants *A. mexicana mexicana* subspecies in twelve weeks of growth.

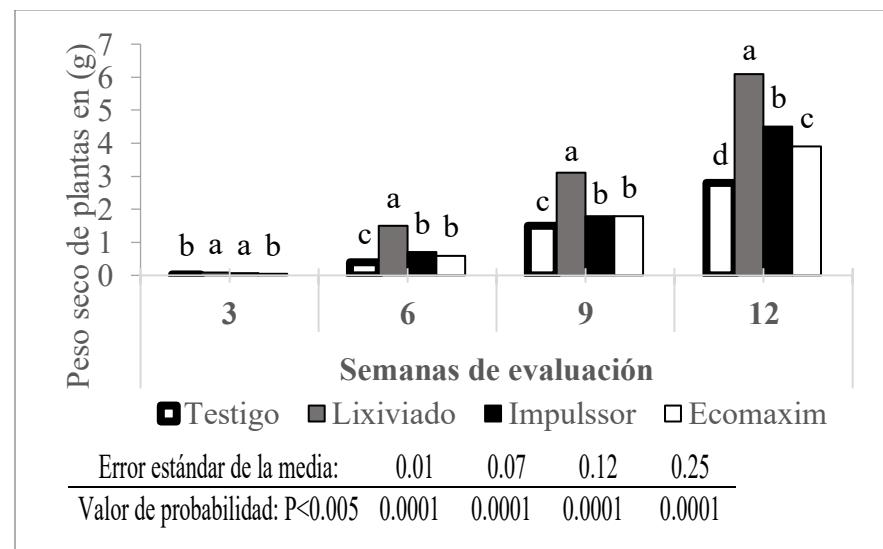


Figura 5. Efecto de fertilizantes foliares en el peso seco (g) de plantas de toronjil *A. mexicana* subespecie *mexicana* en doce semanas de crecimiento.

Figure 5. Effect of foliar fertilizers on the dry weight (g) of toronjil balm plants *A. mexicana mexicana* subspecies in twelve weeks of growth.

Finalmente, para la variable área foliar el tratamiento T1, (Lixiviado de lombriz) generó (457.52 cm^2), superó estadísticamente ($p \leq 0.05$), a los demás tratamientos T3: 323.6 cm^2 (Ecomaxim), T2: 352.5 cm^2 (IMPULSOOR) y T0: (Testigo, sin fertilizante) 295 cm^2 respectivamente, a las doce semanas de evaluación (Figura 6), esto concuerda con lo reportado Almaguer-López (2017) donde observa un incremento en el área foliar del cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) cuando se aplicó humus líquido. Milpa-Mejía *et al.* (2012) también reportan este efecto ($p \leq 0.01$) en el cultivo de *Iris xiphium L.*, variedad *Discovery* con respecto al testigo. Por otro lado, Cantero *et al.* (2015) encontraron un efecto positivo en la aplicación de lixiviado de lombriz en berenjena (*Solanum melongena L.*), por su parte Alcivar-Llivicura *et al.* (2021) y Cedeño-Solorzano *et al.* (2020) reportan este mismo efecto en pimiento. En general los resultados coinciden con Prabha *et al.* (2007) donde demuestran el efecto positivo de vermicomposta en plantas medicinales. La respuesta favorable de lixiviado de lombriz en el crecimiento y generación de hojas en los cultivos se le otorga a la absorción de nutrientes minerales, como el nitrógeno, por las plantas (Pant *et al.*, 2009). Para el caso de T2 Impulsor y T3 Ecomaxim generaron 352.5 cm^2 y 323.6 cm^2 de área foliar respectivamente a las doce semanas de evaluación, sin embargo, no hubo diferencias significativas en comparación con el T0 (testigo) que generó 295.2 cm^2 .

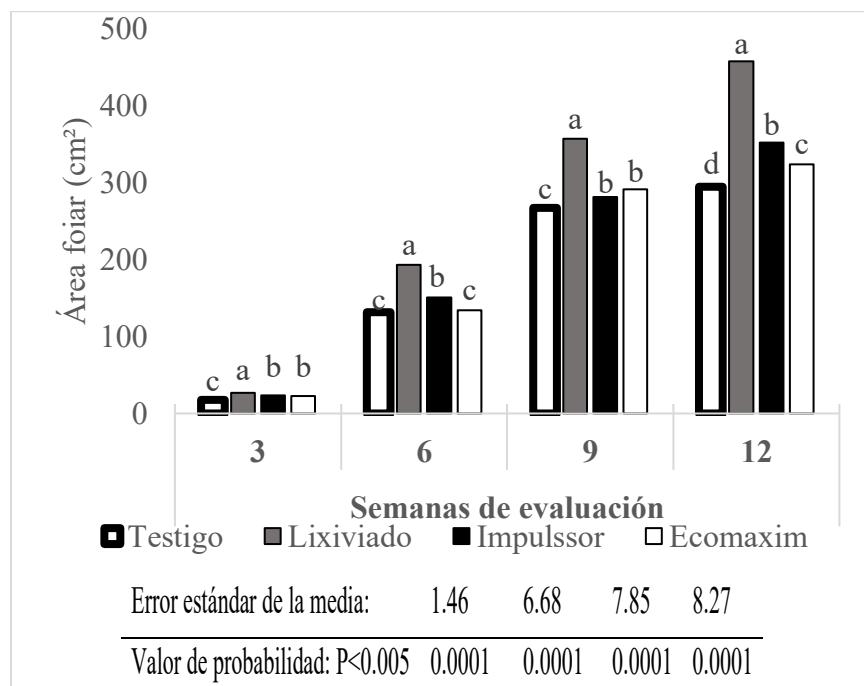


Figura 6. Efecto de fertilizantes foliares en el área foliar (cm^2) de plantas de toronjil *A. mexicana* subespecie *mexicana* en doce semanas de crecimiento.

Figure 6. Effect of foliar fertilizers on the leaf area (cm^2) of toronjil balm plants *A. mexicana mexicana* subspecies in twelve weeks of growth.

Los resultados positivos encontrados con la aplicación de lixiviado de lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*) en todas las variables morfológicas de las plantas de toronjil *A. mexicana* subespecie *mexicana* se deben al efecto que ejerce el fertilizante en la fisiología de la misma y esta se le atribuye a la estimulación de la planta por el contenido de fitohormonas bioestimuladoras que se encuentra en el lixiviado (Arteaga *et al.*, 2006; Domínguez *et al.*, 2010 y Lazo *et al.*, 2014), es viable desde el punto de vista medioambiental, donde en la aplicación de este insumo son aprovechados residuos orgánicos que son considerados desechos o fuentes potenciales de contaminación, los cuales se convierten en abonos orgánicos haciendo un reciclaje de nutrientes eficiente (Ramos-Agüero y Terry-Alfonso, 2014).

CONCLUSIONES

La aplicación foliar del lixiviado de humus de lombriz tuvo un efecto positivo sobre los indicadores del crecimiento vegetativo y productividad de *Agastache mexicana* subespecie *mexicana* en doce semanas de evaluación, en las variables altura de planta, número de rizomas, número de brotes, peso húmedo, peso seco y área foliar, los tratamientos que contenían Ecomaxim, Impulsor y Testigo, resultaron ser menos eficientes para el caso específico de este estudio. Los resultados obtenidos ayudan a conocer el manejo y nutrición de la especie, contribuyen a su producción y conservación sostenible, esto es relevante porque actualmente se comercializa de poblaciones silvestres.

LITERATURA CITADA

- Abreu, E., Araujo, E., Rodríguez, S., Valdivia, A., Fuentes, L., & Pérez, Y. (2018). Efecto de la aplicación combinada de fertilizante químico y humus de lombriz en *Capsicum annuum*. *Centro Agrícola*, 45(1), 52–61. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0253-57852018000100007&script=sci_arttext&tlang=pt
- Alcivar-Llivicura, M. F., Vera-Rodríguez, J. H., Arévalo Serrano, O. J., Arévalo S., B. D., Pachar O, L. E., Castillo R, C. B., Carlosama M, L. K., Arizabal C., J. A., & Paltán M, N. D. (2021). Aplicación de lixiviados de vermicompost y respuesta agronómica de dos variedades de pimiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 13(1), 50–58. <https://doi.org/10.24188/recia.v13.n1.2021.793>
- Almaguer-López, J. (2017). Respuesta del *Phaseolus vulgaris* L. (frijol común) a las aspersiones foliares de humus líquido. In N° (Vol. 10). www.eumed.net/rev/delos/29
- Aremu, A. O., Stirk, W. A., Kulkarni, M. G., Tarkowská, D., Turečková, V., Gruz, J., Šubrtová, M., Pěnčík, A., Novák, O., Doležal, K., Strnad, M., & Van Staden, J. (2015). Evidence of phytohormones and phenolic acids variability in garden-waste-derived vermicompost leachate, a well-known plant growth stimulant. *Plant Growth Regulation*, 75(2), 483-492. <https://doi.org/10.1007/s10725-014-0011-0>
- Arteaga, M., Garces, N., Grurido, F., Pino, J. A., Lopez, A., Menendez, J. L., & Cartaya, O. (2006). Evaluación de las aplicaciones foliares de humus líquido en el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) var. *amalia* en condiciones de producción. *Cultivos Tropicales*, 27(3), 95–101. [https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Arteaga%2C+M.%2C+Garces%2C+N.%2C+Grurido%2C+F.%2C+Pino%2C+J.+A.%2C+Lopez%2C+A.%2C+Menendez%2C+J.+L.%2C+%26+Cartaya%2C+O.+%282006%29.+EVALUACI%C3%93N+DE+LAS+APLICACIONES+FOLIARES+DE+HUMUS+L%3C8DQUIDO+EN+EL+CULTIVO+DEL+TOMATE+%28Lycopersicon+esculentum+Mill%29+VAR.+AMALIA+EN+CONDICIONES+DE+PRODUCCI%C3%93N+Cultivos+Tropicales%2C+27%283%29%2C+95%E2%80%93101.&btnG=">](https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Arteaga%2C+M.%2C+Garces%2C+N.%2C+Grurido%2C+F.%2C+Pino%2C+J.+A.%2C+Lopez%2C+A.%2C+Menendez%2C+J.+L.%2C+%26+Cartaya%2C+O.+%282006%29.+EVALUACI%C3%93N+DE+LAS+APLICACIONES+FOLIARES+DE+HUMUS+L%3C8DQUIDO+EN+EL+CULTIVO+DEL+TOMATE+%28Lycopersicon+esculentum+Mill%29+VAR.+AMALIA+EN+CONDICIONES+DE+PRODUCCI%C3%93N+Cultivos+Tropicales%2C+27%283%29%2C+95%E2%80%93101.&btnG=)
- Borges, J. A., Barrios, M., Chávez, A., & Avendaño, R. (2014). Efecto de la fertilización foliar con humus líquido de lombriz durante el aviveramiento de la morera (*Morus alba* L.). *Bioagro*, 26(3), 159-164. https://ve.scieno.org/scieno.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612014000300004
- Burgo-Bencomo, O. B., López Fernández, R., Izquierdo Vera, R., Juca Maldonado, F., García Saltos, M. B., & Capa Benítez, L. (2018). Estudio experimental en el uso del fertilizante orgánico y el químico. *Espacios*, 39, 9–9. <https://www.revistaespacios.com/a18v39n09/18390909.html>
- Cantero, J., Espitia, L., Cardona, C., Vergara, C., & Araméndiz, H. (2015). Efectos del compost y lombriabono sobre el crecimiento y rendimiento de berenjena *Solanum melongena* L. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 32(2), 56-67. <https://doi.org/10.22267/recia.153202.13>
- Cedeño-Solorzano, C. J., Torres García, A., & Héctor Ardisana, E. F. (2020). Respuestas de crecimiento, contenido de clorofila y rendimiento a la aplicación de lixiviado de vermicompost de estiércol bovino en el pimiento (*Capsicum annuum* L. híbrido Quetzal).

La Técnica: Revista de Las Agrociencias. ISSN 2477-8982, 11–20.
https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.2264

- Domínguez, J., Lazcano, C., & Gómez-Brandón, M. (2010). Influencia del vermicompost en el crecimiento de las plantas. Aportes para la elaboración de un concepto objetivo. *Acta Zoológica Mexicana*, 26(SPE2), 359–371. <https://doi.org/10.21829/azm.2010.262900>
- FAO/OMS. (2021). *Guía para el día mundial de la inocuidad de los alimentos. Alimentos inocuos ahora para un mañana saludable.* https://cdn.who.int/media/docs/default-source/campaigns-and-initiatives/world-food-safety-day-2021/guide-to-world-food-safety-day-2021-es.pdf?sfvrsn=79643104_58&download=true
- 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>
- Hieronimi, H. (2010). *Manual de plantas Medicinales.* <http://www.tierramor.org/PDF-Docs/ManualHuertoMed2010.pdf>
- Itelima, J. U., Bang, W. J., Onyimba, I. A., Sila, M. D., & Egbe, O. J. (2018). Bio-fertilizers as Key Player in Enhancing Soil Fertility and Crop Productivity: A Review. *Journal of Microbiology*, 2(1).
<https://www.mendeley.com/catalogue/a248cdf1-742d-3854-a3c0-7377f991721f/>
- Juárez, Z. N., Bach, H., Bárcenas-Pozos, M. E., & Hernández, L. R. (2021). Impact of the persistence of three essential oils with antifungal activities on stored wheat grains, flour, and baked products. *Foods*, 10(2), 213. <https://doi.org/10.3390/foods10020213>
- Juárez, Z. N., Hernández, L. R., Bach, H., Sánchez-Arreola, E., & Bach, H. (2015). Antifungal activity of essential oils extracted from *Agastache mexicana* ssp. *xolocotziana* and *Porophyllum linaria* against post-harvest pathogens. *Industrial Crops and Products*, 74, 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.058>
- Lazo, J. V., Ascencio, J., Ugarte, J., & Yzaguirre, L. (2014). Efecto del humusbol (humato doble de potasio y fósforo) en el crecimiento del maíz en fase vegetativa. *Bioagro*, 26(3), 143–152. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612014000300002
- Leos-Malagon, A. S., Saavedra-Cruz, R. D., & Viveros-Valdez, E. (2020). Aromatic plants possibly useful against sars-cov-2 (Covid-19). *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 39(6). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4406779>
- López Pérez, Y., Sosa Pérez, R., Méndez González, R., & Rodríguez Ledesma, Y. (2019). Foliar application of liquid earthworm humus in *Allium sativum* in Topes de Collantes, Cuba. *Centro Agrícola*, 46(2), 13–21.
<https://agsr.fao.org/search/en/providers/122436/records/64747bd5bf943c8c79861177>
- Martínez-Galicia, A. V. (2018). Evaluación de las actividades genotóxicas y citotóxicas *in vivo* del extracto acuoso y del 7-O-β-D-glucopiranósido de la acacetina, obtenidos de *Agastache mexicana* subsp *mexicana*. *Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio de Tesis DGBSDI.*
<https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000773822>
- Martínez-Gordillo, M., Bedolla-García, B., Cornejotenorio, G., Fragozo-Martínez, I., García-Peña, M. D. R., González-Gallegos, J. G., Lara-Cabrera, S. I., & Zamudio, S. (2017). Lamiaceae de México. *Botanical Sciences*, 95(4), 780–806.
<https://doi.org/10.17129/botsci.187>
- Martínez-Scott, M. M., & Ruiz-Hernández, J. (2018). Efecto de la aplicación de lixiviados de lombriz y ácidos húmicos en la producción de pimiento morrón (*Capsicum annuum* var. *Annum*). *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 5(15), 19–24.
https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias/vol5num15/Revista_de_Ciencias_Naturales_y_Agropecuarias_V5_N15.pdf#page=29
- Milanés, M., Rodríguez, H., Ramos, R., & Rivera, M. (2005). Efectos del compost vegetal y humus de lombriz en la producción sostenible de capítulos florales en *Calendula officinalis*

- L. y *Matricaria recutita* L. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 10(1), 0. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1028-47962005000100008&l
- Milpa-Mejía, S., González-Castellanos, A., Grenón-Cascales, G. N., & Vázquez-García, L. M. (2012). Cultivo en maceta de *Iris xiphium* l. (iris de holanda) con diferentes concentraciones de humus de lombriz y sus lixiviados. *Revista de La Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(2), 109–117. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-86652012000200009&script=sci_arttext
- Palma-Tenango, M., Sánchez-Fernández, R. E., & Soto-Hernández, M. (2021). A systematic approach to *Agastache mexicana* research: Biology, agronomy, phytochemistry, and bioactivity. *Molecules*, 26(12), 3751. <https://doi.org/10.3390/molecules26123751>
- Pant, A. P., Radovich, T. J. K., Hue, N. V., Talcott, S. T., & Krenek, K. A. (2009). Vermicompost extracts influence growth, mineral nutrients, phytonutrients and antioxidant activity in pak choi (*Brassica rapa* cv. Bonsai, Chinensis group) grown under vermicompost and chemical fertiliser. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(14), 2383–2392. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3732>
- Parabá-Guzmán, E. E., Nulfa, M. G. y, & Villanueva, E. J. R. (2021). Determinación de la composición química de las rocas minerales en las provincias O'Connor y Gran Chaco. *Ventana Científica Estudiantil*, 2(3). <https://dicyt.uajms.edu.bo/revistas/index.php/ventanacientifica-estudiantil/article/view/92>
- Pérez-González, J., Toral-Flores, A., Carreón-Amaya, J., Martínez-Ramírez J., L., Rodríguez-Rubalcaba, R. y, & Casas-Salas, J. F. (2005). Niveles de fertilización orgánica mediante humus en jamaica. *Scientia-CUCBA*, 14(1–2), 47–54. http://seaturtle.org/library/Enciso-PadillaI_2012_ScientiaCUCBA.pdf#page=49
- Polanco-Rodríguez, A. G., Magana Castro, T. V., Cetz Inuit, J., & Quintal Lopez, R. (2019). Uso de agroquímicos cancerígenos en la región agrícola de Yucatán, México. *Centro Agricola*, 46(2), 72–83. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0253-57852019000200072&script=sci_arttext
- Prabha, M. L., Jayraaj, I. A., Jayaraj, R., & Rao, D. S. (2007). Effect of vermicompost and compost on growth parameters of selected vegetable and medicinal plants. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology and Environmental Sciences*, 9(2). https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Effect+of+vermicompost+and+compost+on+growth+parameters+of+selected+vegetable+and+medicinal+plants.+Asia+n+Journal+of+Microbiology%2C+Biotechnology+and+Environmental+Sciences%2C+9%282%29.&btnG=
- Ramírez-Mandujano, C. A., Esquivel-Paz, G., Gudiño-César, E., & J. P. Rojas-Murillo. (2016). Evaluación de fertilizantes foliares orgánicos e inorgánicos en zarzamora (*Rubus* sp.) cv. ‘Tupi.’ *Ciencia Nicolaita*, 67. <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/article/view/309>
- Ramos-Agüero, D., & Terry-Alfonso, E. (2014). Generalidades de los abonos orgánicos: Importancia del Bocashi como alternativa nutricional para suelos y plantas. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 52–59. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193232493007>
- Rasche-Alvarez, J. W., Fatecha-Fois, D. A., Morán-Fariña, L. M., Rojas-Sosa, D. R., Armoa-Báez, D. E., Santacruz-Escobar, S. L., Rasche-Alvarez, J. W., Fatecha-Fois, D. A., Morán-Fariña, L. M., Rojas-Sosa, D. R., Armoa-Báez, D. E., & Santacruz-Escobar, S. L. (2021). Sources and doses of organic amendments in the production of moringa. *Revista Científica de La UCSA*, 8(2), 13–20. <https://doi.org/10.18004/ucsav2409-8752/2021.008.02.013>
- Reyes-Pérez, J. J., Rivero-Herrada, M., Solórzano-Cedeño, A. E., Carballo-Méndez, F. de J., Lucero-Vega, G., & Ruiz-Espinoza, F. H. (2021). Aplicación de ácidos húmicos, quitosano y hongos micorrízicos como influyen en el crecimiento y desarrollo de pimiento. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.833>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9(12), 671–675. <https://www.nature.com/articles/nmeth.2089#citeas>
- Silva-Castellano, A. P., Magallán-Hernández, F., Vergara-Pineda, S., Ramírez-Segura, O., & Queijeiro-Bolaños, M. (2021). Protocolo de propagación por semilla de *Clinopodium mexicanum*, una planta medicinal nativa de México. *Agrociencia*, 55(5), 433–450. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i5.2519>

Recibido:
16/mayo/2024

Aceptado:
20/noviembre/2024

- Ticona, C., & Choque, C. (2021). Efecto del lixiviado del lombricompost en hijuelos de banano (*Mussa* spp) en condiciones de vivero. *Apthapi*, 7(2). <https://apthapi.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/99>
- Torres-Díaz, G. (2019). Caracterización de la semilla, composición química del aceite esencial y efecto de la fertilización nitrogenada en *Agastache mexicana* ssp. *mexicana*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/bitstream/123456789/2101/1/191650.pdf>
- Trinidad-Santos, A., & Aguilar-Manjarrez, D. (1999). *Fertilizacion foliar, un respaldo importante en el rendimiento de los cultivos*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57317309>
- Ventura-Martínez, R., Rodríguez, R., González-Trujano, M. E., Ángeles-López, G. E., Déciga-Campos, M., & Gómez, C. (2017). Spasmogenic and spasmolytic activities of *Agastache mexicana* ssp. *mexicana* and *A. mexicana* ssp. *xolocotziana* methanolic extracts on the guinea pig ileum. *Journal of Ethnopharmacology*, 196, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2016.12.023>
- Villalba-Martínez, C. J., López Romero, R. M., Trinidad Santos, A., Quevedo Nolasco, A., Muratalla Lúa, A., Villalba Martínez, C. J., López Romero, R. M., Trinidad Santos, A., Quevedo Nolasco, A., & Muratalla Lua, A. (2018). Glucósidos en respuesta a dos fuentes de nutrición en *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 411. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.318>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

COMPONENTES ANTIOXIDANTES Y CALIDAD NUTRICIONAL DE AGUAMIÉL DE DIVERSOS CULTIVARES DE AGAVE PULQUERO (*Agave salmiana* Y *A. mapisaga*)

ANTIOXIDANT COMPONENTS AND NUTRITIONAL QUALITY OF AGUAMIÉL OF SOME CULTIVARS FROM AGAVE PULQUERO (*Agave salmiana* AND *A. mapisaga*)

Hernández Ramos, L., M. del R. García Mateos y M.C. Ybarra Moncada

COMPONENTES ANTIOXIDANTES Y CALIDAD NUTRICIONAL DE AGUAMIÉL

DE DIVERSOS CULTIVARES DE AGAVE PULQUERO (*Agave salmiana* Y *A. mapisaga*)

ANTIOXIDANT COMPONENTS AND NUTRITIONAL QUALITY OF AGUAMIÉL OF

SOME CULTIVARS FROM AGAVE PULQUERO (*Agave salmiana* Y *A. mapisaga*)



Componentes antioxidantes y calidad nutricional de aguamiel de diversos cultivares de agave pulquero (*Agave salmiana* y *A. mapisaga*)

Antioxidant components and nutritional quality of aguamiel of some cultivars from agave pulquero (*Agave salmiana* and *A. mapisaga*)

Lyzbeth Hernández Ramos,
María del Rosario García
Mateos, María Carmen Ybarra
Moncada

COMPONENTES
ANTIOXIDANTES Y
CALIDAD NUTRICIONAL
DE AGUAMIEL DE
DIVERSOS CULTIVARES
DE AGAVE PULQUERO
(*Agave salmiana* Y *A.
mapisaga*)

ANTIOXIDANT
COMPONENTS AND
NUTRITIONAL QUALITY
OF AGUAMIEL OF SOME
CULTIVARS FROM AGAVE
PULQUERO (*Agave salmiana*
A. mapisaga)

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 275-293. Enero 2025

DOI:
10.18387/polbotanica.59.18

Lyzbeth Hernández-Ramos <http://orcid.org/0000-0002-6621-2116>
Universidad Autónoma Chapingo (UACH) - Departamento de Fitotecnia, Km. 38.5,
Carretera México-Texcoco 56230, Chapingo, Estado de México, México;
Estancia posdoctoral. Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías
(CONAHCYT), Ciudad de México 03940, México.

Ma. del Rosario García-Mateos. Autora de correspondencia: rosgar08@hotmail.com
<http://orcid.org/0000-0003-2552-3951>

Universidad Autónoma Chapingo (UACH) - Departamento de Fitotecnia, Km. 38.5,
Carretera México-Texcoco 56230, Chapingo, Estado de México, México;

Ma. Carmen Ybarra-Moncada <http://orcid.org/0000-0003-4291-2326>
Universidad Autónoma Chapingo - Departamento de Ingeniería Agroindustrial,
Chapingo, Estado de México, México

RESUMEN: La savia del *agave* ha sido consumida por los mexicanos desde la época prehispánica como una bebida llamada “aguamiel”; actualmente, su consumo ha disminuido por la preferencia de bebidas saborizadas, aunado al desconocimiento de las propiedades funcionales. Son pocos los estudios que refieren el valor nutricional y nutracéutico del aguamiel de diferentes cultivares de *agave* pulquero, pese a la gran variabilidad morfológica y grados de domesticación del género *Agave*. Por ello, el objetivo de la investigación fue evaluar las características físico-químicas, los componentes nutricionales y antioxidantes del aguamiel de diversos cultivares de *A. salmiana* y *A. mapisaga*, recolectados en los estados de Hidalgo y México, con el fin de identificar aquellos de mayor atributo nutracéutico y revalorizar su consumo. En promedio, los resultados mostraron que el aguamiel es fuente de azúcares (105.50 g L⁻¹), proteína (8.20 g L⁻¹), K (1829.78 mg L⁻¹), Ca (159.70 mg L⁻¹), Fe (19.17 mg L⁻¹), Cu (5.12 mg L⁻¹), vitamina C (323.17 mg EAA L⁻¹) y compuestos fenólicos (325.66 mg EAG L⁻¹). La capacidad antioxidante fue mayor en el aguamiel de *A. salmiana* del Estado de Hidalgo. El aguamiel de *A. salmiana* cultivar *cerro*, de color más oscuro (menor valor *hue*) y menor valor energético (300.70 kcal L⁻¹), presentó la mayor actividad antioxidante (2576.29 µM ET L⁻¹), lo que mostró una fuerte correlación con el alto contenido de proteína (12.00 g L⁻¹), Ca (409.97 mg L⁻¹) y compuestos fenólicos (478.28 mg EAG L⁻¹). En general, el aguamiel puede considerarse como bebida funcional por su calidad nutricional y contenido de componentes antioxidantes.

Palabras clave: savia de agave, proteína, minerales, compuestos fenólicos, actividad antioxidante.

ABSTRACT: Since the Prehispanic period, the sap of the agave-pulquero has been consumed by Mexicans as a beverage called “aguamiel”. Nowadays its consumption has decreased due to the greater consumer preference for flavored drinks, coupled with the lack of knowledge functional properties. Despite the great morphological variability and degrees of domestication shown by genus agave, little is known about nutritional and nutraceutical value of the aguamiel of different agave-pulquero cultivars. Therefore, the aim of this research was to evaluate physicochemical characteristics, nutritional and

antioxidant compounds of aguamiel from cultivars of *Agave salmiana* and *A. mapisaga*, collected in the states of Hidalgo and Mexico. This information could help identify those cultivars with major nutraceutical properties and revalue aguamiel consumption. On average the results showed that the aguamiel is a source of sugars (105.50 g L⁻¹), protein (8.20 g L⁻¹), K (1829.78 mg L⁻¹), Ca (159.70 mg L⁻¹), Fe (19.17 mg L⁻¹), Cu (5.12 mg L⁻¹), vitamin C (323.17 mg L⁻¹) and phenolic compounds (325.66 mg GAE L⁻¹). Aguamiel showed moderate antioxidant capability, being higher in the aguamiel of *A. salmiana* from Estado de Hidalgo. The aguamiel from *A. salmiana* cultivar *cerro*, with a darker color (lower hue) and lower energy value (300.70 kcal L⁻¹), presented greater antioxidant capacity (2576.29 µM TE L⁻¹) associated with a strong significant correlation between phenolic content (478.28 mg GAE L⁻¹), protein (12.00 g L⁻¹) and Ca (409.97 mg L⁻¹). In conclusion, the aguamiel could be considered as a functional beverage because of its nutritional quality and content of antioxidant components.

Key words: *Agave* spp, protein, minerals, phenolic compounds, antioxidant activity.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe mayor interés por consumir alimentos naturales, en lugar de procesados, por su valor nutritivo y nutracéutico y los aportes en beneficios de la salud, debido al alto contenido de compuestos bioactivos, que juegan un papel importante en la prevención de enfermedades crónico degenerativas en la población, lo que ha incrementado la demanda de alimentos funcionales (Tadesse & Emire, 2020). Afortunadamente, los alimentos y bebidas derivadas de plantas nativas pueden desempeñar un papel importante en la prevención de enfermedades, debido al contenido de ingredientes nutracéuticos (Sohaimy, 2012).

El aguamiel es un producto natural con atributos nutricionales (azúcares, proteínas, aminoácidos, vitaminas y minerales) y potencial nutracéutico atribuido principalmente a la presencia de compuestos fenólicos, fructooligosacáridos, saponinas y vitamina C, por lo que podría considerarse una bebida funcional o nutracéutica, con propiedades medicinales (actividad antiinflamatorio, antioxidante, anticancerígena, antimicrobiana, prebiótica, entre otras) (Castañeda-Ovando *et al.*, 2023; Santos-Zea *et al.*, 2012; Tovar-Robles *et al.*, 2011). El aguamiel es la savia que se obtiene mediante el capado previo del maguey, que consiste en la eliminación del cogollo (meyolote) o meristemo del agave para evitar que brote el escapo floral, conocido también como quioye, con el fin de dejar una cavidad central denominada cajete; seguido de un periodo de maduración y concentración de las reservas de carbohidratos de la planta, conocido como añejamiento o reposo que dura entre uno a doce meses; transcurrido este periodo, se pica la cavidad central y se dejan los restos de las pencas en el centro de la planta por ocho días, con el fin de favorecer la salida de aguamiel y la acumulación en el cajete; después se inicia el raspado, esta última práctica es crucial por la cantidad y calidad del aguamiel, proceso de extracción del aguamiel que se realiza diariamente, dos veces (por la mañana y al anochecer), mediante la succión oral utilizando una calabaza grande y seca conocida como acocote (Valdivieso Solís *et al.*, 2021; Villarreal-Morales *et al.*, 2019).

La producción de aguamiel es principalmente reservada para la elaboración de pulque y jarabes de agave, representa una posible alternativa de consumo en regiones donde la calidad del agua no es buena y la disponibilidad de carne es limitada (Ortiz-Basurto *et al.*, 2008); sin embargo, actualmente su consumo ha disminuido, asociado a una campaña de desprestigio hacia el pulque y a la competencia con otras bebidas, que ha repercutido en la disminución de la superficie cultivada con maguey pulquero en algunas regiones del país (Álvarez-Ríos *et al.*, 2020).

Por otra parte, el volumen producido de aguamiel y su composición fisico-química están influenciados principalmente por la etapa de maduración de la planta, el ambiente o condiciones edafoclimáticas donde crece y por el tipo de especies de agave que lo producen (Villarreal-Morales *et al.*, 2019; Leal-Díaz *et al.*, 2015; Ortiz-Basurto *et al.*, 2008). En este sentido, es importante señalar que México es considerado centro de origen del género Agave, con más de 200 especies (Narváez Suárez *et al.*, 2016); aunque, no todas las especies de agave son adecuadas para la extracción de aguamiel, destacando como las principales especies pulqueras *A. mapisaga* y *A. salmiana* (Santos-Zea *et al.*, 2012). De acuerdo con Mora-López *et al.* (2011), dentro de estas especies pulqueras, el mayor número de variedades y cultivares corresponde a *A. salmiana*.

con alrededor de 47 variantes con amplia variabilidad morfológica. Respecto a *A. mapisaga*, esta especie presenta menor variación morfológica, cultivado en condiciones agronómicas. Actualmente, existen estudios referentes al valor nutricional y contenido de ingredientes nutracéuticos del aguamiel (Castañeda-Ovando *et al.*, 2023; Peralta-García *et al.*, 2020; Leal-Díaz *et al.*, 2015; Santos-Zea *et al.*, 2012; Tovar-Robles *et al.*, 2011; Ortiz-Basurto *et al.*, 2008); sin embargo, a pesar de la diversidad de especies y cultivares de agave en México, no existen estudios sobre sus propiedades en los diferentes cultivares de agave pulquero. Por tanto, es importante ampliar las investigaciones de la calidad nutricia y nutracéutica del aguamiel, para seleccionar aquellas especies y cultivares de agave por sus atributos antioxidantes y nutricionales, información que podría ayudar a revalorizar el consumo del aguamiel, así como, el cultivo del maguey pulquero, patrimonio natural y cultural de México. Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación fue determinar las características fisicoquímicas, nutricionales y nutracéuticas del aguamiel de diferentes cultivares de *A. salmiana* y *A. mapisaga*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material de estudio

Se recolectaron nueve muestras de aguamiel de dos especies de maguey pulquero (*Agave mapisaga* Trel y *A. salmiana* Otto ex Salm-Dyck), ubicadas en diferentes localidades de Hidalgo y del Estado de México de la República Mexicana.

Las muestras fueron recolectadas de diferentes cultivares xamini, cerro, penca ancha y cimarrón (*A. salmiana*) de magueyales de Durango, Dabotha, El Cardonal, Hidalgo, en la región del Valle de Mezquital (Figura 1), de clima BS1kw(w) semiseco templado con lluvias en verano; otras muestras de aguamiel se obtuvieron de los cultivares manso (cultivar dominante, por lo que se recolectó en tres localidades), cenizo y carrizo (*A. mapisaga*) recolectados de magueyales de diversas localidades de los municipios de Otumba, Teotihuacan, Axapusco y Texcoco, Estado de México, con clima C(w1) (w) b(i') templado subhúmedo y semifrío, con lluvias en verano.

El aguamiel (aproximadamente 10 L) de cada cultivar (Cuadro 1) se obtuvo de plantas en madurez comercial, en el tercer mes del periodo de cosecha (tiempo de raspado), raspadas entre 7 y 9 de la mañana, con muestras de 1 L para su análisis; el muestreo se realizó durante 5 días. Las muestras de aguamiel fueron colocadas en botellas de polipropileno, etiquetadas y refrigeradas para disminuir el metabolismo fermentativo. Inmediatamente fueron trasladadas al laboratorio para su congelación a -22 °C hasta su análisis.



Figura 1. Agaves pulqueros utilizados para la obtención de aguamiel: *A. mapisaga* Trel (cultivar *cenizo* y *carrizo*) y *A. salmiana* (cultivar *xamini*, *penca ancha*, *cerro*, *corriente* o *cimarrón* y *manso*). Cultivar *manso*:¹ Santa Ma. Aticpac, Axapusco, Edo. de México; ²Santiago Zacualapan, Teotihuacan, Edo. de México; ³San Marcos, Otumba, Edo. de México.

Figure 1. Pulquero agaves used to obtain aguamiel: *A. mapisaga* Trel (cultivar *cenizo* y *carrizo*) and *A. salmiana* (cultivars *xamini*, *penca ancha*, *cerro*, *corriente* o *cimarrón* y *manso*). Cultivar *manso*: ¹ Santa Ma. Aticpac, Axapusco, Mexico State; ² Santiago Zacualupan, Teotihuacan, Mexico State; ³ San Marcos, Otumba, Mexico State.

Cuadro 1. Identificación y localización geográfica de las especies de agave pulquero utilizadas para la obtención de aguamiel

Table 1. Identification and geographical location of the pulquero agave species used to obtain aguamiel

| Especie | Cultivar | Lugar de recolecta | Localización | Herbario y número de registro |
|--------------------|-------------|-----------------------------|--|--|
| <i>A. salmiana</i> | Xamini | El Cardonal, Hgo. | 20°32'39.42"N, 99° 4'43.80"O 2022 msnm | MEXU, UNAM: 1388318,1388332 y 1388333 |
| <i>A. salmiana</i> | Cerro | El Cardonal, Hgo. | 20°32'29.40"N, 99° 4'24.54"O 2015 msnm | Preparatoria Agrícola, UACH: 31460 |
| <i>A. salmiana</i> | Cimarrón | El Cardonal, Hgo. | 20°32'27.00"N, 99° 4'27.42"O 2007 msnm | MEXU, UNAM: 1388337 y 1388338 |
| <i>A. salmiana</i> | Penca ancha | El Cardonal, Hgo. | 20°32'45.06"N, 99° 4'40.20"O 2015 msnm | MEXU, UNAM: 1388339 y 1388343 |
| <i>A. salmiana</i> | Manso | Otumba, Edo. de México | 19°41'49.92"N, 98°45'33.88"O 2364 msnm | Preparatoria Agrícola, UACH: 31392 |
| <i>A. salmiana</i> | Manso | Teotihuacan, Edo. de México | 19°42'12.09"N, 98°56'4.91"O 2280 msnm | Preparatoria Agrícola, UACH: 31391 |
| <i>A. salmiana</i> | Manso | Axapusco, Edo. de México | 19°52'34.96"N, 98°44'26.13"O 2379 msnm | MEXU, UNAM: 1388320 y 1388345 |
| <i>A. mapisaga</i> | Cenizo | Teotihuacan, Edo. de México | 19°42'56.82"N, 98°54'49.12"O 2328 msnm | Preparatoria Agrícola, UACH: 31390 |
| <i>A. mapisaga</i> | Carrizo | Texcoco, Edo. de México | 19°28'56.35"N, 98°50'52.61"O 2365 msnm | Preparatoria Agrícola, UACH: 30189 |

Herborización e identificación de los agaves pulqueros

De las plantaciones donde se obtuvo el aguamiel, se recolectó el material vegetal de los agaves encontrados en floración o fructificación para la preparación de un ejemplar de herbario por cultivar para su posterior identificación taxonómica y registro de ejemplares (Cuadro 1). De cada ejemplar se registró su ubicación con coordenadas geográficas, altitud, tipo de vegetación y abundancia relativa del taxón. La identificación taxonómica se realizó en el Herbario Jorge Espinosa Salas (JES) del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo y en el Herbario Nacional de México (MEXU) del Instituto de Biología de la UNAM.

Caracterización fisicoquímica del aguamiel

La medición de color se realizó mediante un colorímetro Hunter Lab MiniScan XE Plus (modelo 45/0-L RestonVa, USA), con un iluminante D65, un ángulo del observador de 10° y la escala CIE L* a* b*. Debido a que la determinación de esta variable se realizó en una muestra líquida, el aguamiel se colocó en una cápsula de vidrio del Hunter Lab especial para líquidos; la cápsula se situó sobre una base, la distancia entre ésta y el punto de emisión de luz del equipo estuvo previamente estandarizada. Se cubrió la cápsula con un cilindro de papel negro para evitar la incidencia de luz sobre el líquido. Se calculó el índice de saturación del color (*Croma*) y el ángulo de tono (*Hue*) de acuerdo con lo descrito por McGuire (1992).

El pH se determinó en un potenciómetro (H1 2221 Hanna Instruments, Woonsocket, RI, USA); los sólidos solubles totales (SST, °Brix) fueron medidos con un refractómetro (PAL-3, ATAGO®, Japon); y los azúcares reductores directos (ARD), sacarosa y azúcares totales (AT) por la prueba de Lane-Eynon, mediante la solución Fehling–Soxhlet, descrito por la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (AOAC, 2005).

Contenido mineral

La cuantificación se realizó de acuerdo con los métodos señalados por Perkin-Elmer Corporation (1996), con modificaciones. Las muestras de aguamiel se trataron con ácido nítrico a 50% (v/v) en una digestión húmeda a 95 °C por 45 min (Sistema de digestión Tecator, TD20 Digestion System Tubes and Racks, Foss, USA). Posteriormente, se realizó una segunda etapa de digestión/oxidación mediante la adición de peróxido de hidrógeno (30 % p/v) para su incubación a 95 °C (15 min). Después de la digestión total, cada muestra se aforó a 50 mL con agua desionizada. Se determinaron los contenidos de Cu, Zn, Fe, Ca, Mg, K y Na mediante espectrofotometría de absorción atómica (700 AAnalyst, PerkinElmer, USA).

Análisis proximal

Los contenidos de humedad (g L^{-1}), cenizas (g L^{-1}), proteína cruda (g L^{-1}) y carbohidratos (g L^{-1}) se determinaron de acuerdo con la metodología establecida por la AOAC (2005). El valor energético (g L^{-1}) del aguamiel se determinó mediante los factores de Atwater (AOAC, 2005).

Determinación de compuestos fenólicos solubles totales

El contenido de compuestos fenólicos se determinó por el método descrito por Joaquín-Cruz *et al.* (2015), con algunas modificaciones. Cada muestra de aguamiel se ajustó a una concentración de 10% en metanol acidificado a 1% con ácido trifluoroacético, la mezcla se sonicó por 30 min con un equipo de ultrasonido (Cole Parmer 8892, Illinois, USA). La mezcla se dejó reposar en oscuridad por 20 min a temperatura ambiente (~22 °C). Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 1431 x g por 15 min (Cole Parmer YV-17414-21, Illinois, USA) para facilitar la separación del sobrenadante y residuo. El sobrenadante fue recuperado y el residuo sometido a dos extracciones más, usando como disolvente de extracción metanol: ácido acético: agua en una proporción de 10:1:9 (v/v/v). Los sobrenadantes de las tres extracciones se unieron y se cuantificó el contenido de compuestos fenólicos totales por el método de Folin-Ciocalteu (Singleton & Rossi, 1965). Una alícuota de 1 mL del extracto se mezcló con 10 mL de agua y 1 mL del reactivo de Folin-Ciocalteu (2 N, Sigma - Aldrich), se dejó reposar por 2 min. Finalmente, a la mezcla se le adicionaron 4 mL de una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3) a 7.5% (p/v) y se dejó reposar en oscuridad a temperatura ambiente por 60 min; Se tomó lectura de la absorbancia a 765 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). La curva de calibración ($y = 5.9332x - 0.0375, R^2 = 0.995$) se construyó con ácido gálico como referencia. El contenido total de compuestos fenólicos se expresó en mg equivalentes de ácido gálico por litro de aguamiel (mg EAG 100 L^{-1}).

Cuantificación de flavonoides

Las muestras de aguamiel se disolvieron en metanol a 80% v/v para obtener una concentración de 40% (v/v). El contenido de flavonoides se cuantificó de acuerdo con el método Dowd, adaptado por Arvouet-Grand *et al.* (1994). A 2 mL del extracto metanólico se le agregaron 0.5 mL de AlCl_3 (2% p/v) y agua destilada hasta un volumen final de 25 mL. La mezcla se homogeneizó en un vortex y se incubó durante 30 min a temperatura ambiente, en oscuridad. Se leyó la absorbancia a una longitud de onda de 425 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). La curva estándar se construyó con quercetina como referencia ($y = 5.4696x + 0.0018, R^2 = 0.996$). Los resultados se expresaron en mg equivalentes de quercetina en un litro de aguamiel (mg EQ L^{-1}).

Cuantificación de vitamina C

La concentración de vitamina C (ácido ascórbico) se determinó por espectrofotometría siguiendo el método descrito por Burdurlu *et al.* (2006), con algunas modificaciones. Se tomó 1 mL del aguamiel y se aforó a 10 mL con ácido metafosfórico a 3% (p/v). En un matraz erlenmeyer se

colocaron 2 mL de la mezcla anterior, 2 mL de regulador de acetatos (solución buffer pH = 4, ácido acético glacial: acetato de sodio a 5% p/v), 3 mL de 2,6-dicloroindofenol y 15 mL de xileno, en sucesión rápida y agitación vigorosa. La solución se transfirió a un embudo de separación para eliminar la fase acuosa. A la fase de xileno se le adicionó un gramo de cristales de Na₂SO₄ anhidro, para eliminar trazas de agua; posteriormente, se leyó su absorbancia a una longitud de onda de 520 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s, Thermo Scientific, USA). El contenido de vitamina C fue calculado mediante una curva estándar de ácido ascórbico ($y = -2.666x + 0.567$, $R^2 = 0.995$), los resultados se expresaron en mg equivalentes de ácido ascórbico por litro (mg EAA L⁻¹).

Evaluación de la actividad antioxidante

La actividad antioxidante se determinó por el método del radical libre DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) descrito por Brand-Williams *et al.* (1995). El aguamiel fue diluido a una concentración de 40% (v/v) en metanol a 80% v/v. Para la reacción de reducción del DPPH, 0.1 mL del extracto metanólico se mezcló con 2.9 mL de solución de DPPH (6 x 10⁻⁵ M). La mezcla se mantuvo en reacción en oscuridad por 30 min a temperatura ambiente, después la absorbancia se midió a 517 nm en un espectrofotómetro (Genesys 10s). Como referencia se realizó una curva estándar de Trolox ($y = 76.889x + 2.2556$, $R^2 = 0.997$). Los resultados se expresaron en μM equivalentes de trolox por litro de aguamiel (μM ET L⁻¹). La actividad antioxidante de cada muestra se determinó por el porcentaje de reducción de DPPH (% $DPPH_{Inhibido} = (\text{Abs}_{\text{blanco}} - \text{Abs}_{\text{muestra}}) \times 100 / \text{Abs}_{\text{blanco}}$).

Análisis estadístico

Los resultados de la caracterización de los diferentes tipos de aguamiel se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) de acuerdo con un diseño completamente al azar con nueve tratamientos y comparación de medias de tratamientos (Tukey, P ≤ 0.05). La unidad experimental consistió en un litro de aguamiel. La relación entre las características físico-químicas, nutricionales y nutracéuticas del aguamiel fueron determinadas por el coeficiente de correlación de Pearson mediante el programa Statistical Analysis System (SAS 9.0 for Windows). Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales con la finalidad de agrupar las muestras de aguamiel por sus características mediante el programa The Unscrambler X 10.3 (Camo Process AS, Oslo, Norway).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físico-químicas

El análisis estadístico mostró diferencias significativas (P ≤ 0.05) en los atributos de color del aguamiel entre cultivares, especies y origen (Cuadro 2). Las muestras de aguamiel presentaron valores menores (25%) de luminosidad (L*) (brillantez de color), lo que permitió formar dos grupos: 1) aguamiel de color más claro (12.5 % < L* < 25%) donde se ubicó el aguamiel de los cultivares *manso*, *xamini*, *carrizo*, *cimarrón* y *penca ancha*, y 2) aguamiel más oscuro (L* < 12.5%), recolectado de los cultivares *cenizo* y *cerro* (Figura 2).

Cuadro 2. Atributos de color en aguamiel de *Agave salmiana* (cultivares xamini, cerro, cimarrón, penca ancha y manso) y *A. mapisaga* (cultivares carrizo y cenizo), recolectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo, México.

Table 2. Color attributes of aguamiel of *Agave salmiana* (cultivars xamini, cerro, cimarrón, penca ancha and manso) and *A. mapisaga* (cultivars carrizo and cenizo), obtained in different locations from States of Mexico and Hidalgo, Mexico.

| Especie | Cultivar* | Luminosidad (%) | Ángulo de tono (°Hue) | Índice de saturación (Croma) |
|--------------------|--------------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|
| <i>A. salmiana</i> | Xamini ¹ | 20.22 ± 0.17 bcd | 69.97 ± 5.31 abc | 1.97 ± 0.46 cd |
| <i>A. salmiana</i> | Cerro ¹ | 12.04 ± 0.17 f | 53.49 ± 4.35 d | 1.12 ± 0.14 e |
| <i>A. salmiana</i> | Cimarrón ¹ | 18.63 ± 0.18 de | 74.44 ± 1.67 ab | 2.64 ± 0.04 bc |
| <i>A. salmiana</i> | Penca ancha ¹ | 16.94 ± 0.07 e | 61.10 ± 3.98 cd | 1.07 ± 0.04 e |
| <i>A. salmiana</i> | Manso ² | 21.85 ± 0.04 ab | 79.90 ± 0.58 a | 4.66 ± 0.06 a |
| <i>A. salmiana</i> | Manso ³ | 19.46 ± 0.31 cd | 74.76 ± 3.05 ab | 2.31 ± 0.16 bc |
| <i>A. salmiana</i> | Manso ⁵ | 23.04 ± 0.50 a | 78.02 ± 0.99 a | 4.00 ± 0.27 a |
| <i>A. mapisaga</i> | Cenizo ⁴ | 11.83 ± 0.52 f | 65.15 ± 7.49 bc | 1.15 ± 0.20 de |
| <i>A. mapisaga</i> | Carrizo ⁶ | 20.95 ± 2.28 bc | 76.12 ± 5.27 a | 2.93 ± 1.00 b |
| DHS\$ | | 1.93 | 10.16 | 0.82 |

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Daboxtha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquinahuac, Texcoco, Méx. Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. \$DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.



Figura 2. Aguamiel obtenido de *Agave salmiana* (cultivares xamini, cerro, cimarrón o corriente, penca ancha y manso) y *A. mapisaga* (cultivares carrizo y cenizo), recolectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo, México.

Figure 2. Aguamiel obtained from *Agave salmiana* (cultivars xamini, cerro, cimarron or corriente, penca ancha and manso) and *A. mapisaga* (cultivars carrizo and cenizo), collected in different locations from States of Mexico and Hidalgo, Mexico.

Los valores de *Hue* asociados con la percepción de color fueron menores a 80°, observándose dos grupos: aguamiel color amarillo (cultivares *carrizo*, *cimarrón* y *manso*) con valores de *hue* entre 70° y 80°; y aguamiel de color amarillo-marrón (*xamini*, *penca ancha*, *cenizo* y *cerro*) con *hue* menor a 70°; sin embargo, todas las muestras de aguamiel presentaron bajos valores de *croma* (Cuadro 2), lo que indicó poca pureza de color, es decir, que el color estuvo más cerca del gris (Figura 2).

También se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en las características fisicoquímicas (pH, SST, ARD, sacarosa y AT) del aguamiel entre los diferentes cultivares, especies y origen (Cuadro 3). El aguamiel del cultivar *cenizo* (*A. mapisaga*) fue estadísticamente superior en el contenido de SST y la concentración de AT en comparación al aguamiel de los otros cultivares, con 93.45% de sacarosa en AT. En contraste, el aguamiel obtenido del cultivar *manso* (*Agave salmiana*) de Axapusco, Estado de México, presentó el mayor contenido de ARD (76.83 g L⁻¹). Las variaciones de SST y AT entre cultivares pueden deberse a los diferentes tiempos de añejado del maguey (reposo de la planta después de ser “capada” para inducir la producción de aguamiel), práctica agrícola que permite la maduración de las hojas centrales y aumento del contenido de azúcares totales (AT) en la savia (Lappe-Oliveras *et al.*, 2008).

Cuadro 3. Características fisicoquímicas del aguamiel de *Agave salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*).

Table 3. Physical-chemical characterization of aguamiel of *Agave salmiana* (cultivars *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* and *manso*) and *A. mapisaga* (cultivars *carrizo* and *cenizo*).

| Espezie | Cultivar* | pH | Sólidos solubles totales (°Brix) | Azúcares reductores directos (g L ⁻¹) | Sacarosa (g L ⁻¹) | Azúcares totales (g L ⁻¹) |
|--------------------|--------------------------|----------------|----------------------------------|---|-------------------------------|---------------------------------------|
| <i>A. salmiana</i> | Xamini ¹ | 7.45 ± 0.38 ab | 11.06 ± 0.63 bcde | 22.04 ± 3.30 cd | 70.83 ± 16.18 c | 96.59 ± 13.90 bcd |
| <i>A. salmiana</i> | Cerro ¹ | 6.91 ± 0.01 b | 9.65 ± 0.17 de | 14.31 ± 0.18 ef | 77.81 ± 5.42 bc | 96.22 ± 5.53 bcd |
| <i>A. salmiana</i> | Cimarrón ¹ | 5.08 ± 0.01 cd | 12.60 ± 0.19 b | 15.50 ± 0.17 def | 98.95 ± 9.48 b | 119.66 ± 10.03 b |
| <i>A. salmiana</i> | Penca ancha ¹ | 7.09 ± 0.01 b | 11.56 ± 0.79 bcd | 8.24 ± 0.22 fg | 101.57 ± 16.40 b | 115.16 ± 17.14 bc |
| <i>A. salmiana</i> | Manso ² | 4.57 ± 0.01 d | 12.12 ± 0.10 bc | 49.35 ± 3.86 b | 41.74 ± 6.92 d | 93.28 ± 3.86 cd |
| <i>A. salmiana</i> | Manso ³ | 5.19 ± 0.01 c | 10.32 ± 0.10 cde | 76.83 ± 4.19 a | 10.01 ± 3.30 e | 87.37 ± 2.20 d |
| <i>A. salmiana</i> | Manso ⁵ | 5.03 ± 0.02 cd | 9.40 ± 0.10 e | 27.12 ± 0.31 c | 54.93 ± 11.62 cd | 84.93 ± 12.34 d |
| <i>A. mapisaga</i> | Cenizo ⁴ | 7.77 ± 0.24 a | 16.02 ± 1.23 a | 2.67 ± 0.23 g | 143.50 ± 8.68 a | 153.72 ± 9.09 a |
| <i>A. mapisaga</i> | Carrizo ⁶ | 5.24 ± 0.50 c | 11.19 ± 2.15 bcde | 20.81 ± 6.58 cde | 77.62 ± 8.41 bc | 102.52 ± 6.80 bcd |
| | DSH [§] | 0.55 | 2.06 | 7.42 | 25.50 | 24.15 |

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Dabotha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualpa, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquinahuac, Texcoco, Méx. Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

En general, el pH del aguamiel se encontró en el intervalo de 4.57 a 7.77, la literatura reporta que el aguamiel normalmente puede presentar un pH ácido (≤ 4.5) a ligeramente alcalino (aproximadamente 8.0), asociado al grado de fermentación, ya que principalmente a mayor concentración de ácido láctico, producto de la fermentación, menor pH (Medina Mendoza *et al.*, 2022). De acuerdo a Escalante *et al.* (2012) el aguamiel Tipo I se caracteriza por un pH menor entre 6.60-7.50 y una concentración de ácido láctico menor a 0.90-1.03 mg 100 mL⁻¹; el aguamiel Tipo II con pH < 4.5 y una concentración de ácido láctico < 4 mg 100 mL⁻¹. El pH del aguamiel puede acidificarse por la acumulación de otros ácidos orgánicos producidos por la flora microbiana (fermentación) que se desarrolla espontáneamente desde que el aguamiel se encuentra en el cajete del maguey, asociada al medio ambiente (polvo, aire o insectos) o incorporada mediante las herramientas de raspado o extracción del aguamiel (Contreras-López *et al.*, 2023; Escalante *et al.*, 2012).

Por otra parte, el pH mostró correlación con el contenido de azúcares reductores directos (-0.607) y con el contenido de sacarosa (0.6379), debido a que el pH ácido es una condición que favorece la hidrólisis de sacarosa en glucosa y fructosa (Ávila Núñez *et al.*, 2012). Por lo anterior, un pH ácido es el óptimo para la hidrólisis de sacarosa del aguamiel en el cajete, por lo que aquellas muestras de aguamiel con pH ácido presentaron mayor contenido de azúcares reductores (glucosa y frucosa) (Cuadro 3).

Contenido de minerales

Otros componentes nutritivos del aguamiel son los minerales, implicados en varias funciones vitales del cuerpo humano. El mineral predominante en el aguamiel (Cuadro 4) fue el potasio (K), con un contenido promedio de 1830 mg L⁻¹, equivalente a 41% del potasio presente en un kilo de plátano, considerando que un plátano de tamaño mediano aporta aproximadamente 440 mg de K (Brown, 2016). El consumo de este mineral es importante debido a que una dieta rica en potasio reduce la presión arterial en personas con presión arterial elevada. Considerando que la dosis dietética recomendada de K es de 4700 mg día⁻¹ en adultos (Brown, 2016), el consumo de un litro de aguamiel podría contribuir a satisfacer al menos 24.2% de los requerimientos diarios, y el consumo de aguamiel de *A. mapisaga* cultivar *cenizo* podría aportar un porcentaje mayor (76.8%).

Respecto al magnesio (Mg), mineral necesario para casi todos los procesos bioquímicos del cuerpo por su participación en el control de los niveles de azúcar en sangre y en el mantenimiento del sistema inmunológico (Carrillo-López *et al.*, 2016). En la presente investigación se encontró una concentración promedio de 114.02 ± 41.73 mg L⁻¹ de aguamiel (Cuadro 4), con diferencias entre muestras que se pueden deber a diversas condiciones edafológicas (condiciones del suelo) propias de los sitios de recolecta. Por lo que, el consumo de un litro de aguamiel podría contribuir a satisfacer entre el 27 a 35 % de los requerimientos diarios en adultos mayores de 70 años (Ingesta dietética recomendada de 420/320 mg en hombres y mujeres, respectivamente (Brown, 2016).

Cuadro 4. Composición mineral del aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *m Manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), recolectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.

Table 4. Mineral composition of aguamiel of *Agave salmiana* (cultivars *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* and *m Manso*) and *A. mapisaga* (cultivars *carrizo* and *cenizo*), obtained in different locations from States of Mexico and Hidalgo, Mexico.

| Especie | Cultivar* | Minerales (mg L ⁻¹) | | | | | | |
|--------------------|---|---------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | K | Mg | Ca | Na | Fe | Cu | Zn |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Xamini</i> ¹ | 1650.97 ± 437.09 bc | 93.86 ± 28.51 bc | 154.68 ± 61.70 bc | 161.19 ± 26.44 a | 25.60 ± 0.33 a | 4.33 ± 1.79 cd | 0.59 ± 0.23 bc |
| | <i>Cerro</i> ¹ | 1944.04 ± 442.90 bc | 127.62 ± 32.29 abc | 409.97 ± 94.43 a | 162.81 ± 6.40 a | 25.91 ± 0.58 a | 1.85 ± 0.17 d | 0.87 ± 0.40 bc |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Cimarrón</i> ¹ | 1442.29 ± 55.16 c | 88.03 ± 4.08 bc | 199.11 ± 26.49 b | 140.55 ± 36.64 a | 20.05 ± 0.03 cd | 4.73 ± 1.37 bcd | 0.85 ± 0.06 bc |
| | <i>Penca</i> <i>ancha</i> ¹ | 1499.68 ± 40.82 bc | 65.13 ± 5.06 c | 123.75 ± 7.59 bc | 155.49 ± 13.88 a | 11.85 ± 0.65 e | 6.22 ± 1.47 abc | 1.11 ± 0.35 ab |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ² | 2300.27 ± 183.89 ab | 167.95 ± 2.69 a | 204.06 ± 13.60 b | 170.46 ± 12.86 a | 19.36 ± 1.07 cd | 8.55 ± 0.96 a | 1.53 ± 0.12 a |
| | <i>Manso</i> ³ | 1993.34 ± 17.71 abc | 138.46 ± 7.08 ab | 70.22 ± 5.71 c | 167.56 ± 43.66 a | 18.34 ± 0.57 d | 2.66 ± 0.48 cd | 0.43 ± 0.15 c |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ⁵ | 1533.15 ± 66.76 bc | 112.46 ± 14.66 abc | 111.31 ± 51.11 bc | 160.62 ± 37.51 a | 21.71 ± 2.31 bc | 3.70 ± 1.38 cd | 0.68 ± 0.27 bc |
| | <i>mapisaga</i> <i>Cenizo</i> ⁴ | 2813.39 ± 798.17 a | 148.09 ± 64.70 ab | 99.57 ± 18.62 bc | 186.20 ± 16.26 a | 23.17 ± 0.71 ab | 8.21 ± 2.87 ab | 0.95 ± 0.40 abc |
| <i>A. mapisaga</i> | <i>Carrizo</i> ⁶ | 1290.86 ± 151.44 c | 84.59 ± 11.21 bc | 64.66 ± 9.30 c | 176.19 ± 14.10 a | 6.53 ± 2.54 f | 5.83 ± 2.18 abc | 0.96 ± 0.13 abc |
| DHS [§] | | 830.39 | 64.449 | 104.53 | 64.88 | 2.94 | 3.75 | 0.62 |

* Aguamiel recolectado en: ¹Durango Dabotha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualpa, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquinahuac, Texcoco, Méx. Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. §DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

Otro mineral importante en el aguamiel fue el calcio (Ca), elemento requerido principalmente durante el embarazo para el desarrollo esquelético del feto (Brown, 2016), esta bebida contiene entre 64.66 a 409.97 mg de Ca por litro. El aguamiel obtenido del cultivar *cerro* de *A. salmiana* (Cuadro 4) destaca por el mayor contenido. El consumo de un litro de esta bebida podría contribuir con hasta 50% de los requerimientos dietéticos recomendados en mujeres embarazadas de 19 a 30 años (1000 mg d⁻¹) (Brown, 2016), por lo que el aguamiel de este cultivar es una excelente fuente de este mineral a bajo costo.

De la misma forma, es importante destacar el contenido de hierro (Fe) en el aguamiel de las especies y cultivares estudiados, el cultivar *cerro* de *A. salmiana* mostró la mayor concentración de este mineral (Cuadro 4). Actualmente, la carencia nutricional más generalizada en todo el mundo y la principal causa de anemia es por la falta de Fe, la ingesta de un litro de aguamiel podría contribuir a que una mujer embaraza adquiera de 25 a 95% de los requerimientos diarios de este mineral (ingesta dietética recomendada en mujeres embarazadas: 27 mg d⁻¹) (Brown, 2016)). El Fe presente en el aguamiel es “no hemínico” (presente en vegetales, no en carne); sin embargo, la absorción de este tipo de Fe es favorecido por la presencia de vitamina C (Binaghi *et al.*, 2008) y de fructanos (Castañeda-Ovando *et al.*, 2023), el aguamiel es una fuente de estos metabolitos. Aunado a lo anterior, el aguamiel es una excelente fuente de cobre (Cu), al encontrarse en concentraciones de 1.85 a 8.55 mg L⁻¹ (Cuadro 4), mineral que es componente de las enzimas implicadas en la utilización y movilización del Fe en el cuerpo (Brown, 2016).

Por otra parte, los contenidos de Na y Zn fueron bajos, por lo que el consumo de un litro de aguamiel solo contribuiría aproximadamente con 10 % de la ingesta diaria recomendada de estos minerales (1500-2300 mg d⁻¹ de Na y 8-11 mg d⁻¹ de Zn (Brown, 2016)). Es importante destacar que el contenido de Na mostró niveles bajos en todas las muestras estudiadas (Cuadro 4), lo anterior es valioso, ya que actualmente, es ampliamente conocida la estrecha relación entre la hipertensión y la ingesta dietética de Na (mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares cuando la ingesta de Na excede los 5 g d⁻¹ o es inferior a 3 g d⁻¹) (Mente *et al.*, 2021), por lo cual el aguamiel puede ser consumido por personas con hipertension sin ningun riesgo para su salud.

Finalmente, es importante señalar que las diferencias encontradas en las concentraciones de minerales en el aguamiel de las diversas especies y cultivares pueden atribuirse a las características del suelo (tipo, fertilidad, propiedades físicas y químicas) del sitio de recolecta y manejo agronómico que se realiza a las plantas (Pohl, 2009; Santos-Zea *et al.*, 2012), principalmente fertilización por los productores del lugar con compostura orgánica de estiércol de ovino (Com. personal). Con base en los resultados, el consumo de aguamiel representa una alternativa económica de ingesta de algunos requerimientos mínimos de minerales para personas de zonas rurales marginadas del país.

Análisis proximal

El contenido de humedad fue estadísticamente diferente entre las muestras de aguamiel estudiadas (Cuadro 5), el del cultivar *cerro* destacó con un valor mayor (90.80% p/v equivalente a 908.00 g L⁻¹); sin embargo, los cultivares restantes se encontraron en el contenido promedio de humedad reportado (85 a 88%, equivalente a 850 a 880 g L⁻¹) por Silos-Espino *et al.* (2011).

Los carbohidratos representaron el segundo componente más importante del aguamiel (Cuadro 5), el 95.3% corresponde a AT (ARD + sacarosa), la diferencia podrían ser carbohidratos complejos y/o fibra. De acuerdo con Ortiz-Basurto *et al.* (2008), 75% corresponde a carbohidratos como 32.4% fructosa, 26.5% glucosa, 8.8% sacarosa y 10% fructooligosacáridos, en materia seca de aguamiel. Asimismo, el aguamiel del cultivar *cerro* presentó los valores más bajos de AT, de acuerdo con los productores, esto podría ser una característica para considerarse

de menor calidad en la elaboración de pulque y jarabes debido a la baja disponibilidad de azúcares para la fermentación o concentración de estos.

Los valores de proteína encontrados en el aguamiel de los diferentes cultivares y especies analizadas (6.13 a 11.96 g L⁻¹) fueron superiores a lo reportado en aguamiel de *Agave salmiana* (6.9 g L⁻¹) por Silos-Espino *et al.* (2011) y en *Agave mapisaga* (3.5 g L⁻¹) por Ortiz-Basurto *et al.* (2008). El consumo de un litro de aguamiel de los cultivares estudiados podría cubrir entre 23 y 62% de la cantidad diaria de proteínas recomendada en infantes de 1-13 años (13 a 34 g día⁻¹) (Brown, 2016), lo que sugiere que esta bebida podría ser una alternativa de consumo en aquellos lugares del país donde el agua y el consumo de carne son limitados. Los alimentos son fuente de proteína de diferente calidad, la cual depende de varios factores, uno de ellos es el perfil de aminoácidos esenciales; al respecto, diversos estudios señalan que el aguamiel es fuente de todos los aminoácidos esenciales, a excepción de metionina (Castañeda-Ovando *et al.*, 2023; Ortiz-Basurto *et al.*, 2008; Villarreal-Morales *et al.*, 2019).

Por último, es importante referir que el aguamiel es una bebida de bajo valor energético (Cuadro 5) y alto valor nutricional, lo que le confiere atributos para considerarse como una bebida funcional. Rivera *et al.* (2008) señalan que las bebidas con alto aporte energético incrementan el riesgo de obesidad, por ello se deben de consumir de forma esporádica, siendo fundamental considerar consumir bebidas que tengan un equilibrio entre valor calórico y contenido de nutrientes como parte de una alimentación saludable.

Cuadro 5. Composición proximal del aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), recolectado en diferentes localidades del Estado de México e Hidalgo.

Table 5. Proximal composition of aguamiel of *Agave salmiana* (cultivars *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* and *manso*) and *A. mapisaga* (cultivars *carrizo* and *cenizo*), obtained in different locations from States of Mexico and Hidalgo, Mexico.

| Especie | Cultivar* | Humedad (g L ⁻¹) | Carbohidratos (g L ⁻¹) | Proteína (g L ⁻¹) | Cenizas (g L ⁻¹) | Valor energético (kcal L ⁻¹) |
|--------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|--|
| <i>A. salmiana</i> | <i>Xamini</i> ¹ | 870.47 ± 6.88 b | 118.20 ± 8.10 b | 7.60 ± 0.72 b | 6.72 ± 2.29 ab | 449.51 ± 32.38 b |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Cerro</i> ¹ | 908.00 ± 10.21 a | 70.78 ± 9.28 c | 11.96 ± 1.09 a | 9.26 ± 1.18 a | 300.66 ± 36.58 c |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Cimarrón</i> ¹ | 873.23 ± 6.40 b | 111.97 ± 5.74 b | 8.40 ± 0.73 b | 6.41 ± 1.57 ab | 440.26 ± 18.00 b |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Penca ancha</i> ¹ | 885.15 ± 1.89 ab | 104.65 ± 3.72 b | 6.13 ± 0.53 b | 4.07 ± 2.60 b | 405.69 ± 11.13 bc |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ² | 871.89 ± 17.00 b | 111.08 ± 16.50 b | 7.45 ± 0.72 b | 9.58 ± 1.40 a | 433.80 ± 62.00 b |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ³ | 874.24 ± 1.20 b | 110.28 ± 2.80 b | 7.73 ± 0.47 b | 7.75 ± 1.75 ab | 431.80 ± 9.01 b |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ⁵ | 890.77 ± 5.70 ab | 90.42 ± 4.80 bc | 8.18 ± 0.62 b | 10.63 ± 3.10 a | 360.24 ± 18.20 bc |
| <i>A. mapisaga</i> | <i>Cenizo</i> ⁴ | 794.30 ± 19.00 c | 190.49 ± 20.20 a | 8.54 ± 0.59 b | 6.67 ± 1.50 ab | 729.70 ± 73.80 a |
| <i>A. mapisaga</i> | <i>Carrizo</i> ⁶ | 891.67 ± 24.20 ab | 90.84 ± 25.00 bc | 7.70 ± 2.60 b | 9.80 ± 2.80 a | 360.16 ± 89.80 bc |
| | DSH [§] | 29.80 | 30.70 | 2.60 | 4.90 | 111.50 |

* Aguamiel recolectado en: ¹Durango Daboxtha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualpa, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquinahuac, Texcoco, Méx. Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

Contenido de antioxidantes

Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos, uno de los de mayor grupo de fitoquímicos presentes en las plantas, destacan por sus propiedades antioxidantes, actividad cardioprotectora, cancerígena, antiinflamatoria, antimicrobiana y efecto neuro-protector (Li *et al.*, 2014). Los resultados del contenido de compuestos fenólicos demostraron que el aguamiel es una fuente de estos metabolitos ($240.21 - 478.28 \text{ mg EAG L}^{-1}$) (Cuadro 6). El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la concentración de compuestos fenólicos entre las muestras de aguamiel estudiadas. El valor mayor se observó en el aguamiel de *Agave salmiana* cultivar *cerro* (estado de Hidalgo), estadísticamente superior al de los otros cultivares debido a que éste presentó aproximadamente el doble de compuestos fenólicos en comparación con el aguamiel de maguey *manzo*. Es importante destacar que el cultivar *cerro* también produjo el aguamiel con el mayor contenido de proteína, Fe y Ca.

Se encontró que estos metabolitos mostraron una fuerte correlación negativa (-0.77) con el ángulo de tono (*hue*), por lo que su presencia fue mayor en las muestras de aguamiel de color oscuro (*xamini*, *penca ancha*, *cenizo* y *cerro*) de tonalidad amarillo-marrón (menor *hue*), causada posiblemente por la oxidación de este tipo de metabolitos, ya que tienen tendencia a autooxidarse y formar quinonas, responsables del color amarillo-marrón, oxidación catalizada por la enzima polifenoloxidasa (Rappoport, 2003).

Cuadro 6. Contenido de fitoquímicos y actividad antioxidante en aguamiel de *A. salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* y *m Manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), recolectado en el Estado de México e Hidalgo.

Table 6. Phytochemical content and antioxidant activity in *Agave salmiana* (cultivars *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* and *m Manso*) and *A. mapisaga* (cultivars *carrizo* and *cenizo*), obtained in different locations from States of Mexico and Hidalgo, Mexico.

| Especie | Cultivar* | Fenoles totales (mg EAG L ⁻¹) | Flavonoides totales (mg EAG L ⁻¹) | Vitamina C (mg EAA L ⁻¹) | DPPH inhibido (%) | Actividad antioxidante (μM ET L ⁻¹) |
|--------------------|---------------------------------|--|--|---|---------------------|--|
| <i>A. salmiana</i> | <i>Xamini</i> ¹ | 375.35 ± 42.63 b | 2.27 ± 0.69 c | 598.00 ± 18.18 a | 38.38 ± 8.18 b | 1208.31 ± 249.25 b |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Cerro</i> ¹ | 478.28 ± 20.94 a | 2.55 ± 0.64 c | 454.69 ± 30.89 b | 83.16 ± 0.25 a | 2576.29 ± 7.77 a |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Cimarrón</i> ¹ | 347.66 ± 23.08 b | 1.39 ± 0.25 c | 239.49 ± 38.84 d | 37.84 ± 0.56 b | 1191.80 ± 17.21 b |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Penca ancha</i> ¹ | 336.89 ± 18.46 d | 0.66 ± 0.39 d | 304.20 ± 58.31 cd | 31.06 ± 0.21 bc | 984.80 ± 6.41 bc |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ² | 240.21 ± 33.59 c | 4.72 ± 0.53 b | 233.36 ± 18.01 d | 25.52 ± 0.59 cd | 815.31 ± 17.98 cd |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ³ | 247.70 ± 9.45 c | 6.42 ± 0.19 a | 351.39 ± 37.26 c | 27.96 ± 1.00 c | 892.33 ± 32.00 c |
| <i>A. salmiana</i> | <i>Manso</i> ⁵ | 335.04 ± 22.16 b | 2.24 ± 0.82 c | 264.51 ± 41.90 cd | 29.69 ± 2.43 bc | 942.88 ± 74.34 bc |
| <i>A. mapisaga</i> | <i>Cenizo</i> ⁴ | 318.44 ± 14.70 b | 3.95 ± 1.03 b | 230.12 ± 61.60 d | 23.65 ± 3.45 cd | 758.33 ± 105.26 cd |
| <i>A. mapisaga</i> | <i>Carrizo</i> ⁶ | 251.37 ± 62.50 c | 1.27 ± 0.69 cd | 232.77 ± 68.19 d | 18.89 ± 6.26 d | 612.89 ± 191.08 cd |
| | DSH [§] | 60.44 | 1.39 | 93.05 | 8.82 | 269.47 |

*Aguamiel recolectado en: ¹Durango Dabotha, El Cardonal, Hgo.; ²San Marcos, Otumba, Méx.; ³Santa Ma. Actipac, Axapusco, Méx.; ⁴San Isidro del Progreso, Teotihuacan, Méx.; ⁵Santiago Zacualuca, Teotihuacan, Méx.; ⁶Tequexquinahuac, Texcoco, Méx. Los valores reportados son la media de 5 repeticiones ± desviación estándar. [§]DSH: Diferencia significativa honesta (Tukey, 0.05). Medias con la misma letra, en una misma columna, son estadísticamente iguales.

También es importante señalar que se encontró correlación de los compuestos fenólicos con el contenido de calcio (0.76), por lo que las muestras de aguamiel de mayor contenido de este mineral (*A. salmiana* cultivar *cerro*) presentaron el más alto contenido de estos metabolitos (Cuadro 6). Esta correlación explica que el Ca es un factor importante en la estimulación de la síntesis de compuestos fenólicos al incrementar la actividad enzimática de fenilalanina-amoniolasa (PAL), enzima clave para la síntesis e estos metabolitos (Ngadze *et al.*, 2014).

Flavonoides

Los flavonoides son un grupo importante dentro de los compuestos fenólicos. En el Cuadro 6 se observa el bajo contenido de flavonoides reportado en aguamiel, como lo señala Ahumada-Santos

et al. (2013) al encontrar trazas en varias especies de agave de Sinaloa, México. El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la concentración de flavonoides entre los nueve tipos de aguamiel estudiados. Los valores más altos de este tipo de metabolitos se encontraron en el aguamiel de *A. salmiana* cultivar *manso* (Axapusco, Estado de México), el cual fue estadísticamente diferente al resto de muestras y presentó más del triple de contenido de flavonoides en comparación con el aguamiel del estado de Hidalgo.

La concentración encontrada de flavonoides en todas las muestras de aguamiel fue menor a la de compuestos fenólicos (Cuadro 6), posiblemente por encontrarse formando procianidinas (taninos condensados) como sucede en algunos frutos. Algunos autores han reportado la presencia de taninos en las hojas de algunas especies de agave (Ahumada-Santos *et al.*, 2013) y abundante presencia de ácidos fenólicos en el género agave (Almaraz-Abarca *et al.*, 2013a; Almaraz-Abarca *et al.*, 2013b).

Vitamina C (ácido ascórbico)

El contenido de vitamina C en las muestras de aguamiel estudiadas varió entre 230.12 y 598.00 mg EAA L⁻¹ de aguamiel) (Cuadro 6), donde el aguamiel obtenido de *A. salmiana* cultivar *xamini* presentó la concentración estadísticamente superior, cercano a lo encontrado en el jugo de limón (486.1 mg EAA L⁻¹) (Alvarez *et al.*, 2005), mandarina y naranja (121.6 a 368.3, 325.6 a 727.2 mg EAA L⁻¹, respectivamente) (Del Caro *et al.*, 2004).

Se observaron diferencias significativas del contenido de vitamina C del aguamiel entre las diferentes especies, cultivares y origen (Cuadro 6). En el presente estudio, las concentraciones de ácido ascórbico de las muestras de aguamiel fueron superiores a lo descrito por (Tovar-Robles *et al.*, 2011), 140.4 mg EAA L⁻¹ en el aguamiel de *A. salmiana* de Aguascalientes.

La vitamina C se degrada fácilmente por acción de la luz, actividad de agua, presencia de oxígeno y alta temperatura (Heldman *et al.*, 2018); sin embargo, se descarta la posible degradación de este metabolito por esas vías, debido a que todas las muestras se trasladaron en semejantes condiciones de refrigeración y se procesaron simultáneamente. Por lo tanto, las diferencias estadísticas encontradas entre los contenidos de vitamina C se podrían deber a diferencias edafoclimáticas.

De manera general, las variaciones observadas en el contenido de fitoquímicos (compuestos fenólicos, flavonoides y vitamina C) se debe a factores edafoclimáticos propios de los sitios de recolecta de aguamiel (temperatura, humedad relativa, radiación, precipitación y condiciones del suelo, entre otros), que pueden ocasionar estrés abiótico y generar una respuesta de defensa en la planta produciendo una diversidad de metabolitos secundarios para evitar daños en las células y los tejidos (Yeshi *et al.*, 2022). Otro factor que pudo influir en el contenido de estos metabolitos fue el añejado del maguey, tiempo que permite la maduración de las hojas centrales y aumenta el contenido de azúcar de la savia (aguamiel); sin embargo, se desconoce cómo este periodo afecta la calidad nutricional y nutracéutica del aguamiel y, en el presente estudio, los magueyes muestreados no fueron añejados durante el mismo tiempo dado las diferencias en el proceso de preparación de la planta entre las diferentes regiones de estudio.

Actividad antioxidante

Se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) de la actividad antioxidante entre las diferentes especies y cultivares, aunque destacan las muestras recolectadas en el estado de Hidalgo, siendo el aguamiel de *A. salmiana* cultivar *cerro* el de mayor capacidad para neutralizar los radicales libres (Cuadro 6). Estas diferencias posiblemente se deben a las condiciones edafoclimáticas del Valle de Mezquital Hidalgo, región semiárida caracterizada por un clima semiseco y precipitaciones anuales menores a 400 mm, condiciones de estrés que pudieron favorecer la síntesis de algunos antioxidantes. La síntesis de algunos metabolitos secundarios en los vegetales se favorece como mecanismo de defensa o para contrarrestar los factores de estrés (sequía, condiciones climáticas adversas, patógenos) (Iriti & Faoro, 2006).

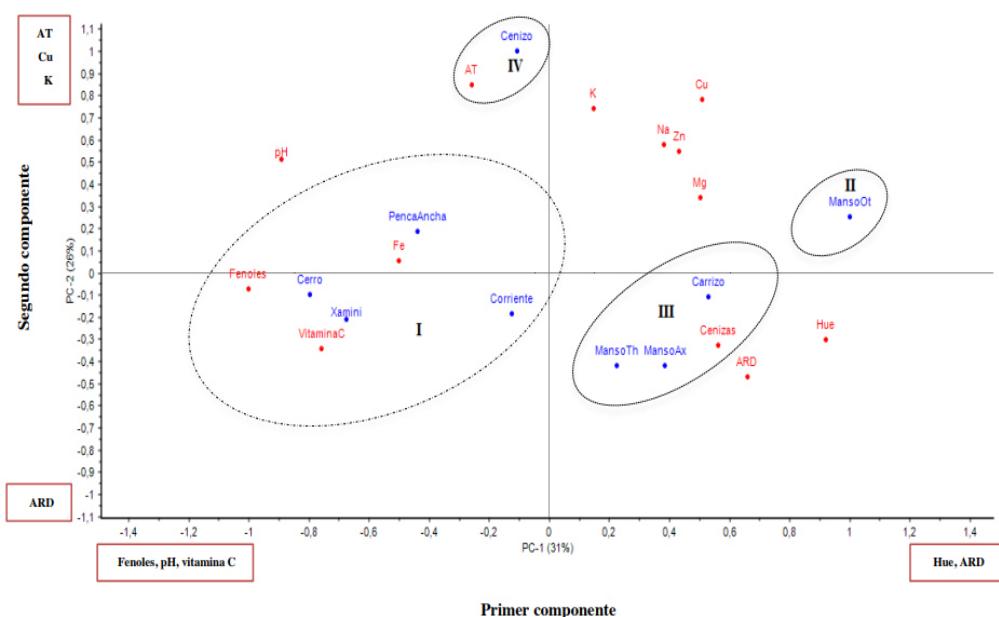
En general, las muestras de aguamiel presentaron una actividad antioxidante promedio de 1109.21 µM ET L⁻¹ similar a lo reportado por Tovar-Robles *et al.* (2011) (1096.8 µM ET L⁻¹); actividad antioxidante moderada (menos de 20%) en comparación con algunas bebidas comerciales como café (6299.2 µM ET L⁻¹) y jugo de uva (6444.8 µM ET L⁻¹); pero superior (más de 50 %) en actividad antioxidante al pulque (567.2 µM ET L⁻¹) y jugo de naranja con nopal de

la marca Nutriva® ($311.6 \mu\text{M ET L}^{-1}$) (Tovar-Robles *et al.*, 2011). De acuerdo con el análisis de correlación de Pearson, la actividad antioxidante observada en el aguamiel mostró una alta correlación significativa con el contenido de compuestos fenólicos (0.88).

Es importante destacar que *A. salmiana* cultivar *cerro*, a diferencia de los cultivares *xamini*, *cimarrón* y *penca ancha* de la misma especie, también localizada en El Cardonal, Hidalgo, es un agave más silvestre que no se cultiva y aprovechado por los productores debido a que consideran que el aguamiel es de baja calidad (poco contenido de azúcares) y color oscuro, no apto para la elaboración de pulque o jarabe de agave; por lo que los resultados de esta investigación podrían contribuir a revalorizar su aprovechamiento y cultivo por su alto contenido de compuestos fenólicos, compuestos con potencial actividad antioxidante.

Análisis de componentes principales

Una vez que se estudió el comportamiento individual de cada metabolito del aguamiel, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para agrupar las muestras de aguamiel de acuerdo con sus características físicoquímicas, nutricionales y nutracéuticas (Figura 3). La gráfica de proyecciones del primer componente (CP1) y segundo componente (CP2) permitieron separar en cuatro grupos a las muestras de aguamiel (Figura 3). El CP1 presentó asociación positiva con *hue* y azúcares reductores directos (ARD). El CP2 tuvo asociación positiva con azúcares totales, Cu y K.



Aguamiel obtenido del cultivar: *Cerro* (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo), *Xamini* (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo), *Cimarrón* (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo); *PencaAncha* (*A. salmiana*, El Cardonal, Hgo); *MansoTh* (*A. salmiana*, Teotihuacan, Méx.), *MansoAx* (*A. salmiana*, Axapusco, Méx.), *Carrizo* (*A. mapisaga*, Texcoco, Méx.), *MansoOt* (*A. salmiana*, Otumba, Méx.), *Cenizo* (*A. mapisaga*, Teotihuacan, Méx.). ARD: azúcares reductores directos, AT: azúcares totales.

Figura 3. Agrupación de muestras de aguamiel de *Agave salmiana* (cultivares *xamini*, *cerro*, *cimarrón* o *corriente*, *penca ancha* y *manso*) y *A. mapisaga* (cultivares *carrizo* y *cenizo*), recolectado en el Estado de México e Hidalgo, con base en características físico-químicas, nutricionales y nutraceuticas.

Figure 3. Grouping the aguamiel samples of *Agave salmiana* (cultivars *xamini*, *cerro*, *cimarrón*, *penca ancha* and *manso*) and *A. mapisaga* (cutivars *carrizo* and *cenizo*) obtained in different locations from States of Mexico and Hidalgo, Mexico, in function of the physical-chemical, nutritional and nutraceutical characteristics

Las muestras de aguamiel obtenidas de los cultivares *cerro*, *xamini*, *cimarrón* y *penca ancha* (*A. salmiana*) recolectadas en el Estado de Hidalgo, conformaron el Grupo I; se caracterizó por agrupar muestras de aguamiel de tonalidad amarillo-marrón (bajo valor de *hue*), alto contenido de Fe (11.85-25.91 mg L⁻¹), mayor valor nutracéutico y actividad antioxidante. El aguamiel del cultivar *manso* (*A. salmiana*) de Otumba, Estado México, conformó el Grupo II, se caracterizó por su elevado contenido de azúcares reductores directos. El Grupo III estuvo conformado por el aguamiel de los cultivadores *manso* (Teotihuacan y Axapusco, Estado de México) y *carrizo* (*A. mapisaga*, Texcoco, México), muestras de mayor *hue* (tono amarillo) y mayores valores de luminosidad; pero menor contenido de compuestos fitoquímicos y actividad antioxidante. El aguamiel del cultivar *cenizo* de *A. mapisaga* (Teotihuacan, Estado de México) formó el Grupo IV, destacando por su mayor contenido de K, Cu y mayor concentración de AT, por lo cual podría ser de alta calidad para la elaboración de pulque; pero menor contenido de ARD, es decir, mayor contenido de sacarosa, que podría aprovecharse igualmente para elaborar jarabes de agave. En general, las diferencias observadas entre las muestras de aguamiel podrían deberse a prácticas de manejo agronómico (principalmente aplicación de compostura orgánica de estiercol de ovino) que se le da al agave y a factores edafoclimáticos (diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas entre los sitios de estudio que ocasionan variación en la síntesis de fitoquímicos en plantas bajo diversos tipos de estrés abiótico). Los resultados de esta investigación pueden contribuir a identificar los cultivares con mayor valor nutracéutico y nutricional; así como, el tipo de uso que se le puede dar al aguamiel (bebida, elaboración de pulque o jarabe de maguey) con el fin de realizar un aprovechamiento agroindustrial eficiente. Actualmente, el aguamiel es poco consumido y muchas especies y cultivares de maguey pulquero están en peligro de extinción, por lo que esta información podría contribuir a la revalorización del cultivo de maguey y a su consumo, como parte de la identidad cultural México.

CONCLUSIONES

Las muestras de aguamiel de color más oscuro (menor *hue*, tonalidad amarillo-marrón) y mayor pH presentaron mayor actividad antioxidante, asociada al mayor contenido de compuestos fenólicos y vitamina C. Los compuestos fenólicos contribuyeron en mayor medida a la actividad antioxidante del aguamiel, en comparación con los otros nutracéuticos. El aguamiel obtenido de *A. salmiana* cultivar *cerro* (Hidalgo) presentó el mayor contenido de proteína, Ca, Fe y compuestos fenólicos; así como, la mayor actividad antioxidante, tres veces superior al aguamiel de *Agave mapisaga* y el doble que las muestras obtenidas de los otros cultivares de *A. salmiana* que se estudiaron en el presente estudio. El aguamiel es una bebida subvalorada de buena calidad nutricional y funcional. El aguamiel de *A. salmiana* cultivar *cerro* es considerado de baja calidad para la elaboración de pulque y jarabe de agave por los productores, dado su menor contenido de azúcares totales; sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio permiten afirmar que este fue el cultivar con mayor potencial para obtener aguamiel de mayor calidad nutricional y nutracética con posibles beneficios a la salud.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Abisaí García Mendoza, curador de la Colección Nacional de Agaves del Herbario Nacional (MEXU) del Instituto de Biología de la Universidad Autónoma de México (UNAM), y al M.C. Antonio Cortés Jiménez, responsable del Herbario “Jorge Espinosa Salas” del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, por haber realizado la identificación taxonómica de las especies y cultivares de agave utilizados en el presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Ahumada-Santos, Y. P., Montes-Avila, J., Uribe-Beltrán, M. D. J., Díaz-Camacho, , Sylvia Páz, López-Angulo, G., Vega-Aviña, R., López-Valenzuela, J. Á., Heredia, J. B., & Delgado-Vargas, F. (2013). Chemical characterization, antioxidant and antibacterial activities of six *Agave* species from Sinaloa, Mexico. *Industrial Crops and Products*, 49, 143–149. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.04.050>
- Almaraz-Abarca, N., Delgado-Alvarado, E. A., Ávila-Reyes, J. A., Uribe-Soto, J. N., & González-Valdez, L. S. (2013a). The Phenols of the Genus Agave (Agavaceae). *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 04(03), 9–16. <https://doi.org/10.4236/jbnb.2013.43A002>
- Almaraz-Abarca, N., González-Elizondo, M. D. S., Campos, M. D. G., Ávila-Sevilla, Z. E., Delgado-Alvarado, E. A., & Ávila-Reyes, J. A. (2013b). Variability of the Foliar Phenol Profiles of the *Agave victoriae-reginae* Complex (Agavaceae). *Botanical Sciences*, 91(3), 295–306. <https://doi.org/10.17129/botsci.9>
- Álvarez-Ríos, G. D., Figueredo-Urbina, C. J., & Casas, A. (2020). Sistemas de manejo de maguey pulquero en México. *Etnobiología*, 18(2), 3-23.
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis*. (18th Ed.). Association of Official Analytical Chemist.
- Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P. (1994). [Standardization of propolis extract and identification of principal constituents]. *Journal de pharmacie de Belgique*, 49(6), 462–468.
- Ávila Núñez, R., Rivas Pérez, B., & Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en *Agave cocui* Trelease. *Multiciencias*, 12(2), 129–135.
- Binaghi, M. J., Greco, C. B., López, L. B., Ronayne de Ferrer, P. A., & Valencia, M. E. (2008). Biodisponibilidad de hierro en la dieta infantil. *Archivos argentinos de pediatría*, 106(5), 387–389.
- Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 28(1), 25–30. [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(95\)80008-5](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5)
- Brown, J. E. 2016. Nutrition: through the life cycle, 6^a edición. Minnesota, USA: Wadsworth, Cengage Learning. 610 p.
- Burdurlu, H. S., Koca, N., & Karadeniz, F. (2006). Degradation of vitamin C in citrus juice concentrates during storage. *Journal of Food Engineering*, 74(2), 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.03.026>
- Carrillo-López, A., Silos-Espino, H., Flores-Benítez, S., Espinoza-Sánchez, E. A., Ornelas-Tavares, J. R., Flores-Chávez, L., Tovar-Robles, C., Méndez-Gallegos, J., & Rossell-Kipping, D. (2016). Some Evidences on Effect of Intake Aguamiel (Agave sap). *Sustainable Agriculture Research*, 5(1), 49. <https://doi.org/10.5539/sar.v5n1p49>
- Castañeda-Ovando, A., Moreno-Vilet, L., Jaimez-Ordaz, J., Ramírez-Godínez, J., Pérez-Escalante, E., Cruz-Guerrero, A. E., Contreras-López, E., Alatorre-Santamaría, S. A., Guzmán-Rodríguez, F. J., & González-Olivares, L. G. (2023). Aguamiel syrup as a technological diversification product: Composition, bioactivity and present panorama. *Future Foods*, 8, 100249. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2023.100249>
- Contreras-López, E., Félix-Reyes, N. L., González-Olivares, L. G., Jaimez-Ordaz, J., Castañeda-Ovando, A., Añorve-Morga, J., López-Hernández, B. A., Vélez-Rivera, N., & Ramírez-Godínez, J. (2023). Aguamiel Enhance Proteolytic Activity and Survival of *Lactiplantibacillus pentosus* ABHEAU-05 during Refrigerated Storage of a Fermented Milk. *Fermentation*, 9(9), 841. <https://doi.org/10.3390/fermentation9090841>
- Del Caro, A., Piga, A., Vacca, V., & Agabbio, M. (2004). Changes of flavonoids, vitamin C and antioxidant capacity in minimally processed citrus segments and juices during storage. *Food Chemistry*, 84(1), 99–105. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00180-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00180-8)
- Escalante, A., Giles-Gómez, M., Flores, G., Acuña, V., Moreno-Terrazas, R., López-Munguía, A., & Lappe-Oliveras, P. (2012). Pulque Fermentation. En Y. Hui & E. Evranuz, *Handbook of Plant-Based Fermented Food and Beverage Technology, Second Edition* (pp. 691–706). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12055-50>

- Heldman, D. R., Lund, D. B., & Sabliov, C. M. (2018). *Handbook of Food Engineering* (D. R. Heldman, D. B. Lund, & C. Sabliov, Eds.; 3a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429449734>
- Iriti, M., & Faoro, F. (2006). Grape phytochemicals: A bouquet of old and new nutraceuticals for human health. *Medical Hypotheses*, 67(4), 833–838. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2006.03.049>
- Joaquín-Cruz, E., Dueñas, M., García-Cruz, L., Salinas-Moreno, Y., Santos-Buelga, C., & García-Salinas, C. (2015). Anthocyanin and phenolic characterization, chemical composition and antioxidant activity of chagalapoli (*Ardisia compressa* K.) fruit: A tropical source of natural pigments. *Food Research International*, 70, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.033>
- Lappe-Oliveras, P., Moreno-Terrazas, R., Arrizón-Gaviño, J., Herrera-Suárez, T., García-Mendoza, A., & Gschaedler-Mathis, A. (2008). Yeasts associated with the production of Mexican alcoholic nondistilled and distilled *Agave* beverages. *FEMS Yeast Research*, 8(7), 1037–1052. <https://doi.org/10.1111/j.1567-1364.2008.00430.x>
- Leal-Díaz, A. M., Santos-Zea, L., Martínez-Escobedo, H. C., Guajardo-Flores, D., Gutiérrez-Uribe, J. A., & Serna-Saldivar, S. O. (2015). Effect of *Agave americana* and *Agave salmiana* Ripeness on Saponin Content from Aguamiel (Agave Sap). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63(15), 3924–3930. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b00883>
- Li, A.-N., Li, S., Zhang, Y.-J., Xu, X.-R., Chen, Y.-M., & Li, H.-B. (2014). Resources and Biological Activities of Natural Polyphenols. *Nutrients*, 6(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/nu6126020>
- McGuire, R. G. (1992). Reporting of Objective Color Measurements. *HortScience*, 27(12), 1254–1255. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.27.12.1254>
- Medina Mendoza, C., Roldán Cruz, E. I., & Vázquez Jahuey, M. (2022). Caracterización fisicoquímica, microbiológica y organoléptica del aguamiel y pulque del Alto Mezquital, Hidalgo. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 19(4), 448-462. <https://doi.org/10.22231/asyd.v19i4.1412>
- Mente, A., O'Donnell, M., & Yusuf, S. (2021). Sodium Intake and Health: What Should We Recommend Based on the Current Evidence? *Nutrients*, 13(9), 3232. <https://doi.org/10.3390/nu13093232>
- Mora-López, J. L., Reyes-Agüero, J. A., Flores-Flores, J. L., Peña-Valdivia, C. B., & Aguirre-Rivera, J. R. (2011). *Variación morfológica y humanización de la sección salmiana de del género Agave*.
- Narváez Suárez, A. U., Martínez Saldaña, T., & Jiménez-Velázquez, M. (2016). El cultivo de maguey pulquero: Opción para el desarrollo de comunidades rurales del altiplano mexicano. *Revista de Geografía Agrícola*, 56, 33–44. <https://doi.org/10.5154/r.rga.2016.56.005>
- Ngadze, E., Coutinho, T. A., Icishahayo, D., & Van Der Waals, J. E. (2014). Effect of calcium soil amendments on phenolic compounds and soft rot resistance in potato tubers. *Crop Protection*, 62, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.04.009>
- Ortiz-Basurto, R. I., Pourcelly, G., Doco, T., Williams, P., Dornier, M., & Belleville, M.-P. (2008). Analysis of the Main Components of the Aguamiel Produced by the Maguey-Pulquero (*Agave mapisaga*) throughout the Harvest Period. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(10), 3682–3687. <https://doi.org/10.1021/jf072767h>
- Peralta-García, I., González-Muñoz, F., Rodríguez-Alegría, M. E., Sánchez-Flores, A., & López Munguía, A. (2020) Evolution of fructans in aguamiel (agave sap) during the plant production lifetime. *Frontiers in Nutrition*, 7, 566950. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.566950>
- Perkin-Elmer Corporation. (1996). *Analytical Methods for Atomic Absorption Spectroscopy* (The Perkin-Elmer Corporation).
- http://www1.lasalle.edu/~prushan/Instrumental%20Analysis_files/AA-Perkin%20Elmer%20guide%20to%20all!.pdf

Recibido:
1/mayo/2024

Aceptado:
7/noviembre/2024

- Pohl, P. (2009). Determination of metal content in honey by atomic absorption and emission spectrometries. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 28(1), 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2008.09.015>
- Rappoport, Z. 2003. The Chemistry of Phenols (Vol. 1). New York: Wiley An Interscience publications.
- Rivera, J. A., Muñoz-Hernández, O., Rosas-Peralta, M., Aguilar-Salinas, C. A., Popkin, B. M., & Willett, W. C. (2008). Consumo de bebidas para una vida saludable: Recomendaciones para la población mexicana. *Salud Pública de México*, 50(2), 173–195. <https://doi.org/10.1590/S0036-36342008000200011>
- Santos-Zea, L., Leal-Díaz, A., Cortes-Ceballos, E., & Gutierrez- Uribe, J. (2012). Agave (Agave spp.) and its Traditional Products as a Source of Bioactive Compounds. *Current Bioactive Compounds*, 8(3), 218–231. <https://doi.org/10.2174/157340712802762410>
- Silos-Espino, H.; Tovar-Robles, C. L.; González-Cortés, N.; Méndez-Gallegos, S.; Rossel-Kipping, D. 2011. Estudio integral del maguey (*Agave salmiana*): propagación y valor nutricional. *Revista Salud Pública y Nutrición*, Edición especial (5): 75-82.
- Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdate-Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158. <https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144>
- Sohaimy, S. A. E. (2012). *Functional Foods and Nutraceuticals-Modern Approach to Food Science. World Applied Sciences Journal*, 20 (5): 691-708. ISSN 1818-4952 © IDOSI Publications. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.20.05.66119>
- Tadesse, S. A., & Emire, S. A. (2020). Production and processing of antioxidant bioactive peptides: a driving force for the functional food market. *Helijon*, 6, e04765. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04765>
- Tovar-Robles, C. L., Perales-Segovia, C., Cedillo, A. N., Valera-Montero, L. L., Gómez-Leyva, J. F., Guevara-Lara, F., Hernández-Duque, J. L. M., & Silos-Espino, H. (2011). Effect of aguamiel (agave sap) on hematic biometry in rabbits and its antioxidant activity determination. *Italian Journal of Animal Science*, 10(2), e21. <https://doi.org/10.4081/ijas.2011.e21>
- Valdivieso Solís, D. G., Vargas Escamilla, C. A., Mondragón Contreras, N., Galván Valle, G. A., Gilés-Gómez, M., Bolívar, F., & Escalante, A. (2021). Sustainable Production of Pulque and Maguey in Mexico: Current Situation and Perspectives. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 678168. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.678168>
- Villarreal-Morales, S. L., Muñiz-Márquez, D. B., Michel-Michel, M., González-Montemayor, Á.-M., Escobedo-García, S., Salas-Tovar, J. A., Flores-Gallegos, A. C., & Rodríguez-Herrera, R. (2019). Aguamiel a Fresh Beverage from Agave spp. Sap with Functional Properties. In *Natural Beverages* (pp. 179–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816689-5.00007-9>
- Yeshi, K., Crayn, D., Ritmejeryte, E., Wangchuk, P. (2022). Plant secondary metabolites produced in response to abiotic stresses has potential application in pharmaceutical product development. *Molecules*, 27(1), 313. <https://doi.org/10.3390/molecules27010313>

ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE EXTRACTOS ETANÓLICOS DE *Ardisia compressa* Kunth SOBRE LA MOSCA BLANCA *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) Y UNA CEPA DE *Fusarium oxysporum* Schltl

BIOLOGICAL ACTIVITY OF ETHANOLIC EXTRACTS OF *Ardisia compressa* Kunth ON WHITEFLY *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) AND A STRAIN OF *Fusarium oxysporum* Schltl

Molina Maldonado, J.R., E. Ruiz Sánchez, R.H. Andueza Noh, R. Garruña Hernández, F.A. Gutiérrez Miceli, L.F. da Conceição Dos Santos, A. Wong Villarreal y E. Hernández Núñez

ACTIVIDAD BIOLÓGICA DE EXTRACTOS ETANÓLICOS DE *Ardisia compressa* Kunth SOBRE LA MOSCA BLANCA *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) Y UNA CEPA DE *Fusarium oxysporum* Schltl

BIOLOGICAL ACTIVITY OF ETHANOLIC EXTRACTS OF *Ardisia compressa* Kunth ON WHITEFLY *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) AND A STRAIN OF *Fusarium oxysporum* Schltl



Actividad biológica de extractos etanólicos de *Ardisia compressa* Kunth sobre la mosca blanca *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) y una cepa de *Fusarium oxysporum* Schltl

Biological activity of ethanolic extracts of *Ardisia compressa* Kunth on whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius 1889, Hemiptera: Aleyrodidae) and a strain of *Fusarium oxysporum* Schltl

Jesús Rigoberto Molina-Maldonado
Maldonado, Esau Ruiz
Sánchez, Rubén Humberto
Andueza Noh, René Garruña
Hernández, Federico Antonio
Gutiérrez Miceli, Luis Filipe da
Conceição Dos Santos, Arnaldo
Wong Villarreal, Emanuel
Hernández Núñez

**ACTIVIDAD BIOLÓGICA
DE EXTRACTOS
ETANÓLICOS DE *Ardisia
compressa* Kunth SOBRE LA
MOSCA BLANCA *Bemisia
tabaci* (Gennadius 1889,
Hemiptera: Aleyrodidae) Y
UNA CEPA DE *Fusarium
oxysporum* Schltl**

**BIOLOGICAL ACTIVITY OF
ETHANOLIC EXTRACTS OF
Ardisia compressa Kunth ON
WHITEFLY *Bemisia tabaci*
(Gennadius 1889, Hemiptera:
Aleyrodidae) AND A STRAIN
OF *Fusarium oxysporum*
Schltl**

Jesús Rigoberto Molina-Maldonado <https://orcid.org/0009-0006-4037-2994>
Esaú Ruiz-Sánchez. Autor de correspondencia: esau.ruiz@itconkal.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-0245-3305>

División de Estudios de Posgrado, Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Conkal, Mérida, Yucatán. Av. Tecnológico s/n, Conkal,
Yucatán, C.P. 97345

Rubén Humberto Andueza-Noh <https://orcid.org/0000-0001-7776-7937>
René Garruña-Hernández <https://orcid.org/0000-0003-2787-0914>
CONAHCYT-Instituto Tecnológico de Conkal. Av. Tecnológico s/n, Conkal, Yucatán,
C.P. 97345.

Federico Antonio Gutiérrez-Miceli <https://orcid.org/0000-0002-5379-1518>
³Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Carretera Panamericana Km.
1080, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, CP. 29050.

Luis Filipe da Conceição-Dos Santos <https://orcid.org/0000-0002-7516-0581>
⁴Campo Experimental Mocochá. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,
Agrícolas y Pecuarias, Mocochá, Yucatán, C.P. 97454

Arnoldo Wong-Villarreal <https://orcid.org/0000-0002-4199-0632>
Universidad Tecnológica de la Selva. Entronque Toniná Km. 0.5 Carretera Ocosingo-
Altamirano, Ocosingo, Chiapas. C.P. 29950

Emanuel Hernández-Núñez <https://orcid.org/0000-0002-7467-7538>
Departamento de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico Superior de Calkiní.
Avenida Ah Canul, S/N, Calkiní, Campeche. C.P. 24930

RESUMEN: La mosquita blanca *B. tabaci* y la cepa *F. oxysporum* causan elevadas pérdidas económicas en cultivos hortícolas. *Ardisia compressa* Kunth de la familia Primulaceae es una especie vegetal ampliamente distribuida en el Sur de México, cuyo follaje tiene enorme potencial como fuente de productos botánicos para el control de plagas en la agricultura. El objetivo del presente estudio fue evaluar la actividad biológica de extractos etanólicos (EE) de hojas de *A. compressa* sobre *B. tabaci* y *F. oxysporum*, así como determinar el perfil cromatográfico mediante cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (GC-MS) de los extractos. Se emplearon 10 poblaciones silvestres de *A. compressa* recolectadas en el Estado de Chiapas. Por cada población se obtuvo su respectivo EE al 0.2 % (p/v). La evaluación del efecto tóxico contra *B. tabaci* mostró que los extractos Tila Coquijaz alto (TCA) y Yajalón río Pupiltillo (YRP) causaron mayor mortalidad de huevos (98 y 99%) y de ninfas (97%). Los extractos Tila Coquijaz alto (TCA) y Chilón Tiaquil (CTia) causaron mayor efecto de repelencia de adultos (38 y 30%) y los EE Chilón Joybé carretera (CJC) y Tila Coquijaz centro (TCC) causaron la mayor disuasión de oviposición (28 y 26 %). La evaluación de actividad antifúngica (100 y 200 µg mL⁻¹) sobre *F. oxysporum*, mostró que el extracto CJC causó la mayor inhibición de crecimiento micelial (75 y 79%). El análisis de correlación mediante mapas de calor mostró que los efectos de toxicidad y

repelencia de los extractos etanólicos de *A. compressa* sobre *B. tabaci*, estuvieron asociados con las mayores concentraciones de ácido oleico, ácido 9Z-12Z-15Z-octadecanotrienoico, ácido octadecanoico, 3-etil-5-(2-etilbutil)-octadecano, (Z)-18-octadec-9-enolida y γ -Tocoferol. De la misma manera, los mayores porcentajes de inhibición de crecimiento micelial para *F. oxysporum* estuvieron asociados con las altas concentraciones de neofitadieno.

Palabras claves: extracto vegetal, insecticida botánico, actividad repelente, actividad antifúngica.

ABSTRACT: The whitefly *B. tabaci* and the fungus *F. oxysporum* cause high economic losses in horticultural crops. *Ardisia compressa* Kunth from Primulaceae family is a plant species widely distributed in Southern Mexico, which has enormous potential to develop botanical products for pest control in agriculture. The aim of the present study was to evaluate the biological activity of ethanol extracts (EEs) from *A. compressa* leaves on *B. tabaci* and *F. oxysporum*, as well as to determine the chromatographic profile of the extracts by gas chromatography coupled to mass spectrum (GC-MS). Leaves of 10 wild *A. compressa* populations from the State of Chiapas were collected and processed. Each *A. compressa* population obtained its respective EE at 0.2% (w/v). The evaluation of toxic effects against *B. tabaci* showed that Tila Coquijaz higt (TCA) and Yajalón Pupiltillo River (YRP) extracts caused the highest mortality of eggs (98 and 99 %) and nymphs (97%). The evaluation of repellent activity showed that Tila Coquijaz higt (TCA) and Chilon Tiaquil (CTia) extracts had a greater effect on adults (38 and 30%), and Chilon Joybe road (CJC) and Tila Coquijaz center (TCC) extracts caused the highest oviposition deterrence (28 and 26%). The evaluation of antifungal activity [100 and 200 $\mu\text{g mL}^{-1}$] on *F. oxysporum*, showed that CJC extract caused the greatest mycelial growth inhibition (75 and 79%, respectively). The correlation analysis using heat maps showed that the toxicity and repellent effects of *A. compressa* extracts on *B. tabaci* were correlated with the highest concentrations of oleic acid, 9Z,12Z,15Z -octadecanotrienoic acid, octadecanoic acid, 3-ethyl-5-(2-ethylbutyl)-octadecane; (Z)-18-octadec-9-enolide, and γ -tocopherol. In the same way, the mycelial growth inhibition of *F. oxysporum* was associated with a high concentration of neophytadiene.

Key words: plant extract, botanical insecticide, repellent activity, antifungal activity.

INTRODUCCIÓN

El género *Ardisia* pertenece a la familia Primulaceae e incluye cerca de 500 especies, distribuidas en zonas tropicales y subtropicales del mundo (Kobayashi & De Mejía, 2005). Algunas especies poseen un enorme valor farmacológico, alimentario y medicinal, derivado del amplio contenido de metabolitos secundarios, como polifenoles, saponinas, quinonas, isocoumarinas, triterpenos y alquilfenoles (De Mejía & Ramírez-Mares, 2011; Tian-Liang *et al.*, 2024). Se han identificado compuestos con diversa actividad biológica, como bergenina y norbergenina con actividad antiviral, antiinflamatorio, anticancerígeno, antidiabético y antiarrítmico (Bajracharya, 2015; Jouwa Tameye *et al.*, 2020; Mehta *et al.*, 2022); el ácido gálico, ardisinone, embelina y querçitrina con propiedades anticancerígenas (Deng *et al.*, 2010; Newell *et al.*, 2010) y kaempferol con actividad antioxidante y antimicrobiana (Chatatikun & Chiabchaldard, 2017).

En el Sur de México, *Ardisia compressa* Kunth, se encuentra distribuida en áreas boscosas, en traspasios y en cultivos de cafeto (Martínez-Blanco *et al.*, 2019). Los estudios sobre la actividad insecticida y antifúngica de los extractos de *A. compressa* con aplicación en la agricultura son limitados; sin embargo, se tiene antecedentes que otras especies del género *Ardisia* tienen actividad contra fitoparásitos. Por ejemplo, los extractos acuosos de hoja de *A. crenata*, *A. japonica*, *A. standleyana* y *A. crispa*, producen alta mortalidad en ninfas y huevos de *B. tabaci* y *Trialeurodes vaporanarius* (Neal *et al.*, 1998). El extracto metanólico de *A. crenata* es eficaz como disuasivo alimentario contra ninfas de *Schistocerca americana* (Drury) y adultos de *Diaprepes abbreviatus* L. (Sandoval-Mojica & Capinera, 2011). Los extractos vegetales de *A. solanacea* producen alto porcentaje de inhibición de alimentación contra *Spilosoma obliqua* (Al-Abd *et al.*, 2017; Anjum *et al.*, 2019), así como propiedades antifúngicas contra *Trichophyton rubrum*, *Aspergillus fumigatus*, *Rhizoctonia solani* y *Fusarium oxysporum* (Pournami & Pratap,

2021). En un estudio reciente, el extracto acuoso de *A. compressa* mostró actividad *in vitro* contra el agente causante de la roya del cafeto, *Hemileia vastatrix*, inhibiendo el desarrollo total de las urediniosporas (García-Pérez *et al.*, 2021).

Las plagas y enfermedades de los cultivos son una gran limitante en la producción agrícola en todo el mundo. En este contexto, la cepa *F. oxysporum* y la mosquita blanca *B. tabaci* (Gennadius 1889) son dos especies de mayor importancia en la agricultura. La cepa *F. oxysporum*, afecta importantes cultivos básicos produciendo marchitamiento en varias especies como chile habanero, pimentón, tomate, plátanos, (Pérez-Acevedo *et al.*, 2017; Colak Ates *et al.*, 2019; Hernández-Amasifuen *et al.*, 2019; Martínez-Solórzano *et al.*, 2020;). Por su parte, *B. tabaci* es una especie ampliamente dañina, distribuida extensamente en regiones tropicales y subtropicales, que provoca serios daños a especies cultivadas de las familias Fabáceas, Cucurbitáceas, Solanáceas, entre otras, cuyo daño principal es la transmisión de una amplia gama de virus fitopatógenos (Navas-Castillo *et al.*, 2011; Malka *et al.*, 2021). Los extractos de *A. compressa* podrían representar una opción para control de plagas y enfermedades en la agricultura. El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto tóxico/repelente sobre *B. tabaci* y antifúngico contra *F. oxysporum* de los extractos etanólicos (EEs) de las hojas de *A. compressa* y determinar el perfil cromatográfico de los extractos mediante GC-MS.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de plantas y obtención de extractos

Las hojas de *A. compressa* se recolectaron de poblaciones silvestres/naturales en la zona Noreste del Estado de Chiapas, conocido como región Selva Lacandona y Selva Norte Tuliá, específicamente en los Municipios de Tila, Yajalón, Chilón y Ocosingo (Cuadro 1, Figura 1). Las hojas se deshidrataron a 45 °C por 10 días y se molieron con una licuadora (MAN mod. MLU-9090, México) hasta obtener polvo fino. Para la obtención de los extractos etanólicos (EEs) se siguió la metodología propuesta por Cruz-Estrada *et al.* (2013), con modificaciones. Se uso 50 g de material vegetal pulverizado y se agregó 500 mL de etanol (grado reactivo), se mantuvo en agitación constante durante 72 h a una temperatura de 25 °C. Posteriormente se filtró en papel filtro Whatman no.1 para remover fragmentos del material vegetal. La muestra fue concentrada en un rotavapor (Yamato B0400.Yamato VR300, USA.) a presión con vacío constante. Los extractos crudos (material pastoso) obtenidos se mantuvieron en viales oscuros y almacenados en refrigeración a 4 °C hasta su uso.

Cuadro 1. Identificación de los extractos etanólicos obtenidos de hojas de *A. compressa* y ubicación de la localidad de recolecta de las poblaciones.

Table 1. Ethanolic extracts identification obtained from leaves of *A. compressa* and location where the population was collected.

| Extracto | Localidad, Municipio | Altitud (msnm) | Coordenadas |
|----------|------------------------------|----------------|------------------------------------|
| YRP | Río Pupiltillo, Yajalón | 500 | 17° 10' 14.00" N, 92° 19' 49.00" W |
| YBG | Banco de grava, Yajalón | 915 | 17° 10' 00.00" N, 92° 19' 00.00" W |
| CJC | Joybé carretera, Chilón | 972 | 17° 01' 07.00" N, 92° 09' 19.66" W |
| CJR | Joybé río, Chilón | 900 | 17° 01' 11.77" N, 92° 09' 41.76" W |
| CLC | Las Canchas, Chilón | 850 | 17° 00' 19.07" N, 92° 06' 52.92" W |
| CTia | Tiaquil , Chilón | 1141 | 17° 11' 99.00" N, 92° 52' 58.61" W |
| TCA | Coquijaz alto, Tila | 1800 | 17° 17' 05.40" N, 92° 28' 46.20" W |
| TCB | Coquijaz bajo, Tila | 1000 | 17° 12' 53.01" N, 92° 22' 00.12" W |
| TCC | Coquijaz centro, Tila | 1267 | 17° 17' 48.00" N, 92° 25' 30.00" W |
| OGV | Guadalupe Victoria, Ocosingo | 785 | 16° 59' 32.98" N, 91° 55' 48.65" W |

ID= identificador, msnm: metros sobre nivel del mar, YRP= Yajalón río Pupiltillo, YBG= Yajalón Banco de grava, CJC= Chilón Joybé carretera, CJR= Chilón Joybé río, CLC= Chilón Las Canchas, CTia= Chilón Tiaquil, TCA= Tila Coquijaz alto, TCB= Tila Coquijaz bajo, TCC= Tila Coquijaz centro, OGV= Ocósingo Guadalupe Victoria.

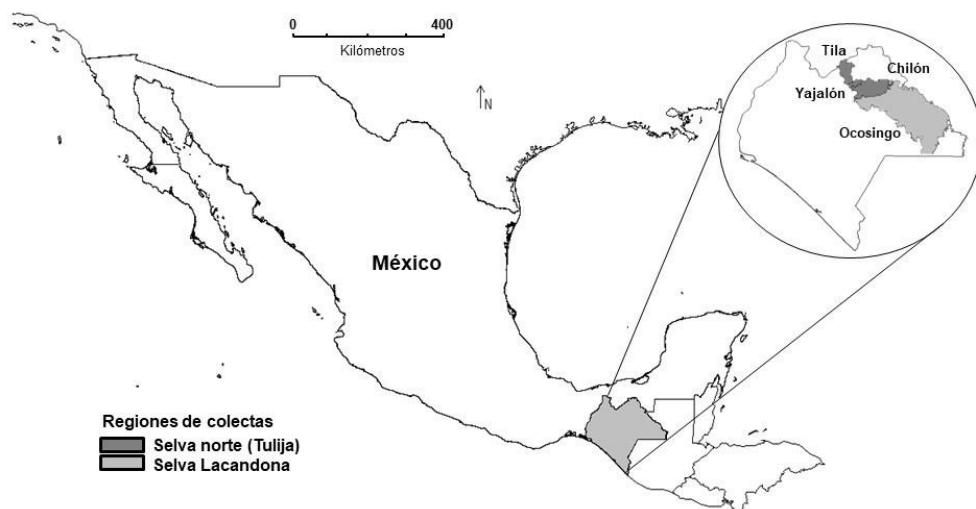


Figura 1. Mapa de México mostrando la región en el Estado de Chiapas donde se recolectaron hojas de diez poblaciones de *A. compressa*.

Figure 1. Map of Mexico showing the region in the State of Chiapas where leaves from ten populations of *A. compressa* were collected.

Bioensayo para evaluar el efecto tóxico sobre *B. tabaci*

Los ejemplares de *B. tabaci* Biotipo B se obtuvieron de una colonia establecida en 2022 (Herrera-Gorocica *et al.*, 2023) en invernaderos del área de investigación hortícola del Instituto Tecnológico de Conkal, en Conkal, Yucatán ($21^{\circ}4'N$, $89^{\circ}31'W$, 10). La colonia se ha mantenido en plantas de berenjena (*Solanum melongena* L.) establecidas en macetas de 10 L dentro del invernadero. Para los bioensayos, los extractos crudos se diluyeron en una solución de etanol y tween 80, a una relación de 1:1:1 (peso/volumen/volumen). Posteriormente esta mezcla fue diluida en agua destilada, para obtener la mezcla final de aplicación de EE al 0.2 % (peso/volumen), con una dilución final del disolvente (etanol y tween 80) de 0.5 % (volumen/volumen).

Plantas de tomate de 25 días de emergencia establecidas en macetas de 2 L, se ubicaron en la colonia de *B. tabaci* por dos semanas para lograr infestación. Las plantas infestadas fueron tratadas con los EEs, mediante la aplicación de las mezclas con atomizador manual, dirigiendo la aspersión al haz y envés de las hojas, hasta lograr punto de escurrimento. Las evaluaciones de mortalidad de huevos y ninfas se realizaron a las 72 h después de la aplicación de los EEs. Para ello, se recolectó una hoja de cada planta tratada y se llevó al laboratorio para contabilizar los individuos muertos (huevos y ninfas) con ayuda de un microscopio estereoscópico (Motic, SMZ-161 SERIES), donde se observaron las hojas por el envés. Los huevos y ninfas necrosadas o con apariencia de desecación, se contabilizaron como individuos muertos (Herrera-Gorocica *et al.*, 2023). Cada hoja representó una repetición. Se tuvieron 10 repeticiones por tratamiento. Se empleó un control negativo de etanol: tween 80 (1:1 volumen/volumen) diluido en agua a una concentración de 0.5% (volumen/volumen).

Todos los valores de mortalidad fueron corregidos por mortalidad natural utilizando la fórmula de Abbott (Abbott, 1925):

$$\% \text{ MC} = \left(1 - \frac{\text{Ts}}{\text{Cs}}\right) \times 100,$$

donde MC es la mortalidad corregida, Ts es el porcentaje de individuos sobrevivientes en el tratamiento (EEs) y Cs es el porcentaje de sobrevivientes en el control.

Bioensayo de repelencia y disuasión de la oviposición de *B. tabaci*

Plantas de tomate de 40 días de edad completamente sanas se trataron por el método de aspersión como se describió para el ensayo de actividad insecticida, siguiendo la metodología de Herrera-Gorocica *et al.* (2023). Despues de la aplicación del tratamiento, las hojas se dejaron secar durante 30 min y se llevaron a un invernadero, donde las plantas tratadas con los EEs se colocaron en hileras alternas a una distancia de 40 cm de hileras de plantas de tomate infestadas con *B. tabaci*. La evaluación de repelencia y disuasión de la oviposición se realizó a los 2 y 5 días después de la aplicación de los EEs. Para tales efectos, se observaron dos hojas del tercio superior de cada planta para contar el número de adultos en el envés de las hojas. Estas hojas se cortaron y llevaron al laboratorio donde se observaron con un estereoscopio para determinar el número de huevos. El área foliar se calculó tomando una fotografía de la hoja y procesando con el software Image J. Una hoja representó una repetición. Se incluyeron 10 repeticiones para cada tratamiento. El porcentaje de repelencia de adultos y disuasión de oviposición de *B. tabaci* se calculó mediante la fórmula:

$$\% \text{ Repelencia} = \left[\frac{\text{C} - \text{T}}{\text{C} + \text{T}} \right] \times 100$$

Donde C y T correspondieron a los valores de número de individuos en el control y el tratamiento, respectivamente, por lo tanto, entre mayores sean los valores indican mayor repelencia (Akhtar *et al.*, 2012).

Actividad *in vitro* de EEs de *A. compressa* contra *F. oxysporum*

Se empleó la cepa de *F. oxysporum* (GemBio acc. OM876888.1). Se cultivó en medio de cultivo PDA (Agar papa dextrosa, BD Bioxon). Para los bioensayos de inhibición de crecimiento micelial se siguió la metodología descrita por Carrillo-Morales *et al.* (2023), empleando concentraciones de 100 y 200 µg. mL⁻¹ de cada EEs, mismos que se adicionaron al medio PDA aún en estado líquido (45 °C) y en proceso de solidificación. El medio PDA con EE se vertió en cajas Petri (1 cm x 10 cm). Las cajas Petri se conservaron en refrigeración hasta su uso. Posteriormente, un disco de 5 mm de diámetro con PDA con crecimiento micelial se colocó en el centro de las placas con PDA adicionadas con EEs y placas con PDA sin adición de EEs (control). Las cajas Petri se incubaron durante 96 h a 28 °C y se midió el diámetro de la colonia fúngica con un vernier digital (INSIZE 1108-150). El ensayo se estableció por triplicado y se expresó en porcentaje de inhibición de crecimiento micelial comparado con el control, aplicando la fórmula:

$$\% \text{ ICM} = \left[1 - \left(\frac{\text{Dc}}{\text{Dt}} \right) \right] \times 100,$$

Donde ICM es el porcentaje de inhibición de crecimiento micelial, Dt es el diámetro de la zona de crecimiento en las placas tratadas y Dc es el diámetro de la zona de crecimiento en la placa de control

Análisis del perfil cromatográfico de EEs de hojas de *A. compressa* por GC-MS

La identificación de los metabolitos secundarios de los EEs de *A. compressa* se realizó mediante la técnica de la cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas. Se empleó en un GC TRACE de la marca Thermo Scientific con un detector de masas con trampa de iones ITQ900 (Thermo Electron Corporation, Milán, Italia). El gas portador fue helio con un caudal de 1 mL/min. La columna utilizada fue TRACE-5MS (30 m, 0.25 µm de película y 0.25 mm de diámetro interno). El programa utilizado fue fullscan y se inició con una temperatura de 50 °C que se mantuvo durante 1 min., posteriormente, se aplicó una rampa de temperatura con

incrementos de 7 °C/min hasta 300 °C. Los 300 °C se mantuvieron durante 5 min., la temperatura de la interfase fue de 280 °C y la temperatura de la masa fue de 200 °C.

Análisis de datos

Los datos fueron previamente transformados a función de coseno de raíz cuadrada para cumplir los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. Los datos transformados se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias con la prueba Tukey ($P < 0.05$) en el software estadístico Infostat versión 2018 para Windows (Di Rienzo *et al.*, 2018). Para la discriminación de los extractos por su efecto biológico, se empleó la base de datos de compuestos mayoritarios y se analizó mediante análisis de mapas de calores y matriz de correlación de Pearson en el software RStudio para Windows versión 2023. 12.1+ 402.

RESULTADOS

Efecto tóxico sobre estadios inmaduros de *B. tabaci*

Los extractos etanólicos de *A. compressa* al 0.2% (p/v) mostraron efectos significativos ($P < 0.05$) en la mortalidad de huevos y ninfas de *B. tabaci* (Cuadro 2). En huevos, los extractos TCA y YRP causaron la mayor mortalidad, con valores de 98.1 y 99.1%, seguido de los extractos CTia, YBG y CLC que causaron entre 83.2 y 85.6% de mortalidad. El resto de los extractos etanólicos causaron entre 35.0 y 68.0% de mortalidad. En ninfas, los extractos TCA y CLC causaron mayor mortalidad, con valores de 94.7 y 97.4%, seguido de los extractos de TCB, YBG, YRP y TCC, con los valores de 83.9 a 93.9%. El resto de los extractos tuvieron efectos moderados a bajos, mismos que causaron mortalidad de ninfas entre 32.5 a 75.8% (Cuadro 2).

Repelencia en adultos y disuasión de la oviposición

Los extractos etanólicos de *A. compressa* causaron efectos significativos ($P < 0.05$) en la repelencia de adultos, pero no en la disuasión de oviposición (Cuadro 2). Para la repelencia de adultos, el extracto TCA tuvo mayor efecto (38.3 % repelencia), seguido de CTia (30.2 % repelencia). Para la disuasión de oviposición, los extractos CJC y TCC tuvieron mayor efecto (28.1 y 26.0% disuasión de oviposición), seguido del extracto TCA (22.0% disuasión de oviposición). El resto de los extractos causaron entre 5.7 a 16.8% disuasión de oviposición (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de los extractos etanólicos de *A. compressa* al 0.2% (p/v) sobre estadios inmaduros y adultos de *B. tabaci* a las 48 h posterior a la aplicación.

Table 2. Effect of ethanolic extracts of *A. compressa* at 0.2% (w/v) on immature and adult stages of *B. tabaci* 48 h after application.

| Extractos | % Mortalidad | | % Repelencia de adultos | % Disuasión de oviposición |
|--------------------|----------------|--------------------|-------------------------|----------------------------|
| | Huevos | Ninfas | | |
| CJC | 52.1 ± 12.0 bc | 50.6 ± 12.8 ab | 24.9 ± 7.1 ab | 28.2 ± 10.1 a |
| CJR | 46.2 ± 9.7 c | 32.5 ± 10.6 b | 11.0 ± 5.0 ab | 16.8 ± 7.7 a |
| CLC | 85.6 ± 3.8 ab | 94.7 ± 3.2 a | 28.9 ± 7.7 ab | 5.7 ± 4.2 a |
| CTia | 83.2 ± 3.9 ab | 75.8 ± 12.6 ab | 30.2 ± 9.9 ab | 10.4 ± 7.8 a |
| TCA | 98.1 ± 1.9 a | 97.4 ± 2.6 a | 38.3 ± 9.6 a | 22.0 ± 8.5 a |
| TCB | 67.9 ± 7.6 bc | 83.9 ± 10.1 a | 19.6 ± 7.9 ab | 8.9 ± 6.0 a |
| TCC | 55.6 ± 12.7 bc | 93.9 ± 2.8 a | 16.2 ± 4.9 ab | 25.7 ± 10.9 a |
| YRP | 99.1 ± 0.9 a | 91.5 ± 4.2 a | 19.2 ± 0.4 ab | 11.5 ± 6.6 a |
| YBG | 84.8 ± 4.5 ab | 85.5 ± 3.3 a | 1.1 ± 1.1 b | 10.8 ± 6.5 a |
| OGV | 34.9 ± 5.0 c | 49.2 ± 22.4 ab | 23.8 ± 10.2 ab | 17.5 ± 10.8 a |
| <i>P < 0.01</i> | | <i>P < 0.01</i> | <i>P < 0.01</i> | <i>P = 0.29</i> |

| | | | |
|----------|---------|----------|----------|
| F = 9.50 | F= 4.87 | F = 2.58 | F = 1.22 |
| gl = 69 | gl = 49 | gl = 99 | gl = 99 |

CJC= Chilón Joybé carretera, CJR= Chilón Joybé río, CLC= Chilón Las Canchas, CTia= Chilón Tiaquil, TCA= Tila Coquijaz alto, TCB= Tila Coquijaz bajo, TCC= Tila Coquijaz centro, YRP= Yajalón río Pupiltillo, YBG= Yajalón Banco de grava, OGV= Ocósingo Guadalupe Victoria. Medias con diferente literal en cada columna indican diferencia estadística significativa $P < 0.05$, Tukey ± error estándar

Inhibición de crecimiento micelial en *F. oxysporum*.

Los extractos etanólicos de *A. compressa* tuvieron efectos significativos ($P < 0.05$) en el crecimiento micelial de *F. oxysporum*. En ambas concentraciones, 100 y 200 $\mu\text{g.mL}^{-1}$, el extracto CJC causó la mayor inhibición de crecimiento micelial (75.4 y 79.2%), seguido de los extractos TCB, TCC, YRP, YBG y OGV (48.4 a 55.3%). Los extractos CJR, CLC, CTia y TCA tuvieron muy bajos efectos (menor a 13.0%) en la inhibición de crecimiento micelial (Cuadro 3).

Cuadro 3. Porcentaje de inhibición del crecimiento micelial de *F. oxysporum* a las 96 h de exposición con extractos etanólicos de hojas de *A. compressa*.

Table 3. Percent inhibition of mycelial growth of *F. oxysporum* at 96 h of exposure with ethanolic extracts of leaves of *A. compressa*.

| Extracto | % Inhibición de crecimiento micelial | |
|-----------------|---|---|
| | (100 $\mu\text{g.mL}^{-1}$) | (200 $\mu\text{g.mL}^{-1}$) |
| CJC | 75.41 ± 1.6 a | 79.17 ± 1.6 a |
| CJR | 9.42 ± 4.3 c | 11.51 ± 4.6 c |
| CLC | 12.46 ± 6.9 c | 5.35 ± 3.6 c |
| CTia | 3.50 ± 2.8 c | 10.76 ± 5.9 c |
| TCA | 3.45 ± 2.5 c | 5.45 ± 4.1 c |
| TCB | 51.83 ± 4.3 b | 51.63 ± 2.2 b |
| TCC | 51.64 ± 4.5 b | 53.50 ± 2.5 b |
| YRP | 49.62 ± 3.2 b | 55.33 ± 2.3 b |
| YBG | 48.35 ± 3.9 b | 54.55 ± 3.5 b |
| OGV | 52.42 ± 2.6 b | 53.57 ± 2.9 b |
| $P \leq 0.0001$ | | $P \leq 0.0001$ |
| $F = 43.5$ | | $F = 57.9$ |
| $gl = 50$ | | $gl = 50$ |

Medias con diferente literal en cada columna indican diferencia estadística significativa $P < 0.05$, test Tukey ± error estándar.

Perfil cromatográfico de los EEs de *A. compressa* por GC-MS

Los análisis por GC-MS de los EEs de *A. compressa*, obtenido de las diferentes localidades, se muestran en el Cuadro 4. En general, se identificaron un total de 36 constituyentes, entre los que destacan: seis ácidos carboxílicos, un alcano alifático, una cetona cíclica, un anhídrido, tres fenoles, nueve compuestos terpénicos (dos diterpenos, cuatro sesquiterpenos, tres triterpenos), diez ésteres de ácidos carboxílicos, una lactona, un ftalato y tres fitoesteroles. La abundancia de compuestos mayoritarios se determinó según el porcentaje relativo del compuesto en relación con las áreas totales de todos los compuestos presentes en el extracto (Cuadro 4).

Cuadro 4. Compuestos identificados por GC-MS en EE de hojas de *A. compressa*.**Table 4.** Compounds identified by GC-MS in EE of leaves of *A. compressa*.

| No. | Familia / Compuesto | TR(min) | FQ | PM | Extracto etanólico (% área) |
|---------------------------------------|--|---------|--|--------|--|
| Ácidos carboxílicos | | | | | |
| 1 | Ácido tetradecanoico. | 15.2 | C ₁₄ H ₂₈ O ₂ | 228.37 | TCA (1.8) |
| 2 | Ácido n-hexadecanoico. | 16.7 | C ₁₆ H ₃₂ O ₂ | 256.42 | CJC (11.55), CLC (11), TCA (14), OGV (21.3), YRP (22.8), YBG (23.5) |
| 3 | Ácido oleico. | 18.1 | C ₁₈ H ₃₄ O ₂ | 282.46 | YRP (7.7), YBG (9.5) |
| 4 | Ácido 9Z,12Z,15Z-octadecatrienoico. | 18.5 | C ₁₈ H ₃₀ O ₂ | 278.43 | CJC (10.5), CLC (4.5), TCA (13.4), OGV (13.3), CTia (21.3) |
| 5 | Ácido <i>cis</i> -10-nonadecenoico. | 20.4 | C ₁₉ H ₃₆ O ₂ | 296.49 | CTia (3.5), TCB (5.2) |
| 6 | Ácido octadecanoico. | 19.4 | C ₁₈ H ₃₆ O ₂ | 284.48 | CJC (2.9), CLC (2.2), TCA (2), TCB (14), CTia (2) |
| Alifático | | | | | |
| 7 | 3-etil-5-(2-etilbutil)-octadecano. | 22.1 | C ₂₆ H ₅₄ | 366.71 | CJC (3.8) |
| Cetona cíclica | | | | | |
| 8 | 6-metilenbiciclo[3.2.0]hept-3-en-2-ona. | 8.6 | C ₈ H ₈ O | 120.15 | TCA (1.6) |
| Anhidridos | | | | | |
| 9 | Anhídrido cis-acónitico. | 6.7 | C ₆ H ₄ O ₅ | 156.09 | CLC (1.7) |
| Fenoles | | | | | |
| 10 | <i>Trans</i> 6-(<i>p</i> -tolil)-2-metil-2-heptenol. | 13.8 | C ₁₅ H ₂₂ O | 218.33 | CTia (1.9), YBG (6.7) |
| 11 | Catecol. | 8.6 | C ₆ H ₆ O ₂ | 110.11 | CJC (4.5), CLC (13.4), TCA (3.7), TCB (1.5) |
| 12 | 1,2,3-Bencenetriol. | 11 | C ₆ H ₆ O ₃ | 126.11 | CJC (3.7), CLC (12.9), TCA (5.3), TCB (1.9) |
| Diterpenos | | | | | |
| 13 | Neofitadieno. | 15.9 | C ₂₀ H ₃₈ | 278.52 | CJC (1.7), TCB (1.6) |
| 14 | Fitol. | 17.8 | C ₂₀ H ₄₀ O | 296.53 | CJC (2.3), CLC (8.8), CTia (3.8), TCA (2.8), TCB (3.6), YRP (2.7), YBG (7.4), OGV (15.2) |
| Sesquiterpenos | | | | | |
| 15 | 8S, 13-Cedran-diol. | 14.7 | C ₁₅ H ₂₆ O ₂ | 238.37 | YRP (3.6) |
| 16 | 4,4,8-trimetilticiclo[6.3.1.0(1,5)]dodecano-2,9-diol. | 15.6 | C ₁₅ H ₂₆ O ₂ | 238.37 | YRP (2.9) |
| 17 | Epóxido <i>cis</i> -Z- α -bisaboleno. | 14.9 | C ₁₅ H ₂₄ O | 220.35 | YRP (4.2) |
| 18 | 1-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)-4-metil-benceno. | 11.2 | C ₁₅ H ₂₂ | 202.33 | YBG (3.3) |
| Triterpenos | | | | | |
| 19 | Escualeno. | 24.6 | C ₃₀ H ₅₀ | 410.72 | CJC (4.5), TCA (1.8), CLC (3.0) |
| 20 | α -Amirina. | 28.2 | C ₃₀ H ₅₀ O | 426.72 | CJC (6.8), TCA (6.7), TCB (6.8), CTia (5.4) |
| 21 | β -Amirina. | 28.5 | C ₃₀ H ₅₀ O | 426.7 | CJC (11.4), TCA (13.9), TCB (11) |
| Ésteres de ácidos carboxílicos | | | | | |
| 22 | Éster dimetílico del ácido [1,1':2',1"-terfenil]-3',4'-dicarboxílico, 5',6'-difenil. | 5.5 | C ₃₄ H ₂₆ O ₄ | 498.6 | CJR (1.8) |
| 23 | Éster metílico del ácido [1,1'-biciclopropil]-2-octanoico, 2'-hexil. | 18.3 | C ₂₁ H ₃₈ O ₂ | 322.5 | YRP (2.8) |
| 24 | Éster etílico del ácido octadecanoico. | 18.6 | C ₂₀ H ₄₀ O ₂ | 312.53 | OGV (2.2) |

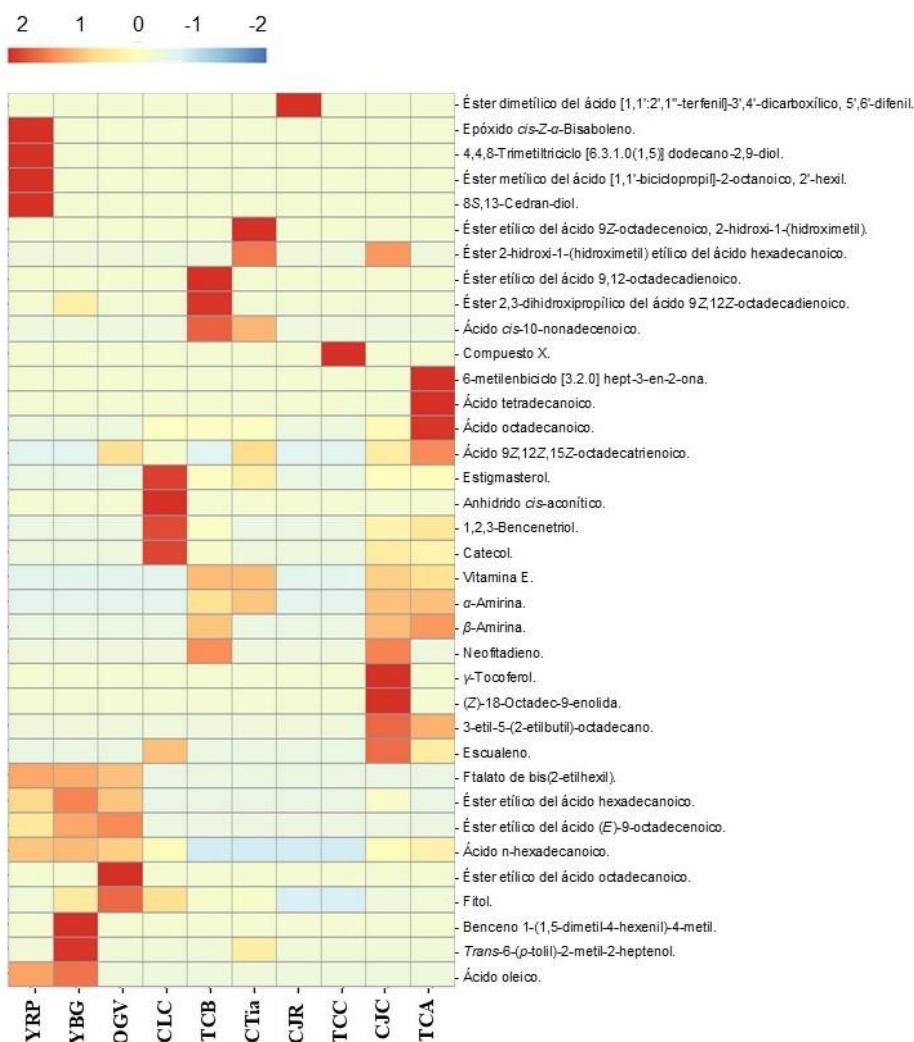
| No. | Familia / Compuesto | TR(min) | FQ | PM | Extracto etanólico (% área) |
|----------------------|--|---------|--|--------|--|
| 25 | Éster etílico del ácido octadecadienoico. | 9,12- | C ₂₀ H ₃₆ O ₂ | 308.5 | TCB (15.1), YBG (3.8) |
| 26 | Ester etílico del ácido hexadecanoico 2-hidroxi-1-(hidroximetil). | 22.5 | C ₁₉ H ₃₈ O ₄ | 330.5 | CJC (1.8), CTia (2.1) |
| 27 | Éster 2,3-dihidroxipropíl del ácido 9Z,12Z-octadecadienoico. | 23.3 | C ₂₁ H ₃₈ O ₄ | 354.5 | TCB (1.9) |
| 28 | Éster etílico 2-hidroxi-1-(hidroximetil) del ácido 9Z-octadecenoico. | 23.8 | C ₂₁ H ₄₀ O ₄ | 356.5 | CTia (4.4) |
| 29 | Éster etílico del ácido hexadecanoico. | 16.8 | C ₁₈ H ₃₆ O ₂ | 284.48 | CJC (2), YRP (7.5), YBG (11.6), OGV (8.4) |
| 30 | Éster etílico del ácido (E)-9-Octadecenoico. | 18.3 | C ₂₀ H ₃₈ O ₂ | 310.51 | YRP (4.3), YBG (7.2), OGV (8.5) |
| 31 | Compuesto x. | 5.4 | C ₃₄ H ₄₄ Cl N ₅ O ₂ | 590.2 | TCC (1.3) |
| Lactona | | | | | |
| 32 | (Z)-18-Octadec-9-enolida. | 18.8 | C ₁₈ H ₃₂ O ₂ | 280.45 | CJC (6.7) |
| Ftalato | | | | | |
| 33 | Ftalato de bis (2-etilhexil). | 21.5 | C ₂₄ H ₃₈ O ₄ | 390.6 | YRP (23.9), YBG (23.3), OGV (21.3) |
| Fitoesteroles | | | | | |
| 34 | γ-Tocoferol. | 25.7 | C ₂₈ H ₄₈ O ₂ | 416.68 | CJC (1.7) |
| 35 | Vitamina E. | 26.4 | C ₂₉ H ₅₀ O ₂ | 430.71 | CJC(2), TCA (2.2), TCB (1.7), CTia (2.2) |
| 36 | Estigmasterol. | 28.1 | C ₂₉ H ₄₈ O | 412.69 | CJC (1.8), CLC (8.7), TCA (2.8), TCB (1.8), CTia (1.5) |

TR= tiempo de retención, FQ= fórmula química, PM= peso molecular. Compuesto X= éster *terc*-butílico de [5-(5-Cloro-3,4-dimetil-1H-pirrol-2-ilmetilen)-,4-dimetil-5H-pirrol-2-il]-[5-(5-ciano-4, 4, 5-trimetil-4, 5-dihidro-3H-pirrol-2-ilmetileno)-4,4-dimetilpirrolidin-2-ilen]-ácido acético.

La distribución de 36 compuestos determinados por GC-MS varió entre extractos (Figura 2). El extracto YRP mostró mayor concentración de los compuestos epóxido de *cis-Z*-α-Bisabolenol; 8S,13-cedran diol; éster metílico del ácido [1,1'-biciclopropil]-2-octanoico, 2'-hexil y 4,4,8-trimetiltriciclo [6.3.1.0(1,5)] dodecano-2,9-diol. El extracto YBG tuvo altas concentraciones de *trans*-6-(*p*-tolil)-2-metil-2-heptenol; benceno 1-(1,5-dimetil-4-hexenil)-4-metil, seguido de ácido oleico y éster etílico del ácido hexadecanoico. El extracto OGV tuvo altas concentraciones de éster etílico del ácido octadecanoico seguido de fitol. El extracto CJC tuvo como compuestos mayoritarios a γ-Tocoferol y (Z)-18-Octadec-9-enolida, seguidos de escualeno y 3-etyl-5-(2-ethylbutil)-octadecano. Similarmente en el extracto TCA se encontró como compuestos mayoritarios el ácido tetradecanoico; 6-Metilenebicyclo [3.2.0] hept-3-en-2-ona; ácido octadecanoico, seguido del ácido 9Z,12Z,15Z-octadecatrienoico. El extracto CLC mostró como compuestos mayoritarios al estigmasterol y anhídrido *cis*-aconítico, seguidos de 1,2,3-bencenetriol y catecol. En el extracto CJR, el compuesto más abundante fue éster dimetílico del ácido [1,1':2',1"-terfenil]-3',4'-dicarboxilico, 5',6'-difenil. El extracto TCC tuvo como compuesto mayoritario al éster *terc*-butílico de [5-(5-Cloro-3,4-dimetil-1H-pirrol-2-ilmetilen)-,4-dimetil-5H-pirrol-2-il]-[5-(5-ciano-4,4,5-trimetil-4,5-dihidro-3H-pirrol-2-ilmetileno)-4,4-dimetilpirrolidin-2-ilen]-ácido acético. El extracto CTia tuvo como compuestos mayoritarios al éster etílico 2-hidroxi-1-(hidroximetil) del ácido 9Z-octadecenoico y éster etílico del ácido hexadecanoico 2-hidroxi-1-(hidroximetil). En el extracto TCB los compuestos mayoritarios fueron éster etílico del ácido 9,12-octadecadienoico; 2,3-dihidroxipropíl éster del ácido 9Z,12Z-octadecadienoico y el ácido *cis*-10-nonadecenoico (Figura 2).

Análisis de correlación entre actividad biológica y perfil cromatográfico

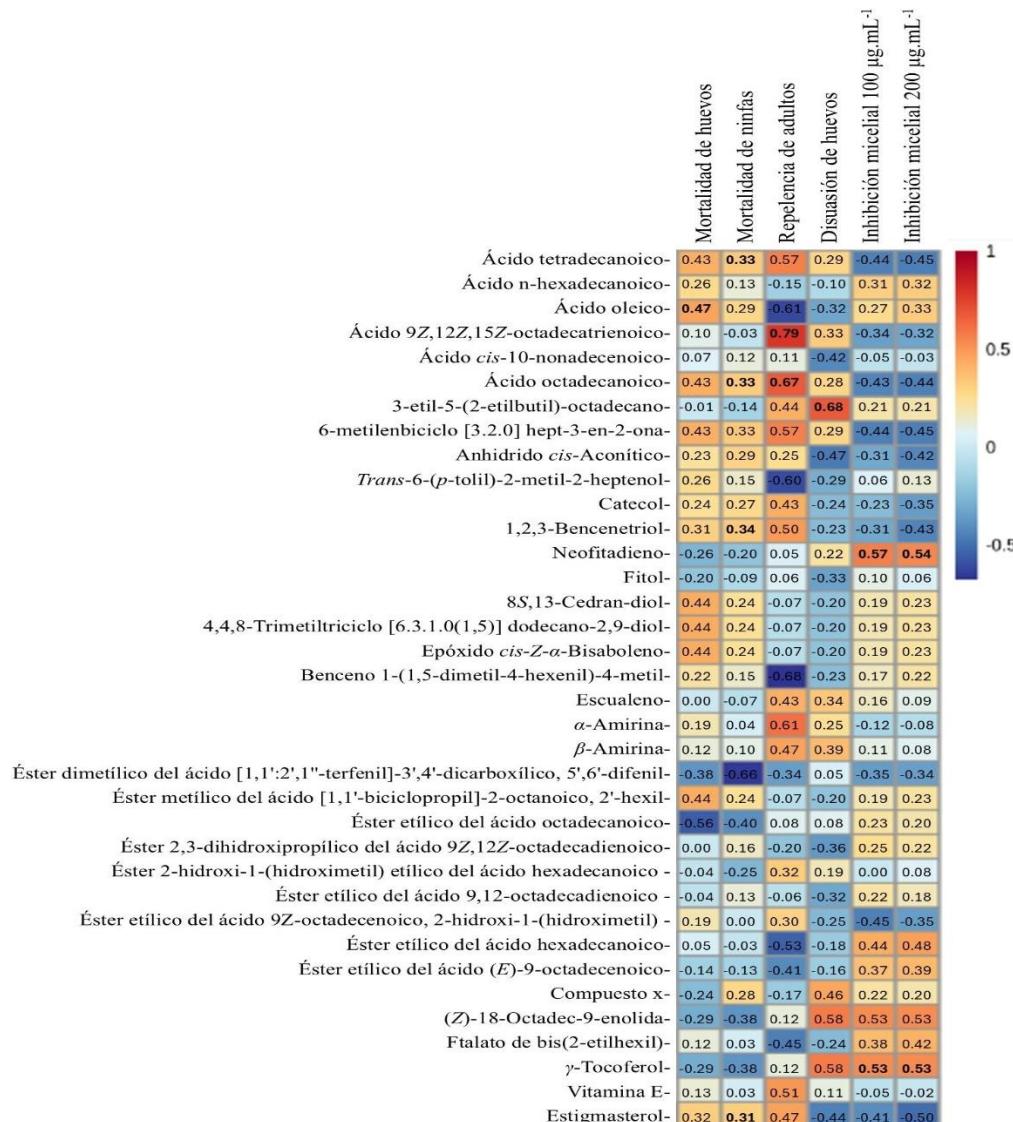
Se determinó la correlación entre la actividad biológica y la abundancia relativa de compuestos en los extractos (Figura 3), con variación de coloración azul a rojo, ubicando las correlaciones positivas como aquellas donde la mayor abundancia de los compuestos produjo mayor efecto. Para el caso de la mortalidad de *B. tabaci*, se observó que la mayor mortalidad de huevos y ninfas estuvo asociada a la alta abundancia de ácido oleico y 1,2,3-bencenetriol en los EEs, respectivamente. Se observó correlación positiva entre la repelencia de adultos y la abundancia del ácido 9Z-12Z-15Z-octadecanotrienoico y el ácido octadecanoico, en la disuasión de oviposición la correlación fue con el compuesto de 3-etil-5-(2-etilbutil)-octadecano. El mayor porcentaje de ICM en *F. oxysporum* se observó correlacionado con altas concentraciones del compuesto neofitadieno en los EEs.



Compuesto X= éster *terc*-butílico de [5-(5-Cloro-3,4-dimetil-1H-pirrol-2-ilmetilen)- ,4-dimetil-5H-pirrol-2-il] - [5-(5-ciano-4,4, 5-trimetil-4,5-dihidro-3H-pirrol-2-ilmetileno)-4,4-dimetilpirrolidin-2-ilén]-ácido acético.

Figura 2. Mapa de calor del análisis de clúster jerárquico de metabolitos diferenciados por GC-MS en los EEs de *A. compressa*, los porcentajes relativos de las concentraciones con tres replicadas se muestran en colores que van del rojo (alta concentración) al azul (baja concentración).

Figure 2. Heatmap of a hierarchical cluster analysis of metabolites differentiated by GC-MS in *A. compressa* EEs, relative percentages of concentrations with three replicates are shown in colors ranging from red (high concentration) to blue (low concentration).



Compuesto X= éster *terc*-butílico de [5-(5-Cloro-3,4-dimetil-1H-pirrol-2-ilmetilen)-,4-dimetil-5H-pirrol-2-il] - [5-(5-ciano-4,4,5-trimetil-4,5-dihidro-3H-pirrol-2-ilmetilen)-4,4-dimetilpirrolidin-2-ilén]-ácido acético.

Figura 3. Mapa de calor de correlación entre los compuestos de 10 extractos etanólicos de hojas de *A. compressa* y la actividad biológica contra *B. tabaci* y *F. oxysporum*, con empleo del método de distancias de Pearson y el valor del coeficiente.

Figure 3. Correlation heat map between the compounds of 10 ethanolic extracts of *A. compressa* leaves and the biological activity against *B. tabaci* and *F. oxysporum*, using Pearson's distance method and the value of the coefficient.

DISCUSIÓN

En la actualidad el uso de derivados vegetales para manejo de plagas y fitopatógenos en la agricultura es un área que ha adquirido enorme relevancia, principalmente por la ventaja de este tipo de productos sobre los agroquímicos convencionales, que incluye una fácil degradación biológica y menor riesgo de resistencia en la plaga. En el presente estudio se observó que los extractos etanólicos (EEs) de hojas provenientes de diferentes poblaciones de *A. compressa* presentaron efectos tóxicos y repelentes sobre *B. tabaci*, y actividad antifúngica contra *F. oxysporum*.

De manera general la actividad de los EEs de TCA y YBG causaron alta mortalidad ($> 95\%$) de huevos, mientras que los EEs de CLC, TCA, TCC y YRP ocasionaron alta mortalidad ($> 90\%$) en ninfas de *B. tabaci*. Estos efectos son considerados altos, como se ha reportado en literatura con EEs al 0.2% de otras especies. Por ejemplo, los EEs de hojas de *Eugenia winzerlingii* causaron alrededor 90 a 100 % de mortalidad en huevos y ninfas de *B. tabaci* (Cruz-Estrada *et al.*, 2013, 2019b). Con respecto al potencial de *A. compressa* como fuente de extracto para el manejo de plagas. Se considera que algunas poblaciones pueden ser consideradas de alta eficiencia para el control de *B. tabaci*. Otras especies de *Ardisia*, como *A. crenata* y *A. japonica* también han mostrado alta efectividad insecticida, se ha documentado efectos antialimentarios de los extractos de *A. solanacea* ((Anjum *et al.*, 2019). Es importante mencionar que, si bien varios EEs de *A. compressa* causaron alta mortalidad en inmaduros de *B. tabaci*, su efecto en la repelencia de adultos ($< 40\%$) y disuasión de oviposición ($< 30\%$) fue muy bajo, lo cual indica que los metabolitos contenidos en los extractos tienen principalmente efectos tóxicos letales. Es probable que los EEs contengan metabolitos repelentes en concentraciones muy bajas, lo que pudo afectar su efectividad en la evaluación.

Los EEs de *A. compressa* (100 y 200 $\mu\text{g mL}^{-1}$) también tuvieron efectos moderados (50-80 %) en la inhibición de crecimiento micelial de *F. oxysporum*. El EE más activo (CJC) causó entre 75-80% de inhibición de crecimiento micelial (ICM). En literatura sólo existe un reporte de evaluación antifúngica de extractos acuosos de *A. compressa*, que muestra inhibición de 83% de germinación de esporas de *Hemilia vastatrix* (García-Pérez *et al.*, 2021). En otros estudios sobre evaluación de extractos orgánicos, en concentraciones de 100 y 200 $\mu\text{g mL}^{-1}$, se ha observado alta efectividad en la inhibición de crecimiento micelial, como los extractos metanólicos de hojas y tallo de *Vitex mollis* contra *F. verticilliooides* que produjeron valores hasta de 90% la ICM (Valencia-Botín *et al.*, 2018). Así también el extracto hexánico de *Syzygium aromaticum* causó más del 90% de ICM en *Fusarium* spp. Los extractos etanólicos de *Mosannonia depressa* (corteza de tallo y raíz), *Parathesis cubana* (raíz) y *Piper neesianum* (hojas) causaron 100% de ICM en *F. equiseti* y *F. oxysporum* (Cruz-Cerino *et al.*, 2020). Tomando como base los resultados de estos estudios, se observa que los EEs de *A. compressa* tienen efectos moderados en *F. oxysporum*.

En el análisis GC-MS mostró que los grupos de compuestos más comunes fueron los ácidos grasos, fenoles, anhídridos, diterpenos, triterpenos, sesquiterpenos, ésteres de ácidos grasos, ftalatos y fitoesteroles. Esto concuerda con los análisis fitoquímicos previos de hojas de otras especies de *Ardisia*. Por ejemplo, Wong *et al.* (2021), aislaron compuestos fenólicos en el extracto hidro-etanol de *A. elliptica* al 50 y 70% (v/v). Yeong *et al.* (2014), reportaron una mezcla isomérica de α y β -amirina (triterpenos) y 2-metoxi-6-undecil-1,4-benzoquinona (quinona) del extracto hexánico de la raíz de *A. crispa*. Schindler *et al.* (2021), identificaron flavonoides (flavonoles and flavan-3-ol), catequina, epigalocatequina e isoqueracetina de los extractos metanólicos de hojas de *A. crenata*. Ma *et al.* (2022), identificaron saponinas triterpenoides de extractos metanólicos de *A. japonica*. Syed *et al.* (2013), reportaron la presencia de alcaloides, taninos, flavonoides, saponinas, gomas y carbohidratos, esteroides, terpenoides del extracto etanólico de *A. colorata* (corteza y hojas). Derivado de estos estudios y los análisis del presente trabajo, es claro que el género *Ardisia* contiene metabolitos terpenoides, flavonoides, saponinas y esteroides.

En este estudio se determinó la correlación entre la actividad biológica y la presencia de ciertos metabolitos mayoritarios. Para el caso de *B. tabaci*, los efectos más altos se tuvieron al aplicar el extracto TCA, donde el análisis de GC-MS mostró la existencia de compuestos mayoritarios como el ácido tetradecanoico; 6-metileno biciclo [3.2.0] hept-3-en-2-ona; ácido octadecanoico; el ácido 9Z,12Z,15Z-octadecatrienoico; α -amirina; β -amirina; fitol; 1,2,3-benzenetriol; catecol; 3-etil-5-(2-ethylbutil)-octadecano; escualeno, vitamina E y estigmasterol. Mientras que para la inhibición del crecimiento micelial de *F. oxysporum* el extracto que mostró mayor actividad fue CJC, que mostró como componentes mayoritarios a γ -tocoferol; α -amirina; β -amirina; (Z)-18-octadec-9-enólido; escualeno; 3-etil-5-(2-ethylbutil)-octadecano; neofitadieno; 1,2,3-benzenetriol; ácido n-hexadecanoico; ácido 9Z,12Z,15Z-octadecatrienoico; ácido octadecanoico, ácido hexadecanoico; etil éster del ácido hexadecanoico; etil éster 2-hidroxi-1-(hidroximetil); catecol; fitol; vitamina E y estigmasterol.

Al analizar la presencia de metabolitos mayoritarios en los extractos y su relación con el nivel de actividad, en los mapas de calor se observó que la mortalidad de huevos se correlacionó con alta abundancia del ácido oleico. Se ha observado que el ácido oleico tiene propiedades insecticidas y funciona como protector de cultivos contra plagas, como se ha descrito en otros estudios. Por ejemplo, posee función protectora contra larvas de *Spodoptera frugiperda* (Ramos-López *et al.*, 2012). Incluso, el ácido oleico y otros ácidos grasos son letales contra varias especies de insectos fitófagos. Se ha demostrado el efecto de los ácidos grasos contra insectos puede variar dependiendo de su estructura y longitud (Cruz Estrada *et al.*, 2019a). En tanto, la mortalidad de ninfas fue correlacionada con la abundancia del compuesto 1,2,3-benzenetriol (pirogalol), dicho compuesto ha sido reportado con buena capacidad insecticida. Por su parte, la actividad de repelencia de adultos de *B. tabaci*, se asoció al contenido de ácidos grasos como el ácido 9Z-12Z-15Z-octadecanotrienoico y ácido octadecanoico; mientras que la disuasión de oviposición se correlacionó con el contenido de 3-etil-5-(2-etilbutil)- octadecano. Estos dos metabolitos no han sido reportados con efectos contra alguna especie de plaga. En general, se ha documentado que los compuestos alifáticos de cadenas largas y ácidos grasos poseen acción biológica debido a la capacidad de incorporarse a la membrana celular y generar mayor fragilidad para causar desintegración de la pared celular (Jangir *et al.*, 2020). Con respecto a la actividad antifúngica, el análisis de mapa de calor mostró correlación positiva entre la actividad biológica y el contenido de neofitadieno y α -amirina y β -amirina. Estudios sobre la actividad antifúngica de compuestos naturales, han demostrado que el neofitadieno puede actuar en sinergia con otros compuestos, principalmente ácidos grasos para ejercer su efecto antifúngico (Dikhoba *et al.*, 2019; Ramírez-López *et al.*, 2023). También se sabe que los metabolitos triterpénicos (α -amirin y β -amirina) actúan como agentes antifúngicos contra varias especies de cepas filamentosas (Dikhoba *et al.*, 2019). Diversas investigaciones señalan que estos compuestos poseen la habilidad de modificar la permeabilidad de la membrana, ocasionando liberación de cationes al citoplasma y originando degradación en la membrana celular en varias especies de hongos (Leite *et al.*, 2014; J. H. Wong *et al.*, 2019). En consecuencia, la inhibición de crecimiento fúngico podría ser el resultado de la acción sinérgica de las sustancias presentes en el extracto. Además, otros compuestos como el catecol y el fitol fueron identificados en el extracto CJC y de acuerdo con, Cruz Vázquez *et al.* (2019), el catecol tiene la capacidad de actuar como pro-oxidantes causando daños moleculares en el ADN y las proteínas. Asimismo, se ha informado que el constituyente fitoquímico fitol tiene actividad antifúngica, debido a la producción excesiva de especies reactivas de oxígeno que genera daño al ADN y desequilibrio en la membrana mitocondrial, lo que resulta en apoptosis celular (Agus, 2020).

Es importante notar que los compuestos encontrados en los EEs de *A. compressa*, sugieren que el amplio rango de metabolitos y su abundancia en *A. compressa* depende del sitio de procedencia del material vegetal, pues los factores ambientales contribuyen en la síntesis y acumulación de metabolitos secundarios en el follaje de las plantas (Vázquez-León *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2022). Varios de los grupos de metabolitos mencionados en la literatura, indican que esta especie posee alto potencial para el manejo de *B. tabaci*, principalmente por su efecto tóxico letal contra inmaduros.

CONCLUSIONES

Los EEs de las hojas de *A. compressa* poseen importantes efectos contra *B. tabaci*, particularmente resalta su actividad tóxica letal contra estados inmaduros de esta especie plaga. La actividad antifúngica contra *F. oxysporum*, sin embargo, fue moderada. El análisis del perfil cromatográfico basado en GC-MS permitió la identificación de metabolitos potenciales en hojas de *A. compressa* y su correlación con la bioactividad, donde se destacaron los ácidos grasos y ésteres de ácidos grasos, como compuestos abundantes. La bioprospección de *A. compressa* como especie abundante del Sur de México enriquece el conocimiento de las fuentes de productos botánicos para el control de plagas en la agricultura.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Compliance with ethical standards. Not applicable.

Data availability. The data is available upon request, with the corresponding author esau.ruiz@itconkal.edu.mx

LITERATURA CITADA

- Abbott, W. S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(3), 265–267. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Agus, H. H. (2020). Terpene toxicity and oxidative stress. In *Toxicology: Oxidative Stress and Dietary Antioxidants* (pp. 33–42). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819092-0.00004-2>
- Akhtar, Y., Pages, E., Stevens, A., Bradbury, R., da Camara, C. A. G., & Isman, M. B. (2012). Effect of chemical complexity of essential oils on feeding deterrence in larvae of the cabbage looper. *Physiological Entomology*, 37(1), 81–91. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.2011.00824.x>
- Al-Abd, N. M., Nor, Z. M., Mansor, M., Zajmi, A., Hasan, M. S., Azhar, F., & Kassim, M. (2017). Phytochemical constituents, antioxidant and antibacterial activities of methanolic extract of *Ardisia elliptica*. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 7(6), 569–576. <https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.05.010>
- Anjum, B., Kumar, R., Kumar, R., Prakash, O., Srivastava, R. M., & Pant, A. K. (2019). Phytochemical analysis, antioxidant, anti-inflammatory and insect antifeeding activity of *Ardisia solanacea* Roxb. Extracts. *Journal of Biologically Active Products from Nature*, 9(5), 372–386. <https://doi.org/10.1080/22311866.2019.1702899>
- Bajracharya, G. B. (2015). Diversity, pharmacology and synthesis of bergenin and its derivatives: Potential materials for therapeutic usages. In *Fitoterapia*. <https://doi.org/10.1016/j.fitote.2015.01.001>
- Carrillo-Morales, M., Wong-Villarreal, A., Aguilar-Marcelino, L., Castañeda-Ramírez, G. S., Pineda-Alegría, J. A., & Hernández-Núñez, E. (2023). Chemical composition and antifungal and nematicidal activities of the hexanic and methanolic extracts of *Syzygium aromaticum*. *ScienceAsia*, 49(1), 124–130. <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2022.143>
- Chatatikun, M., & Chiabchalard, A. (2017). Thai plants with high antioxidant levels, free radical scavenging activity, anti-tyrosinase and anti-collagenase activity. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1994-7>
- Colak Ates, A., Fidan, H., Karacaoglu, M., & Dasgan, H. Y. (2019). The identification of the resistance levels of *Fusarium oxysporum* F. SP. *Radicis - Lycopersici* and tomato yellow leaf curl viruses in different tomato genotypes with traditional and molecular methods. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 2203–2218. https://doi.org/10.15666/aer/1702_22032218
- Cruz-Cerino, P., Cristóbal-Alejo, J., Ruiz-Carrera, V., Carnevali, G., Vera-Ku, M., Martín, J., Reyes, F., & Gamboa-Angulo, M. (2020). Extracts from six native plants of the yucatán peninsula hinder mycelial growth of *Fusarium equiseti* and *F. Oxysporum*, pathogens of *Capsicum chinense*. *Pathogens*, 9(10), 1–19. <https://doi.org/10.3390/pathogens9100827>
- Cruz-Estrada, A., Gamboa-Angulo, M., Borges-Argáez, R., & Ruiz-Sánchez, E. (2013). Insecticidal effects of plant extracts on immature whitefly *Bemisia tabaci* Genn. (Hemiptera: Aleyrodoidea). *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(1), 1–9. <https://doi.org/10.2225/vol16-issue1-fulltext-6>
- Cruz-Estrada, A., Ruiz-Sánchez, E., Medina Baizabal, I. L., Balam-Uc, E., & Gamboa-Angulo, M. (2019). Effect of *Eugenia winzerlingii* extracts on *Bemisia tabaci* and evaluation of its nursery propagation. *Phyton*, 88(2), 161–170. <https://doi.org/10.32604/phyton.2019.05809>
- Cruz Estrada, A., Ruiz Sánchez, E., & Gamboa Angulo, M. (2019). *Eugenia winzerlingii*: especie cuasiendémica con propiedades bioplaguicidas al descubierto. *Desde El Herbario CICY*, 11, 207–210. http://www.cicy.mx/sitios/desde_herbario/
- Cruz Vázquez, J. K., Contreras García, L. I., Ávila Serrano, N. Y., Bernabé Pineda, M., & Ruiz, F. G. R. (2019). Evaluación de tres compuestos fenólicos como blancos potenciales en el control de la antracnosis. *Acta Universitaria*, 29, 1–14. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2200>

- De Mejía, E. G., & Ramírez-Mares, M. V. (2011). *Ardisia*: Health-promoting properties and toxicity of phytochemicals and extracts. In *Toxicology Mechanisms and Methods*. <https://doi.org/10.3109/15376516.2011.601355>
- Deng, J., Xiao, X., Tong, X., & Li, G. (2010). Preparation of bergenin from *Ardisia crenata* Sims and *Rodgersia sambucifolia* Hemsl based on microwave-assisted extraction/high-speed counter-current chromatography. *Separation and Purification Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.05.018>
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Gonzalez, L. A., Tablada, E. M., Díaz, M. P., & Balzarini, M. G. (2018). *Infostat ver.2018*. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Dikhoba, P. M., Mongalo, N. I., Elgorashi, E. E., & Makhafola, T. J. (2019). Antifungal and anti-mycotoxicigenic activity of selected South African medicinal plants species. *Heliyon*, 5(10), e02668. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02668>
- García-Pérez, J. A., Alarcón-Gutiérrez, E., & Pelayo, T. (2021). Extractos acuosos de plantas como inhibidores de la germinación de urediniosporas de *Hemileia vastatrix*, la roya anaranjada del café. *AyTBUAP*, 6(21), 45–60. <https://eoi.citefactor.org/10.11235/BUAP.06.21.04>
- Gomes, A. F., Almeida, M. P., Leite, M. F., Schwaiger, S., Stuppner, H., Halabalaki, M., Amaral, J. G., & David, J. M. (2019). Seasonal variation in the chemical composition of two chemotypes of *Lippia alba*. *Food Chemistry*, 273, 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.089>
- Hernández-Amasifuen, A. D., Pineda-Lázaro, J., & Noriega-córdova, H. W. (2019). Isolation and identification of *Fusarium oxysporum* obtained from producing areas of “chili pepper” *Capsicum annuum* L. (Solanaceae) in the district of Barranca, Peru. *Arnaldoa*, 26(2), 689–698.
- Herrera-Gorocica, A. M., Hernández-Núñez, E., Calvo Irabien, L. M., Sánchez-Conterras, Á., Ruiz-Jiménez, A. L., Latournerie-Moreno, L., Ballina-Gómez, H. S., & Ruiz-Sánchez, E. (2023). Effect of the essential oil of *Lippia origanoides* Kunth and two of its volatile organic compounds on *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) and *Bemisia tabaci* Genn (Hemiptera: Aleyrodidae) in greenhouse. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(3), 1–14. <https://doi.org/10.56369/taes.4413>
- Jangir, M., Sharma, S., & Sharma, S. (2020). Synergistic effect of oilseed cake and biocontrol agent in the suppression of *Fusarium* wilt in *Solanum lycopersicum*. *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(4), 1929–1939. <https://doi.org/10.1007/s42770-020-00344-8>
- Jouwa Tameye, N. S., Mvot Akak, C., Mouthé Happi, G., Frese, M., Stammler, H. G., Neumann, B., Ndjakou Lenta, B., Sewald, N., & Nkengfack, A. E. (2020). Antioxidant norbergenin derivatives from the leaves of *Diospyros gilletii* De Wild (Ebenaceae). *Phytochemistry Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.phytol.2020.01.012>
- Kobayashi, H., & De Mejía, E. (2005). The genus *Ardisia*: A novel source of health-promoting compounds and phytopharmaceuticals. In *Journal of Ethnopharmacology*. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2004.09.037>
- Leite, M. C. A., De Brito Bezerra, A. P., De Sousa, J. P., Guerra, F. Q. S., & De Oliveira Lima, E. (2014). Evaluation of antifungal activity and mechanism of action of citral against *Candida albicans*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/378280>
- Li, Y., Kong, D., Fu, Y., Sussman, M. R., & Wu, H. (2020). The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants. In *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.006>
- Ma, L., Zhang, M., Otsuki, K., Lei, Y., Kikuchi, T., Wang, Y., & Li, W. (2022). Simultaneous quantitative determination of six triterpenoid saponins in *Ardisia japonica* collected from different regions of China through LC-ESI-MS. *Pharmacognosy Research*, 15(1), 138–144. <https://doi.org/10.5530/097484900260>
- Malka, O., Feldmesser, E., Van Brunschot, S., Santos-Garcia, D., Han, W. H., Seal, S., Colvin, J., & Morin, S. (2021). The molecular mechanisms that determine different degrees of polyphagy in the *Bemisia tabaci* species complex. *Evolutionary Applications*, 14(3), 807–820. <https://doi.org/10.1111/eva.13162>

- Martínez-Blanco, A., Almeraya-Quintero, S. X., Guajardo-Hernández, L. G., Pérez-Hernández, L. M., & Regalado-López, J. (2019). La utilidad de *Ardisia compressa* Kunth en parcelas cafetaleras. *Agro Productividad*, 12(9), 41–43. <https://doi.org/10.32854/agrop.v12i9.1468>
- Martínez-Solórzano, G. E., Rey-Brina, J. C., Pargas-Pichardo, R. E., & Enrique-Manzanilla, E. (2020). *Fusarium* wilt by tropical race 4: Current status and presence in the American continent. *Agronomía Mesoamericana*, 31(1), 259–276. <https://doi.org/10.15517/am.v31i1.37925>
- Mehta, S., Kadian, V., Dalal, S., Dalal, P., Kumar, S., Garg, M., & Rao, R. (2022). A fresh look on bergenin: Vision of its novel drug delivery systems and pharmacological activities. *Future Pharmacology*. <https://doi.org/10.3390/futurepharmacol2010006>
- Navas-Castillo, J., Fiallo-Olivé, E., & Sánchez-Campos, S. (2011). Emerging virus diseases transmitted by whiteflies. *Annual Review of Phytopathology*, 49, 219–248. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095235>
- Neal, J. W., Davis, J. C., Bentz, J. A., Warthen, J. D., Griesbach, R. J., & Santamour, F. S. (1998). Allelochemical Activity in *Ardisia* species (Myrsinaceae) against selected arthropods. *Journal of Economic Entomology*, 91(3), 608–617. <https://doi.org/10.1093/jee/91.3.608>
- Newell, A. M. B., Yousef, G. G., Lila, M. A., Ramírez-Mares, M. V., & Gonzalez de Mejia, E. (2010). Comparative *in vitro* bioactivities of tea extracts from six species of *Ardisia* and their effect on growth inhibition of HepG2 cells. *Journal of Ethnopharmacology*, 130(3), 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.05.051>
- Pérez-Acevedo, C. E., Carrillo-Rodríguez, J. C., Chávez-Servia, J. L., Perales-Segovia, C., & Villegas-Aparicio, Y. (2017). Diagnóstico de síntomas y patógenos asociados con marchitez del chile en Valles Centrales de Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 281–293. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.50>
- Pournami, T. S., & Pratap, C. R. (2021). Evaluation of phytochemical and antimicrobial properties of leaf extracts of ardisia solanacea roxb. Collected from pathiramanal island, alappuzha district, kerala state, india. *Arabian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, 7(1), 175–191. <https://doi.org/10.48347/IMIST.PRSM/ajmap-v7i1.22649>
- Ramírez-López, C. B., Pérez-Mayorga, S., Ramírez-Briones, E., Macias-Rodríguez, R., & Salcedo-Pérez, E. (2023). Antifungal effect and chemical study of *Eysenhardtia polystachya* (Fabaceae) on *Phanerochaete chrysosporium* and *Ganoderma lucidum*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 14(8), 1–11. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i8.3208>
- Ramos-López, M. A., González-Chávez, M. M., Cárdenas-Ortega, N. C., Zavala-Sánchez, M. A., & Pérez G., S. (2012). Activity of the main fatty acid components of the hexane leaf extract of *Ricinus communis* against *Spodoptera frugiperda*. *African Journal of Biotechnology*, 11(18), 4274–4278. <https://doi.org/10.5897/ajb11.3727>
- Sandoval-Mojica, A. F., & Capinera, J. L. (2011). Antifeedant effect of commercial chemicals and plant extracts against *Schistocerca americana* (Orthoptera: Acrididae) and *Diaprepes abbreviatus* (Coleoptera: Curculionidae). Pest Management Science, 69(7), 860–868. <https://doi.org/10.1002/ps.2125>
- Schindler, F., Fragner, L., Herpell, J. B., Berger, A., Brenner, M., Tischler, S., Bellaire, A., Schönenberger, J., Li, W., Sun, X., Schinnerl, J., Brecker, L., & Weckwerth, W. (2021). Dissecting metabolism of leaf nodules in *Ardisia crenata* and *Psychotria punctata*. *Frontiers in Molecular Biosciences*, 8, 1–23. <https://doi.org/10.3389/fmmb.2021.683671>
- Syed, E., Mashroor, B., Hossain, F. M. D., Bi-Illah, N., Bhattacharjee, R., & Hannan, J. (2013). Evaluation of phytochemical screening and antimicrobial activities of ethanolic extracts of leaves and bark of *Ardisia colorata*. *International Journal of Pharmaceutical and Life Sciences*, 2(4), 158–164. <https://doi.org/10.3329/ijpls.v2i4.17115>
- Tian-Liang, Xie, Q., shama, R., Yu, J., Xi-Gu-Ri-Gan, Bao, Q., Su, H., Liu, B., & Borjigidai, A. (2024). Ethnobotanical study of Zhuang medicinal herbs of Ardisia: variety systematization, traditional uses, phytochemistry, pharmacology, clinical application, and toxicity. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 76(4), 327–353. <https://doi.org/10.1093/jpp/rgad119>
- Valencia-Botín, A. J., Gutiérrez-Lomelí, M., Morales-Del-Río, J. A., Guerrero-Medina, P. J., Robles-García, M. A., Ruiz-Cruz, S., Wong-Corral, F. J., Borboa-Flores, J., Rueda-Puente, E. O., & Del-Toro-Sánchez, C. L. (2018). Efecto inhibitorio de extractos de *Vitex mollis* Kunth contra bacterias y especies de *Fusarium* de importancia humana y agrícola. *Revista*

Recibido:
25/julio/2024

Aceptado:
20/noviembre/2024

- Fitotecnia Mexicana*, 41(4), 353–363. <https://doi.org/10.35196/rfm.2018.4.353-363>
- Vázquez-León, L. A., Páramo-Calderón, D. E., Robles-Olvera, V. J., Valdés-Rodríguez, O. A., Pérez-Vázquez, A., García-Alvarado, M. A., & Rodríguez-Jimenes, G. C. (2017). Variation in bioactive compounds and antiradical activity of *Moringa oleifera* leaves: influence of climatic factors, tree age, and soil parameters. *European Food Research and Technology*, 243(9), 1593–1608. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2868-4>
- Wong, J. H., Alfatah, M., Kong, K. W., Hoon, S., Yeo, W. L., Ching, K. C., Goh, C. J. H., Zhang, M. M., Lim, Y. H., Wong, F. T., & Arumugam, P. (2019). Chemogenomic profiling in yeast reveals antifungal mode-of-action of polyene macrolactam auroramycin. *PLoS ONE*, 14(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218189>
- Wong, P., Lou, Ramli, N. S., Tan, C. P., Azlan, A., & Abas, F. (2021). Metabolomic analysis reveals the valuable bioactive compounds of *Ardisia elliptica*. *Phytochemical Analysis*, 32(5), 685–697. <https://doi.org/10.1002/pca.3015>
- Yeong, L. T., Hamid, R. A., Yazan, L. S., Khaza'ai, H., & Hamsin, D. E. Z. A. (2014). Synergistic action of compounds isolated from the hexane extract of *Ardisia crispa* root against tumour-promoting effect, *in vitro*. *Natural Product Research*, 28(22), 2026–2030. <https://doi.org/10.1080/14786419.2014.917415>

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

DIVERSIDAD GENÉTICA EN EL COMPLEJO POBLACIONAL DE LA RAZA DURANGO DE FRIJOL

Phaseolus vulgaris L.

GENETIC DIVERSITY IN THE DURANGO RACE POPULATION COMPLEX OF COMMON BEAN

Phaseolus vulgaris L.

Rosales Serna, R., N. Almaraz Abarca, D. Sierra Zurita, A.I. Chaidez Ayala, E.A. y Delgado Alvarado

DIVERSIDAD GENÉTICA EN EL COMPLEJO POBLACIONAL DE LA RAZA DURANGO DE FRIJOL *Phaseolus vulgaris L.*

GENETIC DIVERSITY IN THE DURANGO RACE POPULATION COMPLEX OF COMMON BEAN *Phaseolus vulgaris L.*



Diversidad genética en el complejo poblacional de la raza Durango de frijol *Phaseolus vulgaris* L.**Genetic diversity in the Durango race population complex of common bean *Phaseolus vulgaris* L.**

Rigoberto Rosales Serna,
Norma Almaraz Abarca,
Donaji Sierra Zurita, Ana
Isabel Chaidez Ayala, Eli
Amanda Delgado Alvarado

DIVERSIDAD GENÉTICA EN
EL COMPLEJO
POBLACIONAL DE LA
RAZA DURANGO DE
FRIJOL *Phaseolus vulgaris* L.

GENETIC DIVERSITY IN
THE DURANGO RACE
POPULATION COMPLEX
OF COMMON BEAN
Phaseolus vulgaris L.

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 313-327. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.20

Rigoberto Rosales Serna <https://orcid.org/0000-0002-2185-0907>
INIFAP – Campo Experimental Valle del Guadiana. Carretera Durango – El
Mezquital km 4.5. Durango, Dgo., México, 34170.

Norma Almaraz Abarca <https://orcid.org/0000-0003-1603-4865>
Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional,
Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional. Sigma 119, 20 de Noviembre II,
Durango, Dgo., México, 34220

Donaji Sierra Zurita Autora de correspondencia: silvia.donaji@inifap.gob.com
<https://orcid.org/0000-0002-7685-9108>
INIFAP – Campo Experimental Valle del Guadiana. Carretera Durango – El
Mezquital km 4.5. Durango, Dgo., México, 34170.

Ana Isabel Chaidez Ayala <https://orcid.org/0000-0003-4190-9192>
Eli Amanda Delgado Alvarado <https://orcid.org/0000-0003-3835-9572>
Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional,
Unidad Durango, Instituto Politécnico Nacional. Sigma 119, 20 de Noviembre II,
Durango, Dgo., México, 34220.

RESUMEN: El estado de Durango, Méx., es centro importante de diversidad genética del frijol tolerante a sequía y enfermedades, cuyas poblaciones se pierden paulatinamente por la modernidad y calentamiento global. El objetivo fue determinar la diversidad genética actual en el Complejo Poblacional de la Raza Durango de frijol. Se utilizaron 27 colectas, de las cuales 26 eran de frijol [nativo (18), criollo (4) y mejorado (4)]; así como una de *Phaseolus coccineus* (testigo). Se registraron 48 rasgos morfo-agronómicos y se obtuvieron perfiles de amplificación a partir de cuatro pares de marcadores moleculares ISTR (Inverse Sequence Tagged Repeat). Los datos obtenidos se analizaron con estadística descriptiva, análisis de componentes principales (ACP) y agrupamiento (Cluster), usando los programas de cómputo R (2023.12.0+369), GelAnalyzer (23.1) y PAST4- 4.15. Las colectas de frijol nativo, comparadas con las variedades mejoradas, resultaron más precoces para el desarrollo de la guía (29 Vs. 35 días después de la siembra, DDS), pero mostraron floración (59 Vs. 49 DDS) y madurez tardías (107 Vs. 93 DDS); así como, semillas pequeñas (15 Vs. 31 g 100 semillas⁻¹). El CP 1 explicó 15.2% de la varianza observada y se relacionó con el tamaño de la semilla y ancho de la vaina; mientras que, el CP 2 alcanzó 10.1% y se asoció con el tamaño de las brácteas florales. El análisis de agrupamiento reveló la diferencia más pronunciada entre *P. coccineus* y las colectas de frijol nativo y cultivado. El grupo de frijol nativo (IIa) se dividió en dos subgrupos, relacionados con el tamaño y color de la semilla. El otro grupo (IIb) constó de dos subgrupos, uno con variedades de frijol pinto (IIb₁) y colectas nativas de grano flor de mayo. Otro subgrupo (IIb₂) incluyó dos variedades criollas, consideradas como recombinantes interraciales. Los marcadores moleculares ISTR produjeron 69 bandas polimórficas y la combinación de iniciadores B8/F9 reveló el nivel más alto de polimorfismo (86%). El agrupamiento con cuatro combinaciones ITSR, mostró separación clara de las colectas con base en su estructura genética. El grupo I incluyó colectas nativas con dos subgrupos y la variedad Borroso, considerado como recombinante genético. El grupo II incluyó principalmente frijol cultivado y algunos recombinantes, con dos subgrupos, IIa) con separación marcada para una colecta

de frijol nativo con grano bayo pequeño (LF 2), variedades criollas de la raza Jalisco (Negro San Luis) y colectas resultantes de la recombinación genética entre razas. En otro clado se incluyeron variedades criollas y mejoradas de la raza Durango y colectas nativas con granos medianos a grandes. El subgrupo IIb incluyó únicamente a *P. coccineus*. El uso de atributos morfagrónomicos y marcadores moleculares permitieron la evaluación de la diversidad genética presente en frijol del Complejo Poblacional de la Raza Durango. Las poblaciones nativas y recombinantes genéticos de frijol pueden diferenciarse, por los rasgos morfométricos y marcadores moleculares, de acuerdo con su origen genético y geográfico. La información obtenida será utilizada en la optimización del mejoramiento del frijol cultivado para resistencia a sequía, adaptación al calentamiento global y tolerancia a las enfermedades.

Palabras clave: biodiversidad, conservación, reserva natural, lucha contra la sequía, calentamiento global.

ABSTRACT: The state of Durango, México, is an important center of genetic diversity of drought- and disease-tolerant common bean populations, whose are gradually being lost due to modernity and global warming effects. The objective was to determine the actual level of genetic diversity of the common bean Durango Race Population Complex. Twenty-seven common bean accessions were used, of which 26 was common bean [native (18), landrace varieties (4) and improved cultivars (4)] and an accession of *Phaseolus coccineus* (control). Forty-eight morpho-agronomic traits were recorded, and amplification profiles were obtained with four pairs of ISTR (Inverse Sequence Tagged Repeat) molecular markers. The data generated were analyzed using descriptive statistics, principal component analysis (PCA) and cluster analysis, performed in the computer programs R (2023.12.0+369), GelAnalyzer (23.1) and PAST4- 4.15. The common bean native accessions compared to the improved cultivars were precocious for vines growth (29 Vs. 35 days after sowing, DAS), but showed late flowering (59 Vs. 49 DAS) and maturity (107 Vs. 93 DAS); as well as small seeds (15 Vs. 31 g 100 seeds⁻¹). The PC 1 explained 15.2% of the observed variance, related to seed size and pod width, while the PC 2 reached 10.1%, associated to the size of the floral bracts. The cluster analysis revealed the most pronounced difference between *P. coccineus* and the common bean accessions, native and cultivated. The native common bean group (IIa) was divided into two sub-groups, related to seed size and color. The other group (IIb) consisted of two sub-groups, one with pinto bean varieties (IIb₁), as well as native accessions producing flor de mayo seeds. Another sub-group (IIb₂) included two landrace varieties, considered as interracial recombinants. The ISTR molecular markers produced 69 polymorphic bands and the B8/F9 primers combination registered the highest polymorphism level (86%). The cluster analysis generated by using four ITSР combinations showed a clear separation of the common bean accessions, according to its genetic structure. The group I included native accessions with two sub-groups and the Borroso cultivar, considered as a genetic recombinant. The group II included cultivated cultivars and some genetic recombinants, with two sub-groups, one (IIa) with a marked separation for a common bean native accession with small bayo grains (LF 2), landrace cultivars of the Jalisco race (Negro San Luis) and native accessions derived from genetic recombination between races. Another clade included landrace and improved cultivars of the Durango Race and native accessions producing medium to large seeds. The sub-group IIb only included the *P. coccineus* landrace cultivar. The use of morpho-agronomic attributes and molecular markers allowed the evaluation of the genetic diversity present in the Durango Race Population Complex of common bean. Native populations and recombinant accessions of common bean could be identified according to their genetic and geographic origin using morphometric traits and molecular markers. The information obtained in this work will be used to optimize results of the common bean breeding programs for drought resistance, adaptation to global warming effects and disease tolerance.

Key words: biodiversidad, conservación, naturaleza reservas, control de sequía, calentamiento global.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Durango, México, existe diversidad importante en especies de plantas del género *Phaseolus*. Particularmente, puede encontrarse un número alto de poblaciones nativas de frijol en varios municipios (Wallander-Compean *et al.*, 2022), por lo que ésta entidad debe ser considerada como un centro importante de diversidad genética y domesticación del frijol, sobretodo cuando se consideran los antecedentes históricos (Chacón-Sánchez, 2009; Punzo-Díaz & Ramírez-Luna, 2008) y los requerimientos para hacer frente a los escenarios de calentamiento global (Mourice *et al.*, 2016; Rosales-Serna, R., C. M. Reyes-Rodríguez, N. Almaraz-Abarca, D. Sierra-Zurita, J. L. Becerra-López, S. Santana-Espinoza., 2024). La adaptación del frijol en condiciones adversas requerirá la incorporación de genes relacionados con mecanismos de adaptación al estrés hídrico, temperaturas altas y organismos patógenos. Varias clases comerciales de frijol, como bayo y pinto, se originaron dentro del Complejo Poblacional de la Raza Durango y muestran grado alto de tolerancia al estrés hídrico (sequía), temperaturas altas (29 a 33 °C) y enfermedades (Chaves-Barrantes *et al.*, 2018; Rosales-Serna *et al.*, 2004). Sin embargo, es necesario explorar, colectar y caracterizar colectas nativas provenientes de áreas de origen, para ampliar la gama de posibilidades en la selección de fuentes de resistencia al estrés hídrico, variaciones de temperatura y efectos negativos de organismos patógenos. Con ello, se podrá realizar mejoramiento genético para dichos factores en diferentes países del mundo donde se cultiva frijol en forma intensiva y extensiva.

La tolerancia a la sequía del frijol de la Raza Durango se debe principalmente a su fenología precoz, que le permiten el escape al estrés hídrico terminal y recuperación de la planta, después de periodos de escasez de agua (Rosales-Serna *et al.*, 2004). El escape implica la transición rápida a la etapa reproductiva y la removilización acelerada de fotoasimilados a las vainas y granos en formación; mientras que, la recuperación requiere el fortalecimiento del crecimiento vegetativo y ajuste de la fenología (plasticidad fenológica) (Labastida *et al.*, 2023). El estrés hídrico, registrado en múltiples países a nivel mundial donde se cultiva frijol, se agrava con la presencia de temperaturas altas (>35 °C), por lo que cuando se presentan ambos factores por períodos prolongados, causan problemas fisiológicos y caída de flores y frutos en formación (Hernández *et al.*, 2015).

En la localidad de La Ferrería, Durango, México, crecen poblaciones nativas y formas intermedias (recombinantes genéticos) de frijol. La Ferrería, es considerada como la zona arqueológica más importante del Valle del Guadiana (Durango) en la época Chalchihuites, 600 a 1,300 d.c. [INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia, 2024)]. La población Chalchihuites fomentó el consumo de frijol (Punzo-Díaz & Ramírez-Luna, 2008); mientras que, la confluencia y movilización de las poblaciones humanas y el intercambio de semillas, favorecieron la recombinación genética del Complejo Poblacional de la Raza Durango (Singh *et al.*, 1991) con el germoplasma de frijol de otras áreas de México. Lo anterior, favoreció la diversidad genética que puede ser utilizada para la solución de problemas derivados del cultivo de frijol en áreas sujetas a sequía y presión de diversos patógenos que reducen el rendimiento y calidad del grano en varios países del mundo.

El análisis de la variabilidad genética, recombinación y flujo génico entre estas poblaciones vegetales contribuiría al esclarecimiento del proceso de evolución paulatina que les ha permitido adaptarse a los cambios ocasionados por el calentamiento global (Köstner *et al.*, 2013); así como, la identificación de genes relacionados con la tolerancia a la sequía, temperaturas altas y enfermedades. La caracterización morfológica y morfométrica de las colectas de frijol nativo puede brindar información esencial sobre la diversidad genética que persiste en el Complejo Poblacional de la Raza Durango. Las directrices para la ejecución del examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad, para judía común, alubia, *Phaseolus vulgaris* [SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas), 2017; UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales, 2012], relacionadas con los descriptores de la especie [IBPGR (International Board for Plant Genetic Resources, 1982)], son aceptadas internacionalmente y pueden utilizarse en la determinación de la diversidad genética del frijol nativo y cultivado del Complejo Poblacional de la Raza Durango.

Los ISTR son marcadores genéticos moleculares que detectan polimorfismos entre regiones del genoma que separan retrotransposones, los cuales son los elementos móviles más abundantes y

activos de los genomas vegetales y la principal fuente de variación en este tipo de organismos (Orozco-Arias *et al.*, 2022; Paszkowski, 2015). Los diferentes tipos de retrotransposones han formado linajes en diferentes grupos de plantas (Yu *et al.*, 2024), por lo que se consideran marcadores útiles, para el estudio de la diversidad genética en germoplasma de frijol. Los resultados obtenidos favorecerán el conocimiento y uso eficiente de la diversidad genética de frijol para el mejoramiento de las variedades usadas en la alimentación humana, en respuesta a los efectos del calentamiento global. El objetivo del presente estudio fue estimar la diversidad genética en el Complejo Poblacional de la Raza Durango de frijol nativo y cultivado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Germoplasma. En el año 2022, se colectaron al azar semillas de plantas individuales de poblaciones nativas de frijol, en La Ferrería, Durango, Dgo., México. También, se obtuvieron variedades criollas en la zona de cultivo de Los Llanos, Guadalupe Victoria e Ignacio Allende, Dgo. Se generó una base de datos sobre la ubicación de los sitios donde se obtuvieron las colectas nativas y variedades criollas de frijol. Se utilizó un grupo de 27 colectas, de las cuales 26 son de frijol (18 nativas, 4 variedades criollas y 4 variedades mejoradas, producidas en Durango, Dgo.) y una variedad criolla de *Phaseolus coccineus*, como testigo de referencia.

Las variedades criollas son poblaciones de plantas cultivadas tradicionalmente, por los productores, mediante su reproducción constante por más de 30 años (Herrera-Cabrera *et al.*, 2002) y algunas de ellas (Río Grande), fueron generadas en las primeras etapas de mejoramiento genético de frijol [1960-1976 (Rosales *et al.*, 2004)]. Durante dicho proceso, se aplicó selección masal en variedades locales, heterogéneas y ocasionalmente heterocigotas, las cuales, aún en la actualidad, muestran variación intrapoblacional considerable y se adaptan a las condiciones locales de cultivo. Las variedades mejoradas son poblaciones desarrolladas mediante la recombinación genética entre progenitores sobresalientes y la aplicación de un esquema de mejoramiento genético, principalmente el método de pedigrí (genealógico) (Rosales *et al.*, 2020). La descripción de las colectas utilizadas en el presente estudio se muestran en la Tabla 1, donde se consideró como colecta la muestra obtenida de las semillas de cada una de las plantas individuales, en el caso de *Phaseolus* nativo, y de muestras masales obtenidas en el caso de las variedades criollas y mejoradas de frijol cultivado. *Phaseolus coccineus* L. (patol o ayocote) se colectó y caracterizó de la misma manera (morfo-agronómica y molecular) para su uso con fines comparativos. Las colectas y variedades se sembraron en condiciones de campo en Durango (INIFAP-C. E. Valle del Guadiana, Durango, Dgo., México) para realizar la caracterización morfo-agronómica y molecular.

Condiciones de cultivo. La siembra se realizó el 10 de julio de 2023 y se aplicó el manejo agronómico, recomendado en Durango, para el cultivo del frijol en condiciones de riego [INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, 2017)]. La parcela experimental estuvo situada en la carretera Durango-El Mezquital km 4.5 (23° 59' 21" N, 104° 37' 33" O, 1,877 m). La parcela útil estuvo compuesta por un surco de 5 m de largo, con un espaciamiento de 0.81 m y 80 plantas. Se colocaron estacas cerca de cada planta para ayudar a las guías a trepar en secciones de carrizo (*Arundo donax*) colocadas verticalmente y con una altura de 2 m sobre la superficie del suelo.

Tabla 1. Colectas de frijol utilizadas para la caracterización de la diversidad genética en el Complejo Poblacional de la Raza Durango.

Table 1. Common bean accessions used for the characterization of the genetic diversity in the Durango Race Population Complex.

| Colecta | Forma | Color de semilla | Colecta | Forma | Color de semilla |
|-------------------|--------|-----------------------|-----------|----------|------------------|
| ¹ LF 1 | Nativa | ² FM Negro | LF 27 | Nativa | Café |
| LF 2 | Nativa | Bayo (crema) | LF 29 | Nativa | Negro |
| LF 3 | Nativa | Café | LF 30 | Nativa | Bayo (crema) |
| LF 5 | Nativa | BY-PT Negro | LF 35 | Nativa | Café |
| LF 7 | Nativa | FM Rosa | Boroso | Criolla | Café-Gris |
| LF 12 | Nativa | Café | BY Madero | Mejorada | Bayo (crema) |

| | | | | | |
|-------|--------|--------------|-------------|----------|--------------|
| LF 13 | Nativa | FM Negro | NG San Luis | Criolla | Negro |
| LF 16 | Nativa | FM Morado | Patol | Criolla | Negro, Pinto |
| LF 19 | Nativa | Negro | PT Burro | Criolla | Pinto |
| LF 21 | Nativa | Negro | PT Nacional | Criolla | Pinto |
| LF 23 | Nativa | Bayo (crema) | PTSaltillo | Mejorada | Pinto |
| LF 24 | Nativa | Crema-Gris | PT Villa | Mejorada | Pinto |
| LF 25 | Nativa | Crema-Gris | Querétaro | Mejorada | Bayo (crema) |
| LF 26 | Nativa | FM Morado | | | |

¹LF = La Ferrería, ²FM= flor de mayo, rosa, violeta, morado, o jaspeado de negro sobre fondo amarillo-pálido; PT= pinto moteado de café o negro, sobre fondo blanco o beige; NG= negro brillante.

El suelo predominante es de sitio es de tipo franco-arcilloso (Kastañozem), el cual tiene capacidad intermedia para la retención de humedad, profundidad media, pendiente de 0 a 4%, pH de 7.9 y es pobre en contenido de materia orgánica, fósforo y nitrógeno. El clima predominante es templado semiárido [BS₁ kw (w) (e)], con régimen de lluvias en verano, variación fuerte de temperatura con una media anual de 17.4 °C (García, 1987). La lluvia acumulada durante el año alcanza un promedio de 476 mm, con valores altos entre junio y septiembre (Medina-García, 2005).

Caracterización morfo-agronómica. En una población > 60 plantas de cada colecta se registraron 48 atributos morfo-agronómicos incluidos en las guías publicadas por [UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales), 2012] y [SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas), 2017]. En dichas variables se consideran mayoritariamente variables cualitativas (46) y únicamente dos cuantitativas. Las observaciones para cada atributo se realizaron conforme a las recomendaciones incluidas en las guías [UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales), 2012]. El registro del número de días a floración se realizó cuando más del 50% de las plantas mostraron una flor abierta; mientras que, la maduración se evaluó cuando la mayoría de las plantas presentaron las vainas y hojas amarillas, típicas de la madurez fisiológica [CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), 1986].

Extracción de ADN. La extracción de ADN se realizó de acuerdo a Coelho *et al.* (2009), a partir de 100 mg de tejido foliar de 3 plantas de frijol para cada colecta y variedad.

Cuantificación del ADN. La cuantificación y estimación de la pureza del ADN obtenido se determinó a partir de los registros de absorbancia a 260 y 280 nm, de acuerdo a Chan (1992). La determinación de la cantidad de ADN obtenido se realizó de manera espectrofotométrica. Se tomaron 4 µL de cada solución individual de ADN y se combinaron con 996 µL de agua inyectable (dilución 1/250). Se determinaron los valores de absorbancia a 260 nm (A₂₆₀). La concentración de ADN en cada muestra se estimó considerando que una solución de ADN de 50 ng µL⁻¹ tiene un valor de A₂₆₀ de 1 (Chan, 1992). La determinación de la pureza de las soluciones de ADN se realizó de manera espectrométrica de acuerdo a Sambrook J. (1989). De manera individual se registraron los valores de A₂₈₀ y se calcularon los valores de la relación A₂₆₀/A₂₈₀, considerando las lecturas previas de A₂₆₀. Valores de esas proporciones iguales o mayores de 1.7 indicaron que el ADN se encontraba lo suficientemente libre de proteínas para su ampliación por PCR (Reyes-Martínez *et al.*, 2011).

Amplificación. Se emplearon cuatro pares (combinaciones) de iniciadores B1/F10, B6/F10, B8/F9 y B1/F10, los cuales fueron seleccionados por la facilidad de implementación en el CIIDIR-IPN Unidad Durango; así como, por su eficiencia en la discriminación de especies y detección de variabilidad genética intrapoblacional en Agavaceas (Torres-Morán *et al.*, 2008) y capacidad para separar germoplasma silvestre y cultivado de frijol; así como, para establecer el grado de similitud entre colectas (Castellanos-Hernández *et al.*, 2017). Las secuencias de cada uno de los iniciadores se muestran en el Tabla 2.

Caracterización molecular. Los perfiles de amplificación ISTR se obtuvieron mediante la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR), de acuerdo a (Osorio *et al.*, 2006). La concentración inicial de ADN fue 1,490 ng µL⁻¹ y con base en ello, se prepararon 1.5 µL de una solución de ADN (25 ng µL⁻¹) se combinaron con 2 µL de regulador de la enzima (1X), 3 mM de MgCl₂, 0.3 µM de cada iniciador ISTR, 0.25 mM de dNTP, 1U de *Taq* polimerasa (Promega®)

y la cantidad de agua (ultrapura) necesaria para que el volumen final de reacción fuera de 20 µL. Las condiciones de amplificación fueron, un primer ciclo de desnaturalización de 3 min a 95 °C, seguida por 40 ciclos de desnaturalización a 95 °C por 3 s, alineación a 45 °C por 1 min y extensión a 72 °C por 2 min. Se incluyó un paso de extensión final de 10 min a 72 °C.

Los fragmentos amplificados se separaron y visualizaron en geles de poliacrilamida (5%), de acuerdo con (Sanguinetti & Simpson, 1994), teñidos con Sybr Green. Los fragmentos amplificados en cada muestra representaron su perfil de amplificación. Las bandas resueltas en los geles de poliacrilamida se seleccionaron y cuantificaron con ayuda del programa de cómputo GelAnalyzer 23.1.

Análisis de la información. Los datos fenotípicos, resultantes de la caracterización morfo-agronómica, se analizaron mediante estadística descriptiva (promedios) y se sometieron a análisis de componentes principales (ACP) y análisis de agrupamiento o conglomerados (cluster analysis). Los perfiles de amplificación se usaron para construir matrices binarias (una para cada tipo de datos) de presencia/ausencia (1/0) de bandas amplificadas (caracteres fenotípicos). Con los datos moleculares se estimó el porcentaje de polimorfismo y se sometieron a análisis de agrupamiento. En los análisis de agrupamiento se utilizó el método UPGMA (Agrupación de Pares no Ponderados con Promedios Aritméticos). Los análisis de datos se hicieron con los programas R ver.2023.12.0+369 y Past 4.14 (Hammer & Harper, 2001).

Tabla 2. Secuencia de los iniciadores ISTR utilizados en la caracterización molecular de 27 colectas de frijol (*Phaseolus* spp.).

Table 2. Primer sequences for ISTR used in molecular characterization of 27 accessions of common bean (*Phaseolus* spp.).

| Iniciador | Secuencia (5'→3') |
|-----------|----------------------------|
| F9 | TTA CCT CCT CCA TCT CGT AG |
| F10 | TAA GCA AGC ATC TCG GAG |
| B1 | ATC AGG AAG GTC TGT AAA GC |
| B6 | GGT TCC ACT TGG TCC TTA G |
| B8 | ATA CCT TTC AGG GGG ATG |

RESULTADOS

Caracterización morfo-agronómica. Las colectas de frijol nativo mostraron precocidad para el desarrollo de las guías (29 días después de la siembra; DDS); aunque resultaron tardías para el número de días a floración (59 DDS) e intermedias a la madurez (107 DDS), al mismo tiempo que presentaron semillas pequeñas (15 g 100 semillas⁻¹). Las variedades criollas y mejoradas de frijol mostraron valores entre 34 y 35 DDS para el inicio del desarrollo de la guía, 49 DDS para el inicio de la floración, entre 93 a 97 días a madurez fisiológica y 31 a 44 g para el peso de 100 semillas. El testigo mostró 33 DDS para el inicio del desarrollo de las guías, floración a los 44 DDS, madurez 125 DDS y peso de 100 semillas 127 g. Se observaron diferencias considerables para los rasgos morfo-agronómicos evaluados en el presente estudio, en colectas nativas y cultivadas de frijol; así como, con respecto al testigo de referencia.

Tabla 3. Variables evaluadas en 27 colectas de frijol sembradas en Durango, México.

Table 3. Traits evaluated in 27 common bean accessions sown at Durango, México.

| Colectas | DDG | DIF | P100S (g) | DMF |
|----------------|-----|-----|-----------|-----|
| Nativas | 29 | 59 | 15 | 107 |
| Criollas | 34 | 49 | 44 | 97 |
| Mejoradas | 35 | 49 | 31 | 93 |
| Testigo | 33 | 44 | 127 | 125 |
| Total/Promedio | 33 | 50 | 54 | 106 |

DDG = días para el desarrollo de guías, DIF = Días a inicio de floración, P100S= peso de 100 semillas y DMF = días a madurez fisiológica.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) generado a partir de la caracterización morfo-agronómica mostró una proporción baja de la varianza explicada por el CP 1 (15.2%) y CP 2 (10.1%), por lo que se requirieron 26 CP para alcanzar un valor cercano a 100%. La diferencia (altura) más pronunciada en el dendrograma generado a partir del análisis de la información de atributos morfo-agronómicos se observó para *P. coccineus* (frijol patol), la cual formó un grupo independiente del resto de las colectas, lo que está en concordancia con el hecho de que es una especie diferente (Figura 2). La variabilidad disminuyó entre las colectas con semillas pequeñas y típicamente de frijol nativo, las cuales formaron dos subgrupos (IIa y IIb), que incluyeron colectas con semillas de color bayo (crema-beige), café, negro y rayadas negras (IIa₁). El subgrupo IIa₂ incluyó colectas con semillas pequeñas de color beige, conocidas como frijol bayo y flor de mayo, incluyendo coloración abigarrada negra y rosada en la testa de la semilla.

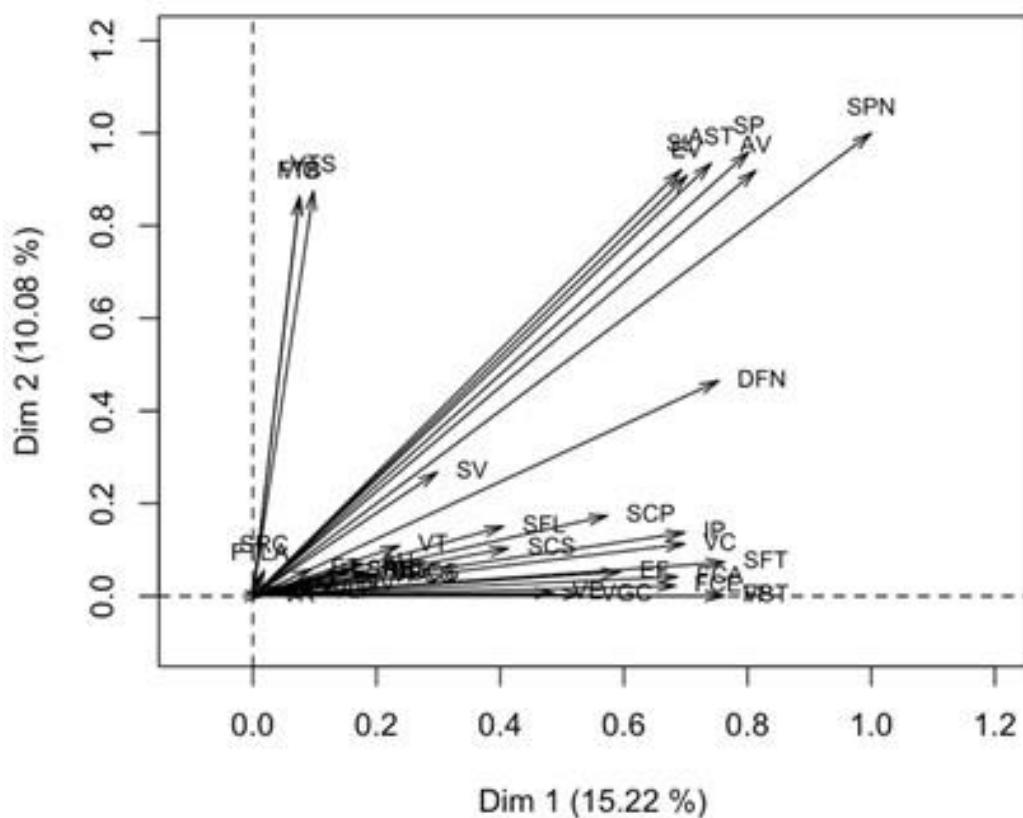


Figura 1. Resultado bidimensional del análisis de componentes principales para variables morfo-agronómicas de frijol nativo y cultivado del estado de Durango (SPN = semilla peso numérico, AV = anchura de la vaina, SP = tamaño de la semilla, AST = anchura de la semilla, en sección trasversal).

Figure 1. Bidimensional results of the Principal Component Analysis for the main morpho-agronomic traits in native and improved common bean from Durango Race Population Complex (SPN = seed weight, AV = pod width, SP = seed size, AST = seed width in cross section).

El grupo IIb incluyó dos subgrupos, que englobaron variedades criollas y mejoradas con semillas de color pinto y formas intermedias (regresivas) con semillas grandes de color flor de mayo (rosado). También, se observó grado alto de diferenciación en el subgrupo IIb₁ de variedades criollas (Negro San Luis) y variedades mejoradas (Río Grande y Bayo Madero); así como, para colectas recombinantes con semillas flor de mayo. Otro subgrupo (IIb₂) estuvo compuesto por dos variedades criollas con grado alto de segregación (recombinantes), conocidas como Pinto Burro y Borroso (Rebocero), que probablemente se originaron a partir de cruzamientos naturales de tipo interracial.

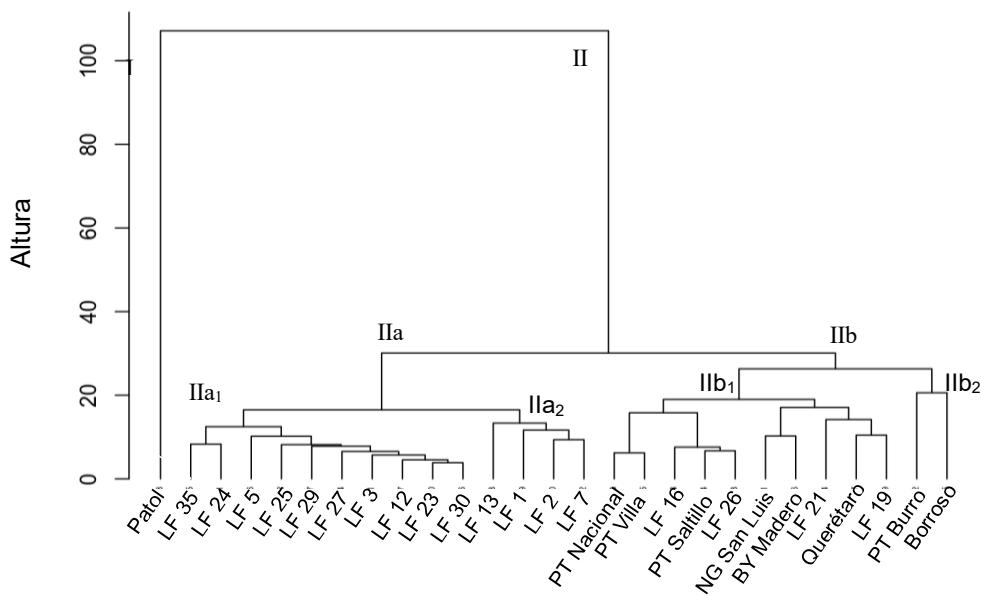


Figura 2. Dendrograma basado en características morfo-agronómicas evaluadas en colectas de frijol del Complejo Poblacional de la Razas Durango y Jalisco.

Figure 2. Dendrogram based on morpho-agronomic traits evaluated in common bean accessions from the Durango and Jalisco Races Population Complex.

Caracterización molecular. Las cuatro combinaciones de marcadores moleculares ISTR, produjeron un total de 69 bandas (Tabla 3). El nivel de polimorfismo varió entre 56% para la combinación B1/F10 y 86% para la combinación B8/F9, por lo que esta última fue más informativa. El dendrograma generado por los perfiles de amplificación, con cuatro combinaciones ITSR incluidas en el análisis, mostraron una separación clara de las colectas bajo estudio, revelando dos grupos principales (I y II) (Figura 3). El grupo I incluyó colectas principalmente nativas (subgrupos Ia y Ib) y únicamente se mezcló en el subgrupo (Ib) la variedad criolla de la Sierra de Durango, conocida como Boroso (Rebocero), la cual puede ser resultado de la recombinación genética entre colectas criollas y nativas.

Tabla 4. Parámetros genéticos obtenidos en la evaluación de la diversidad genética en colectas de frijol de la Raza Durango mediante cuatro combinaciones de ISTR.

Table 4. Genetic parameters obtained in the evaluation of the genetic diversity in common bean accessions of the Durango Race by using four ISTR combinations.

| Iniciador ISTR | Total de Bandas | Bandas Polimórficas | Polimorfismo (%) |
|------------------------|-----------------|---------------------|------------------|
| Combinación 1 (B1/F10) | 32 | 18 | 56 |
| Combinación 2 (B6/F10) | 17 | 12 | 71 |
| Combinación 3 (B8/F9) | 14 | 12 | 86 |
| Combinación 4 (B8/F10) | 6 | 4 | 67 |
| Total | 69 | 46 | -- |
| Promedio | 17 | 12 | 70 |

El grupo II se subdividió en dos subgrupos (IIa y IIb), el grupo IIa incluyó principalmente frijol cultivado (criollo y mejorado) y una colecta de frijol nativo, con grano de color bayo y tamaño pequeño (LF 2), la cual, formó un clado independiente del resto de las muestras de frijol cultivado (Figura 3). En el mismo subgrupo IIa, se formó un clado separado de variedades criollas de la

Raza Jalisco (Río Grande, Negro San Luis) y formas intermedias, como Pinto Burro, lo que sugiere que éstas pueden ser el resultado de la recombinación genética entre razas (Jalisco y Durango).

En otra división del subgrupo IIa se incluyeron variedades criollas y mejoradas provenientes de la raza Durango, la cual incluye las clases comerciales bayo (Bayo Madero) y pinto (Pinto Saltillo). También, englobó colectas recombinantes y granos medianos-grandes de color café, negro y flor de mayo, éstos últimos con diferentes tonalidades del color primario y secundario de la testa (Figura 3). *Phaseolus coccineus* (patol) fue el único elemento del subgrupo IIb, lo cual era esperado por ser una especie diferente. Los perfiles ISTR permitieron la diferenciación clara de cada grupo de colectas y variedades cultivadas, ya que cada una formó un clado individual, lo que sugiere perfiles genéticos diferentes. La mayor similitud genética se estableció entre la población LF 27 y LF 29 (Figura 3).

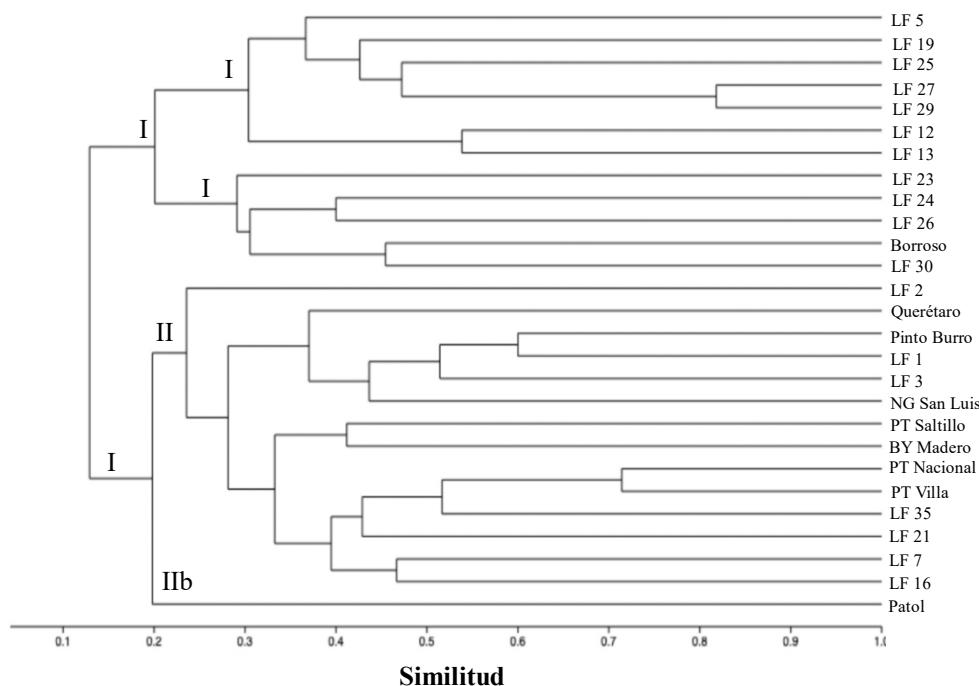


Figura 3. Dendrograma basado en cuatro pares de iniciadores de marcadores moleculares ISTR evaluados en colectas de frijol de las razas genéticas Durango y Jalisco.

Figure 3. Dendrogram based on four primer pairs for molecular markers ISTR evaluated in common bean accessions from Durango and Jalisco genetic races.

DISCUSIÓN

Caracterización morfo-agronómica. Las plantas de las colectas de frijol nativo mostraron hábito de crecimiento trepador, lo que favorece su crecimiento en ecosistemas con competencia intra e interpoblacional fuerte con especies arbustivas y arbóreas (Kwak *et al.*, 2012), lo cual contrastó con las variedades criollas y mejoradas; así como con el testigo de comparación. Lo anterior, provocó retraso en la floración y madurez de las colectas silvestres, por la necesidad de asignar la biomasa producida hacia el crecimiento vegetativo de la planta. Además, mostraron semillas pequeñas, testa gruesa y brillante; así como vainas dehiscentes de forma explosiva, lo que les permite adaptarse y reproducirse en ambientes adversos y contrastó con el resto de las colectas incluidas en el estudio (Acosta-Gallegos *et al.*, 2007).

Los resultados del Análisis de Componentes Principales (ACP) difirieron de lo observado en otros estudios con frijol, en los cuales se requirieron entre dos y cuatro Componentes Principales

para explicar 40 a 84% de la variación total observada (Espinosa-Pérez *et al.*, 2015; Long *et al.*, 2020). El requerimiento de un número alto de Componentes Principales se relacionó con la diversidad alta para las colectas y variables incluidas en la caracterización realizada en el presente estudio, entre las que sobresalieron el tamaño de la semilla (Blair *et al.*, 2009) y anchura de vainas y granos (Lépiz-Ildefonso *et al.*, 2010) (Figura 1), las cuales estuvieron asociadas al CP 1 y al proceso evolutivo del frijol en la región bajo estudio. En estudios previos realizados en Durango, México, se encontró también una variación importante en las características de semillas y vainas entre cinco poblaciones nativas de frijol (Wallander-Compeán *et al.*, 2022). Lo anterior, permite determinar que Durango es un centro importante para la diversidad y domesticación del frijol en México debido a la variación para diferentes atributos de la vaina y las semillas detectada en las colectas de frijol nativo, lo cual persiste en las variedades criollas y mejoradas cultivadas actualmente.

Los resultados mostraron qué el estudio de atributos morfo-agronómicos de la planta de frijol reveló variabilidad abundante, lo que sugiere que estos rasgos representan una herramienta importante para la caracterización del frijol y los estudios de diversidad genética. A pesar de lo anterior, se consideró necesaria la depuración de las variables incluidas en la caracterización morfo-agronómica, debido a la falta de variabilidad intra e interpoblacional en algunas de ellas, para incrementar la precisión y reducir tiempos y costos de evaluación en estudios posteriores. La separación clara de *P. coccineus* (frijol patol), estuvo en concordancia con el hecho de que es una especie con morfología, fenología y adaptación diferente a *P. vulgaris* (Giurcă, 2008). La diversidad genética disminuyó entre las colectas que producen semillas pequeñas y típicamente nativas, las cuales formaron un subgrupo que incluyó colectas con semillas de color bayo (crema-beige), café, negro y rayadas negras (IIa₁), pero con similitud para otros caracteres morfo-agronómicos. Los colores de la semilla, se observan en algunas de las variedades cultivadas tradicionalmente en Durango, Chihuahua y Zacatecas (López *et al.*, 2021), por lo que se pudo establecer un vínculo entre colectas nativas y cultivadas de frijol. En otro subgrupo (IIa₂) se acumularon colectas con semillas pequeñas de color beige, conocidas como frijol bayo y flor de mayo, incluyendo coloración abigarrada negra y rosada en la testa de la semilla. Este subgrupo fue generado por la recombinación genética con colectas de la raza Jalisco, o bien estas colectas son la fuente de la variabilidad presente en la raza Durango y las clases comerciales cultivadas localmente (bayo y flor de mayo) (Singh *et al.*, 1991).

El grupo alterno (IIb) se formó con variedades criollas y mejoradas con semillas de color pinto (Raza Durango) y recombinantes genéticos interraciales, así como con semillas grandes de color flor de mayo (rosado). Los resultados mostraron continuidad geográfica para algunas clases comerciales de frijol (flor de mayo) tanto en las colectas de frijol nativo, como las variedades cultivadas. Lo anterior, pudo estar relacionado con la movilización de semillas y el intercambio genético interacial; así como, entre las clases comerciales de frijol de las razas Durango y Jalisco. También, se observó grado alto de diferenciación en el subgrupo IIb₁ de variedades criollas (Negro San Luis) y variedades mejoradas (Río Grande y Bayo Madero); así como, para las colectas nativas con semillas flor de mayo. Se apreció separación entre clases comerciales de frijol, especialmente entre las colectas nativas y cultivadas de grano pinto y por otro lado las variedades con grano negro y bayo. Se ha observado que algunas variedades (Durango 222) con grano bayo (bayo blanco, bayo rata) muestran características típicas de las variedades con semillas negras (flores y guías moradas), lo que se asoció con la cercanía genética. Además, se observó que las colectas y variedades de grano flor de mayo comparten características con la mayoría de las colectas nativas y variedades cultivadas que fueron incluidas en el estudio. Otro subgrupo (IIb₂) estuvo compuesto por dos variedades criollas con grado alto de segregación (recombinantes), conocidas como Pinto Burro y Borroso (Rebocero), que probablemente se originaron a partir de cruzamientos naturales de tipo interracial (Raza Durango y Raza Jalisco). El uso de caracteres morfo-agronómicos permitió la separación entre colectas nativas y variedades cultivadas de frijol, las cuales se relacionan principalmente con la raza Durango y sus interacciones con la raza Jalisco. Además, pudo determinarse que algunas colectas nativas y variedades cultivadas han mantenido una identidad genética propia, asociada a su origen genético y geográfico. Los resultados obtenidos permiten suponer que las formas cultivadas de frijol (variedades criollas y mejoradas), pertenecientes a las razas Durango y Jalisco, descienden de poblaciones nativas de frijol con semillas pequeñas que presentan los colores siguientes: beige,

café, bayo rata (beige veteado de gris) y pinto (café y rayado negro). Dichos resultados serán corroborados, mediante un análisis filogenético que establezca con precisión las relaciones genéticas entre colectas pertenecientes al Complejo Poblacional de la Raza Durango y su dispersión a otras áreas de México.

Las colectas nativas de La Ferrería, Dgo., mostraron presencia de semillas de color negro brillante y flor de mayo (de color negro y rosa), las cuales predominan en la Raza Jalisco (Singh *et al.*, 1991) y en la actualidad están presentes en la Raza Durango. Lo anterior, pudo ser ocasionado por la dispersión del germoplasma de frijol originado en Durango, hacia una zona con condiciones más favorables para su crecimiento. También, influyó el flujo genético entre las poblaciones de frijol nativo y las variedades cultivadas (criollas y mejoradas) (Zizumbo-Villarreal *et al.*, 2005), que se introdujeron en áreas cercanas a la zona arqueológica de La Ferrería, Dgo. Se ha detectado variación en el nivel de entrecruzamiento entre germoplasma nativo y cultivado de frijol [0.0 - 66.8% (Chacon-Sánchez *et al.*, 2021)]. Con base en los resultados obtenidos, pudo establecerse la importancia del germoplasma de la raza Durango debido a que las colectas nativas obtenidas en La Ferrería, Dgo., fueron similares a las variedades cultivadas en Durango, Chihuahua y Zacatecas.

Caracterización molecular. Los niveles de polimorfismo encontrados en el presente estudio fueron inferiores (B1/F10, B6/F10, B8/F10) y en algunos casos similares (B8/F9) a los obtenidos, con el mismo tipo de marcadores moleculares, para frijol nativo, cultivado e intermedio de Jalisco, que fluctuaron entre 85 y 89% (Castellanos-Hernández *et al.*, 2017). Los iniciadores incluidos en el presente estudio resultaron útiles para separar las colectas de frijol con base en su diversidad genética y nivel evolutivo (nativo, criollo, mejorado y testigo). En cada uno de los grupos se observaron colectas que representan recombinantes genéticos entre razas y niveles evolutivos, aunque se desconoce el sentido del intercambio, es decir se pueden tratar de avances y retrocesos desde el nativo hasta las colectas mejoradas, o bien desde éstas hacia el frijol nativo. En el grupo de colectas nativas se mezcló la variedad criolla de la Sierra de Durango, conocida como Borroso (Rebocero), la cual puede ser resultado de la recombinación genética entre germoplasma nativo y criollo, de las razas Durango y Jalisco, lo que dio lugar a esta colecta de crecimiento indeterminado, guía de longitud media y grano grande.

Otro de los grupos (II) incluyó principalmente frijol cultivado (criollo y mejorado) y una colecta de frijol nativo, con grano de color bayo y tamaño pequeño (LF 2), que mostró grado alto de diferenciación. En el mismo subgrupo, se formó un clado independiente de variedades criollas de la raza Jalisco (Río Grande y Negro San Luis) y variedades de origen interacial, como Pinto Burro, lo que sugiere que éstas pueden ser el resultado de la recombinación genética entre razas (Jalisco y Durango). Pinto Burro es una variedad que puede ubicarse en la raza Durango debido a que tiene granos de color crema y moteado de color café; aunque difiere de los pintos tradicionales, debido a que presenta tamaño grande y forma redondeada, que son atributos comunes en los granos observados en la raza Jalisco (Singh *et al.*, 1991).

En el grupo predominante de variedades cultivadas, se incluyeron colectas de frijol criollo y mejorado de la raza Durango, con grano bayo (Bayo Madero) y pinto (Pinto Saltillo). Además, se englobaron colectas con formas intermedias y granos medianos-grandes de color café, negro y flor de mayo, éstos últimos con diferentes tonalidades del color primario y secundario de la testa. La colecta de *Phaseolus coccineus* (patol) fue el único elemento del subgrupo IIb, lo cual era esperado por ser una especie diferente. Los perfiles ISTR permitieron la diferenciación de cada grupo de colectas (nativas y cultivadas de las razas Durango y Jalisco), ya que cada uno formó un clado individual, lo que sugiere un perfil genético único. La mayor similitud genética se estableció entre las colectas LF 27 y LF 29, aunque una tiene grano de color amarillo oscuro y la otra negro brillante, lo cual demostró que los caracteres morfológicos pueden mostrar cierto nivel de error en la diferenciación de colectas cercanas genéticamente. La identificación de colectas y variedades genéticamente distantes favorecerá los avances en los programas de mejoramiento genético del frijol para tolerancia a la sequía, altas temperaturas y tolerancia a las enfermedades, lo que a su vez incrementará el rendimiento y calidad del grano.

CONCLUSIONES

Persiste variación morfo-agronómica y molecular importante en el Complejo Poblacional de la raza Durango de frijol, lo que facilitó la diferenciación entre las colectas con grado diferente de evolución y ésto fue consistente con su origen genético y geográfico. Las colectas de frijol nativo, obtenidas en La Ferrería, Dgo., se perfilaron como parte de las poblaciones originarias del frijol cultivado de la raza Durango, principalmente de aquel perteneciente a la clase comercial pinto y bayo. Los resultados obtenidos sugieren que ha habido flujo genético entre las colectas nativas y cultivadas; así como, entre las razas genéticas Durango y Jalisco. Se sugiere el estudio detallado del origen de los colores negro brillante y flor de mayo, los cuales predominan en la raza Jalisco y en la actualidad, están presentes de forma abundante en frijol nativo de la Raza Durango. Las formas intermedias que mostraron colores de grano principalmente flor de mayo (rosado y negro) puede ser el resultado del flujo genético entre colectas nativas y variedades cultivadas de frijol que fueron introducidas en Durango. Algunas colectas de frijol nativo y la mayoría de las formas intermedias colectadas en La Ferrería mostraron similitud con las variedades cultivadas en Durango, Chihuahua, Zacatecas y Jalisco.

Se observaron algunas variedades criollas con características similares a las colectas nativas y variedades recombinantes, como son Borroso y Pinto Burro, por lo que sus granos fueron grandes en comparación con el frijol nativo. La heterogeneidad intrapoblacional de los granos, observada en la mayoría de las colectas de frijol nativo y formas intermedias colectadas en Durango, dificultó la caracterización con base en los atributos de la semilla. El uso de marcadores genéticos moleculares, corroboró las diferencias genéticas entre las colectas y variedades cultivadas que fueron incluidas en el estudio. Los resultados obtenidos ayudarán a optimizar los programas de mejoramiento genético para tolerancia a sequía, temperaturas altas y enfermedades, los cuales son desarrollados en diferentes áreas productoras de frijol en México y otros países del mundo.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Durango, del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo y las facilidades brindadas para la realización del presente estudio.

LITERATURA CITADA

- Acosta-Gallegos, J. A., Kelly, J. D., & Gepts, P. (2007). Prebreeding in common bean and use of genetic diversity from wild germplasm. *Crop Science*, 47, S-44.
- Blair, M. W., Díaz, L. M., Buendía, H. F., & Duque, M. C. (2009). Genetic diversity, seed size associations and population structure of a core collection of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Theoretical and Applied Genetics*, 119, 955–972.
- Castellanos-Hernández, O. A., Lepiz-Ildefonso, R., Castellanos-Enríquez, G. E., Rodríguez-Sahagún, A., & Torres-Morán, M. I. (2017). Relaciones genéticas basadas en marcadores ISTR entre formas silvestres, cultivadas e intermedias de frijol de guía colectado en Jalisco, México. *Acta Botánica Mexicana*, 118, 53–63.
- Chacón-Sánchez, M. I. (2009). Darwin y la domesticación de plantas en las américa: El caso del maíz y el fríjol. *Acta biológica Colombiana*, 14: 351-363.
- Chacon-Sánchez, M. I., Martínez-Castillo, J., Duitama, J., & Debouck, D. G. (2021). Gene flow in *Phaseolus* beans and its role as a plausible driver of ecological fitness and expansion of cultigens. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 618709.
- Chan, T. W. V. (1992). Extraction of nucleic acids from clinical samples and cultured cells. *Diagnostic Molecular Pathology. A Practical Approach*. IRL Press, Oxford, 1–23.
- Chaves-Barrantes, N. F., Polanía, J. A., Muñoz-Perea, C. G., Rao, I. M., & Beebe, S. E. (2018). Caracterización fenotípica por resistencia a sequía terminal de germoplasma de frijol común. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 1–17.

- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). (1986). Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). F. Fernández de C., P. Gepts, M. López.
- Coelho, R. C., Faria, M. A., Rocha, J., Reis, A., Oliveira, M. B. P. P., & Nunes, E. (2009). Assessing genetic variability in germplasm of *Phaseolus vulgaris* L. collected in Northern Portugal. *Scientia Horticulturae*, 122(3), 333–338.
- Espinosa-Pérez, E. N., Ramírez-Vallejo, P., Crosby-Galván, M. M., Estrada-Gómez, J. A., Lucas-Florentino, B., & Chávez-Servia, J. L. (2015). Clasificación de poblaciones nativas de frijol común del centro-sur de México por morfología de semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(1), 29–38.
- García M., E. (1987). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 4a. ed.
- Giurcă, D.-M. (2008). Morphological and phenological differences between the two species of the *Phaseolus* genus (*Phaseolus vulgaris* and *Phaseolus coccineus*). *Cercetări Agronomice în Moldova* XLII(2): 39-45.
- Hammer, Ø., & Harper, D. A. T. (2001). Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1.
- Hernandez, Y. M., Antonmarchi, A. B., Fabre, T. B., Barreiro, E. A., de Guevara, L., Palacio, A. J., & Castillo, R. O. (2015). Rendimiento y tolerancia a la sequía de seis variedades de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de campo. *Centro Agrícola*, 42(1), 69–74.
- Herrera-Cabrera, B. E., Macías-López, A., Díaz-Ruiz, R., Valadez-Ramírez, M., & Delgado-Alvarado, A. (2002). Uso de semilla criolla y caracteres de mazorca para la selección de semilla de maíz en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 25(1), 17.
- IBPGR (International Board for Plant Genetic Resources). (1982). *Phaseolus vulgaris* descriptors. *IBPGR Secretariat. Rome, Italy*. 32 p.
- INAH (Instituto Nacional de Antropología e Historia). (2024). La Ferrería. <https://www.inah.gob.mx/zonas/zona-arqueologica-la-ferreria>
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, A. y P. (2017). Agenda técnica agrícola. *Durango y La Laguna. Ciudad de México, México*. 196 p.
- Köstner, B., Hebner, A., Pohlan, J., & Dalitz, K. (2013). Estrategias de adaptación al cambio climático en la región de Durango para la mejora de la eficiencia agropecuaria. IAK-Technische Universität Desarrollo Económico-VITA, Victoria de Durango, Méx. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2125.2005>
- Kwak, M., Toro, O., Debouck, D. G., & Gepts, P. (2012). Multiple origins of the determinate growth habit in domesticated common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Annals of Botany*, 110(8), 1573–1580.
- Labastida, D., Ingvarsson, P. K., & Rendon-Anaya, M. (2023). Dissecting the genetic basis of drought responses in common bean using natural variation. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1143873.
- Lépiz-Ildefonso, R., López-Alcocer, J. J., Sánchez-González, J. J., Santacruz-Ruvalcaba, F., Nuño-Romero, R., & Rodríguez-Guzmán, E. (2010). Características morfológicas de formas cultivadas, silvestres e intermedias de frijol común de hábito trepador. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(1), 21–28.
- Long, J., Zhang, J., Zhang, X., Wu, J., Chen, H., Wang, P., Wang, Q., & Du, C. (2020). Genetic diversity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) germplasm resources in Chongqing, evidenced by morphological characterization. *Frontiers in Genetics*, 11, 697.
- López, J. L. A., Pérez, F. J. I., Cota, F. G. R., Murrieta, P. F. O., Almanza, E. C., & Gallegos, J. A. A. (2021). Leguminosas de grano en México: variedades mejoradas de frijol y garbanzo desarrolladas por el INIFAP. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 25, 63–75.
- Medina G. G., G. Díaz P., J. López H., J. A. Ruiz C. y M. Marín S. (2005). Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango (Periodo 1961-2003). *Libro Técnico Núm. 1. SAGARPA-INIFAP-CIRNOC-Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, Dgo. México*. 224 p.
- Mourice, S. K., Tumbo, S. D., & Rweyemamu, C. L. (2016). Assessment of climate change impact on common bean (*Phaseolus vulgaris* Savi, L.) Production in Tanzania. *Climate Change and Multi-Dimensional Sustainability in African Agriculture: Climate Change*

Recibido:
13/agosto/2024

Aceptado:
21/noviembre/2024

and Sustainability in Agriculture, 259–279.

- Orozco-Arias, S., Candamil-Cortes, M. S., Jaimes, P. A., Valencia-Castrillon, E., Tabares-Soto, R., Isaza, G., & Guyot, R. (2022). Automatic curation of LTR retrotransposon libraries from plant genomes through machine learning. *Journal of Integrative Bioinformatics*, 19(3), 20210036.
- Osorio, Z. M. A., Infante, D., & Molina, S. (2006). Variación genética asexual en *Agave cocui* Trelease. *Nakari*, 17, 1–7.
- Paszkowski, J. (2015). Controlled activation of retrotransposition for plant breeding. *Current Opinion in Biotechnology*, 32, 200–206.
- Punzo-Díaz, J. L., & Ramírez-Luna, A. (2008). The Chalchihuites chronology revisited: the Guadiana branch. *Podium Presentation at the 73rd Annual Meeting of the Society for America n Archaeology in Vancouver BC, Canada*.
- Reyes-Martínez, A., Barriada-Bernal, L. G., Rivera-Rodríguez, D. M., Pajarito-Ravelero, A., Delgado-Alvarado, E. A., Almaraz-Abarca, N., Herrera-Corral, J., Uribe-Soto, J. N., & Naranjo-Jiménez, N. (2011). Comparación de dos métodos para obtener adn total de *Phaseolus vulgaris* para análisis de ISTR.
- Rosales-Serna, R., C. M. Reyes-Rodríguez, N. Almaraz-Abarca, D. Sierra-Zurita, J. L. Becerra-López, S. Santana-Espinoza., and M. E. (2024). Global warming effects on natural populations of the Durango Race Common Bean Complex. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* 67: 75-76.
- Rosales-Serna, R., Kohashi-Shibata, J., Acosta-Gallegos, J. A., Trejo-López, C., Ortiz-Cereceres, J., & Kelly, J. D. (2004). Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common bean cultivars. *Field Crops Research*, 85(2–3), 203–211.
- Rosales, S. R., Acosta, G. J. A., Muruaga, M. J. S., Hernández, C. J. M., Esquivel, E. G., & Pérez, H. P. (2004). Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. *SAGARPA. INIFAP. CIRCE. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México, México. Libro Técnico*, 6, 148.
- Rosales, S. R., Gallardo, H. F., & Espinoza, S. S. (2020). *NOD 1*. Variedad mejorada de frijol negro opaco para el estado de Durango.
- Sambrook J., E. F. F. and T. M. (1989). *Molecular cloning: a Laboratory Manual, Vol. 1. Cold Spring Harbor Laboratory Press, USA. 1659 p.*
- Sanguinetti, C. J., & Simpson, A. J. (1994). Rapid silver staining and recovery of PCR products separated on polyacrylamide gels. *Biotechniques*, 17(5), 914–921.
- Singh, S. P., Gepts, P., & Debouck, D. G. (1991). Races of common bean (*Phaseolus vulgaris*, Fabaceae). *Economic Botany*, 379–396.
- SNICS (Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas). (2017). Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Guía técnica, para la descripción varietal (2a Edición, 2017). SNICS-SAGARPA. CDMX. México. 41 p.
- Torres-Morán, M. I., Almaraz-Abarca, N., Velasco-Ramírez, A. P., Hernández-Vargas, V., Orea-Lara, G., León, A. C. D. de, & Oliver-Salvador, C. (2008). *Taxonomic significance of ISTR to discriminate species in Agavaceae*.
- UPOV (Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales). (2012). *Directrices para la ejecución del examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad, para judía común, alubia, Phaseolus vulgaris. TG/12/9. http://www.upov.int/edocs/tgdocs/es/tg012.pdf.*
- Wallander-Compean, L., Almaraz-Abarca, N., Alejandro-Iturbide, G., Uribe-Soto, J. N., Ávila-Reyes, J. A., Torres-Ricario, R., Herrera-Arrieta, Y., & Delgado-Alvarado, E. A. (2022). Variación fenológica y morfométrica de *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae) de cinco poblaciones silvestres de Durango, México. *Botanical Sciences*, 100(3), 563–578.
- Yu, Z., Li, J., Wang, H., Ping, B., Li, X., Liu, Z., Guo, B., Yu, Q., Zou, Y., & Sun, Y. (2024). Transposable elements in Rosaceae: insights into genome evolution, expression dynamics, and Syntenic gene regulation. *Horticulture Research*, uhae118.
- Zizumbo-Villarreal, D., Colunga-GarcíaMarín, P., de la Cruz, E. P., Delgado-Valerio, P., & Gepts, P. (2005). Population structure and evolutionary dynamics of wild-weedy-domesticated complexes of common bean in a Mesoamerican region. *Crop Science*, 45(3), 1073–1083.

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

ETNOMICOLOGÍA Y VENTA DE HONGOS COMESTIBLES SILVESTRES EN EL TIANGUIS DE SAN ANTONIO ACAHUALCO, ESTADO DE MÉXICO

ETHNOMICOLOGY AND SALE OF WILD EDIBLE MUSHROOMS AT TIANGUIS IN SAN ANTONIO ACAHUALCO, STATE OF MEXICO

Jasso Arriaga, X.

ETNOMICOLOGÍA Y VENTA DE HONGOS COMESTIBLES SILVESTRES EN EL TIANGUIS DE SAN ANTONIO ACAHUALCO, ESTADO DE MÉXICO

ETHNOMICOLOGY AND SALE OF WILD EDIBLE MUSHROOMS AT TIANGUIS IN SAN ANTONIO ACAHUALCO, STATE OF MEXICO



Etnomicología y venta de hongos comestibles silvestres en el tianguis de San Antonio Acahualco, Estado de México

Ethnomicology and sale of wild edible mushrooms at tianguis in San Antonio Acahualco, State of Mexico

Xochitl Jasso Arriaga

ETNOMICOLÓGIA Y
VENTA DE HONGOS
COMESTIBLES
SILVESTRES EN EL
TIANGUIS DE SAN
ANTONIO ACAHUALCO,
ESTADO DE MÉXICO

ETHNOMICOLOGY AND
SALE OF WILD EDIBLE
MUSHROOMS AT
TIANGUIS IN SAN
ANTONIO ACAHUALCO,
STATE OF MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 329-346. Enero 2025

DOI:
10.18387/polibotanica.59.21

Xochitl Jasso-Arriaga. Autora de correspondencia: xjasso4@yahoo.com.mx

<https://orcid.org/0000-0001-9037-8688>

Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario UAEM
Temascaltepec, Estado de México, México

RESUMEN: La presente investigación registró el conocimiento tradicional, la forma de recolección, consumo y venta de hongos comestibles silvestres en la comunidad de San Antonio Acahualco, Estado de México, México. Se calculó el índice de importancia cultural (Cl_s) y frecuencia relativa de citación (CFR) de los hongos comestibles silvestres. Se determinó el índice de presencia relativa de especies en el tianguis (PRET). La recolección, consumo y venta de los hongos inician con el ciclo de lluvias de julio a octubre. Los hombres y mujeres forman dos grupos diferentes en la recolección de hongos. Se identificaron 16 especies de las más recolectadas y consumidas por ambos grupos; estas especies tienen el puntaje más alto del Cl_s, se caracterizan porque son las más buscadas y algunas tienen un mayor precio en el mercado. Las personas con limitación económica ofrecen los hongos en menos de \$50.00 MXN en comparación con los puestos de venta que triplican el precio. Los jóvenes del grupo dos recolectan cuatro días a la semana. Durante la temporada de venta se registró la dinámica de la venta de 31 hongos comestibles silvestres en el tianguis de San Antonio Acahualco. Los hongos son recolectados por ser una alternativa para el sustento familiar a través del consumo y venta. La comercialización se realiza al interior del poblado y en ciudades más próximas. Se concluye que la forma de recolección determina la conservación del hábitat de los hongos. Por lo tanto, se recomienda establecer reglas de recolección debido a la importancia ecológica, alimentaria y económica de los hongos.

Palabras clave: hábitat, recolección, consumo, PRET, venta.

ABSTRACT: This research scored the traditional knowledge, the way of collecting, consuming, and selling wild edible mushrooms in the community of San Antonio Acahualco, State of Mexico, Mexico. The index of cultural importance (Cl_s) and relative frequency of citation (CFR) of wild edible mushrooms were calculated. The index of relative presence of species in the market (PRET) was determined. The collection, consumption, and sale of mushrooms begins with the rainy season starting in July through October. Men and women participate from two different groups in the collection of mushrooms. It were identified sixteen species as the most collect and consumed by both groups; these species have the highest score of the Cl_s, characterized by being the most sought after and some have a higher price in the market. People with economic limitations offer mushrooms for less than \$50.00 MXN compared to the stores that increase the price three times. The youth in group two collect four days a week. During the sales season, the sales dynamics of 31 wild edible mushrooms were recorded at the San Antonio Acahualco market. Mushrooms are collected as an alternative for family sustenance through consumption and sale. They are sold within the town and in nearby cities. It is concluded that the method of collection determines the conservation of the mushrooms' habitat. It is recommended to establish rules for collection due to the ecological, nutritional and economic importance of mushrooms.

Key words: habitat, collection, consumption, PRET, sale.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los hongos en México es milenario, desde tiempos prehispánicos. Éstos fueron utilizados por los indígenas en la alimentación, en la medicina, en las festividades y en diversas prácticas religiosas. En la lengua originaria náhuatl, a los hongos se les daba el nombre genérico de *Nanácatl*, que significa *carnes*, plural de *nácatl: carne* (Dubovoy, 2012; Mariaca Méndez *et al.*, 2001). Es un recurso alimenticio natural que solo el bosque proporciona; pero es finito, ya que depende de la conservación de elementos bióticos y abióticos del bosque. Los hongos juegan un papel importante en la continuidad de procesos de ecosistemas y la prestación de servicios, incluido el suministro de alimentos e ingresos para comunidades rurales (Stojek *et al.*, 2022; Straatsma *et al.*, 2001 y FAO, 2011). Actualmente, los ecosistemas naturales están siendo amenazados por la expansión de actividades productivas, como son las plantaciones forestales comerciales, dando lugar a la pérdida y degradación de bosques nativos, afectando a las especies nativas. Asimismo, la deforestación es la principal impulsora de la pérdida de biodiversidad en todo el mundo (Fontúrbel *et al.*, 2022), y el cambio climático está vulnerando la continuidad de los hongos en el mediterráneo (Alday *et al.*, 2017).

Egli *et al.*, (2006) y (Leonard & Evans (1997) han demostrado que el tránsito continuo por el bosque reduce la producción de cuerpos fructíferos en un 70%. Ruiz-Almenara *et al.* (2019) evidencian que la recolección de hongos con las medidas necesarias y correctas no alteran al medio ambiente y al hábitat de los macromicetos. Es necesario mencionar que la recolección de hongos de forma continua y depredadora impacta de forma negativa, hasta degradar la flora del bosque, por lo que es necesario advertir del grave peligro que sufre el hábitat de los hongos, sobre todo durante su temporada (Ceballos, 2008).

Una medida de solución es registrar y conservar el conocimiento etnomicológico tradicional, debido a que las personas y comunidades que poseen dicho conocimiento identifican el hábitat de los hongos, conocen las fechas de fructificación, poseen el conocimiento de las características del suelo para la reproducción de hongos y desarrollan técnicas de recolección de forma ecológica (López-García *et al.*, 2020).

En el presente trabajo se identificaron los motivos y las fechas de recolección de los hongos, quién realiza la colecta, las especies más buscadas y consumidas. Investigaciones previas han demostrado que la recolección de hongos debe cumplir con procesos específicos para evitar deterioros y lesiones tanto del producto como del lugar de producción. Como ejemplo, se puede mencionar el mantener micelio en su lugar y parte del estípite, recolectar hongos de gran tamaño y dejar los hongos de menor tamaño, limpiarlos y sacudirlos en el lugar de recolección (Leonard & Evans, 1997, Bello-Cervantes *et al.*, 2021). La conservación del bosque depende de la población local, y acontece en el momento de recolectar recursos forestales no maderables, por lo tanto, la colecta de estos debe favorecer la conservación del hábitat de hongos, por su importancia ecológica, alimentaria y económica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó durante el 2017 en San Antonio Acahualco, municipio de Zinacantepec, Estado de México, México (Figura 1). Se localiza al suroeste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de Toluca (ZMCT), a una altitud de 2, 810 msnm, su clima es templado subhúmedo con lluvias de mayo a octubre (PDM, 2022). El área de asentamientos humanos está conformada por 228 ha. y la superficie de cultivos es de 1,467 ha. Además, una parte del ejido es bosque de pino, encino y oyamel con una superficie de 1,280 ha. La población total es de 17,709 habitantes (INEGI, 2020).



Figura 1. Área de estudio. San Antonio Acahualco, Estado de México, México.

Figure 1. Study area. San Antonio Acahualco, State of Mexico, Mexico.

Se identificaron a informantes clave, siguiendo la metodología de Signorini *et al.* (2009). En ese contexto, se realizó un censo de población y se contemplaron los siguientes aspectos: edad (personas con más de 75 años), ser originarios de la comunidad, poseer el conocimiento tradicional relacionado a la recolección de hongos comestibles silvestres y la conexión con el bosque. Se obtuvo un listado de 61 personas, posteriormente se sortearon 12 números de entre las 61 personas. Se diseñó y se aplicó una entrevista semiestructurada considerando la forma de recolección, qué hongos recolectan, en dónde se localizan, cómo se consumen, cómo aprendieron a recolectarlos. Se visitó el tianguis de San Antonio Acahualco durante julio a octubre para cotejar el conocimiento tradicional, así como la actividad comercial de los hongos. Se utilizó un diario de campo, en el cual se registró: el sexo de quien atendía el puesto de venta de los hongos, número de puestos, número de especies por puesto, precio, cantidad (en kilogramos) y fecha. Se aplicó la misma entrevista semiestructurada a los vendedores. Posteriormente, se calculó la frecuencia relativa de citación (*CFR*) por medio de la fórmula 1, para cada una de las especies en complemento con la información proporcionada por informantes clave (Signorini *et al.*, 2009). Y la presencia relativa de las especies en el tianguis (*PRET*) de Acahualco se realizó adaptando la fórmula 1 en la 2, donde:

$$FRC = \frac{NC}{N} \quad (\text{Fórmula 1})$$

CFR = frecuencia relativa de citación. *NC*= es el número de citaciones de la especie por los informantes, *N*= es el número total de informantes.

$$PRET = \frac{NEP}{N} \quad (\text{Fórmula 2})$$

NEP= Número de puestos en dónde se encontró la especie, y N= número total de puestos de hongos. El propósito de calcular este índice fue para analizar la disponibilidad y consumo de hongos en el tianguis de Acahualco.

El índice de importancia cultural de los hongos (CI_S) fue calculado a partir de la ecuación 3 (Signorini *et al.*, 2009):

$$CI_S = \sum_{u=u_1}^{u_{NC}} - \sum_{i=i_1}^{i_N} UR_{ui} / N \quad (\text{Fórmula 3})$$

Donde: u = es la categoría de uso (registro de los diferentes patillos por especie, proporcionados por las personas que poseen el conocimiento etnomicológico), NC = es el número total de diferentes categorías de uso (de cada especie “ i ”), UR = es el número total de usos reportados para cada especie, N = es el número total de informantes.

En el tianguis se adquirieron ejemplares de las diferentes especies para determinar el nombre científico, siguiendo la metodología de Cifuentes & Villegas (1986).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conocimiento tradicional de los hongos comestibles

San Antonio Acahualco ha dejado de ser un pueblo otomí y de chaguas derivado del abandono de la comunicación en lenguas originarias. También, ha cambiado la indumentaria, las creencias culturales y de tribu han sido modificadas de manera paulatina y definitiva, al menos en generaciones más recientes. Sin embargo, las personas nativas de mayor edad conservan el conocimiento tradicional de los hongos. Esto se identifica a partir de la muestra de este sector seleccionado, ya que el 100% mencionaron que desde niños fueron involucrados en la identificación, recolección y consumo de este tipo de productos. Es posible sostener que, actualmente, tienen un promedio de experiencia de 50 años. La transmisión del conocimiento de una generación sucede desde temprana edad; son instruidos sobre los lugares en donde crecen los hongos, los sustratos, o la asociación con ciertas especies de árboles, arbustos y herbáceas (Contreras *et al.*, 2018). La investigación de Estrada-Flores *et al.* (2019) registraron que los niños son instruidos a partir de los cuatro a seis años.

Las personas que poseen el conocimiento tradicional se niegan en revelar los lugares en donde nacen los hongos a personas jóvenes que no poseen este conocimiento, por lo que su recolección es de forma continua y sin técnica tradicional. Esto ha sido reafirmado por (Perete & Velázquez, 2023) porque aseguran que el conocimiento micológico de especies comestibles fue heredado de generación en generación, y actualmente sólo los recolectores tradicionales disponen de dicha información. Sin embargo, las personas que poseen este tipo de conocimiento de San Antonio Acahualco afirmaron que han observado que la disponibilidad de los hongos en el bosque está determinada por la disminución de la vegetación (hierbas), el tránsito continuo, los incendios forestales, la tala, la extracción del musgo, las sequias, la extracción continua y forma de cosecha de los hongos.

Remarcaron que año con año el bosque está perdiendo humedad: el suelo cada año se seca, hasta llegar a formar polvillo y con ello la disminución de cantidad de hongos. Esta es una evidencia que reporta (García, 2014), los hongos abarcan los meses de mayo a septiembre, durante el ciclo de lluvias, porque la humedad es indispensable para que aparezca este recurso, además de registrar que existen zonas específicas. En concreto, se puede buscar hongos destacando los bosques de pino (68%), milpa (58%), los bosques de ocote (53%) y roble (21%).

Las personas con conocimiento tradicional de San Antonio Acahualco clasifican a los macromicetos como hongo de agua, de verano y de hielo, además los cocinan a partir de su consistencia o estructura; de igual modo, saben identificar los hongos comestibles, tóxicos y alucinógenos. Conocen el efecto de cada uno de ellos; por ejemplo, los alucinógenos, se consumen crudos y cierta cantidad, provocando efectos físicos (incremento en la fuerza muscular

por un periodo de tiempo), pierden la noción de la realidad y tiempo, ven visiones, provocan hambre, dan felicidad y otros efectos. En cambio, los tóxicos pueden causar dolor de estómago, vómito y causa hasta la muerte. No revelaron el nombre de los hongos por seguridad y salud. Sin embargo, (Burrola-Aguilar *et al.*, 2012) evidencian que los recolectores de Amanalco, Estado de México, conocen los sitios de fructificación para cada especie y localmente se conocen sitios donde se encuentran poblaciones abundantes y productivas. Esta información no se comparte con otras personas; se considera un secreto familiar, para asegurar el volumen de recolección y venta.

Recolección y venta de hongos por hombres y mujeres

Hombres y mujeres del poblado de San Antonio Acahuacalco recolectan y venden hongos comestibles silvestres de julio a octubre, actividad registrada en el Valle de Toluca por Mariaca *et al.* (2001) demuestran que entre junio y diciembre llegan a los mercados los recolectores de ambos sexos a comerciar hongos comestibles silvestres, actividad que inicia en el seno de la economía familiar rural y cuya realización implica conocimientos específicos que se transmiten de padres a hijos. Se identificó un grupo mayoritario y otro minoritario de recolectores de hongos comestibles silvestres y de otros recursos forestales no maderables.

El grupo mayoritario estuvo conformado por la predominancia de hombres. Éstos explicaron los motivos y la división de actividades. En primer lugar, mencionaron el esfuerzo físico que realizan, porque caminan más de 10 kilómetros, el peso del *chiquihuite* (es otra condicionante. Éste un medio ancestral y sirve para transportar o guardar objetos, hecho con palma o fibra natural), por la seguridad de la mujer ante animales salvajes y por otros peligros. Además, las mujeres, en sus días fértiles no pueden acceder al bosque. En cuanto a la división de actividades, la mujer es responsable de limpiar (retira la tierra y materia vegetal adherida) y clasificar los hongos (los venenosos y maduros comestibles son desechados). Las especies jóvenes son destinadas para el consumo y venta. La mujer domina diferentes procedimientos de cocinarlos, por ejemplo, en caldos, quesadillas, zarandeados, guisados en su propio jugo y crudos. Las recetas ancestrales son más laboriosas y con pocos ingredientes locales y las que tienen más ingredientes son creadas y compartidas entre mujeres jóvenes de la comunidad.

En cuanto a los hongos destinados para venta, la mujer se encarga de ofrecerlos a vecinos, familiares y conocidos. En caso de que no sea posible la venta en torno a su contexto inmediato, se traslada al núcleo urbano más próximo, como es Zinacantepec y Toluca. Algunos recolectores deciden venderlos un día a la semana en la ciudad de México, en el mercado de Jamaica o la Merced para obtener más ingresos, por lo general ya conocen algunos acaparadores y sólo compran el hongo mazorca (*Morchella spp.*) deshidratado, el resto de los hongos comestibles (*Boletus spp.* (pancita), *Russula brevipes* (Peck) (oreja), *Lactarius deliciosus* (L.) Gray (enchilados), *Ramaria spp.* (patita de pájaro), *Clitocybe gibba* (Pers.) P. Kumm (tejamanilero), *Helvella spp.* (gachupín), *Lyophyllum spp.* (clavito) y *Amanita calyptroderma* (G. F. Atk. & V. G. Ballen) (tecomates) los tienden en el suelo y el promedio vendido es de 35 kg.

El segundo grupo minoritario, estuvo conformado por mujeres, por lo general dependen de un esposo con un trabajo temporal y sueldo mínimo. Ellas buscan formas de como aportar a la economía familiar. Para ello, establecen diferentes alternativas, como es la recolección y venta de hongos comestibles silvestres, la recolección de quelites (plantas comestibles), la venta de tierra de monte, además de que se alquilan desde el mes de noviembre para armar pacas de musgo. Este grupo, diversifica la venta de recursos forestales no maderables, a diferencia del primer grupo. Los lugares de venta de estos recursos son en el tianguis de San Antonio Acahuacalco (miércoles y domingo) y el mercado municipal de Zinacantepec (un día a la semana). La actividad de recolección es de forma grupal con lazos familiares o de amistad. Las mujeres realizan todo el proceso completo desde la recolección, clasificación y venta de hongos. Esta dinámica ha sido reportada por Zamora *et al.* (2007) en sus estudios realizados en Tancítaro, Michoacán, quien destaca que es una actividad propia de mujeres. El promedio de venta de hongos es de 10 kg y los precios varían de acuerdo con la cantidad y costo de hongos de los otros puestos. La venta de los hongos y los otros recursos forestales no maderables los prolongan más de seis meses, por lo general inician desde los meses de marzo a junio, marcado con el inicio de las lluvias. Los trabajos suelen terminar en febrero. Las personas que poseen el conocimiento tradicional no aprueban esta forma de manejo, argumentan que es una forma de vulnerar el bosque a tasas que no se podrá recuperar ni en 100 años.

Los hongos comestibles silvestres herencia de los antepasados y mujeres

Las mujeres adultas mencionaron que la comida de los antiguos, hasta el día de hoy, son los hongos y es comida natural. Remarcaron la mayoría de ellas que “el bosque nos da de comer”. Recurso alimentario de mayor importancia en la región de los purépechas, relacionan al hongo como comida buena, comida del cerro, comida natural (Servín & Alarcón-Cháires, 2018). Este sector de las mujeres recomienda diversas formas de cocinarlos, siempre y cuando los compradores preguntan la forma de como cocinarlos. Como prueba dominan el conocimiento de preparación de acuerdo con la consistencia de los hongos; es decir, los hongos blandos y acuosos son cocinados asados, guisados, crudos en taco acompañados con cebolla, jitomate, chile y limón y en quesadillas. Los hongos de textura dura y fibrosa son hervidos en agua, condimentos y carne. Así, las mujeres adultas dominan recetas ancestrales y se caracterizan por tener menos ingredientes y más procedimientos. Mientras que las mujeres jóvenes dominan pocas recetas y actuales, agregando ingredientes y procedimientos nuevos, por ejemplo, utilizan el papel aluminio como una herramienta para cocinarlos, agregan crema y mantequilla para su cocción. Asimismo, carecen del conocimiento tradicional para la distinción entre los hongos comestibles silvestres y no comestibles, ellas reconocen, que han tenido problemas estomacales, así que han resuelto no recolectar hongos que no conozcan. Sólo recolectan las más comerciales y son fáciles de cocinar, como: *Boletus* spp. (pancita), *Russula brevipes* (Peck) (oreja), *Lactarius deliciosus* (L.) Gray (enchilados), *Ramaria* spp. (patita de pájaro), *Clitocybe gibba* (Pers.) P. Kumm (tejamanilero) y *Helvella* spp. (gachupín).

Dinámica de venta de hongos silvestres comestibles más citados por los dos grupos de recolectores

El tianguis de Acahualco se desarrolla los miércoles y domingos. Durante el período de julio a octubre del 2017 en el tianguis de Acahualco se registró nueve puestos de hongos; un mínimo de uno; el promedio fue de cuatro. El número mayor se observó el 31 de julio con nueve espacios de venta. Del total de puestos, uno fue constante en toda la temporada (miércoles y domingo) con un promedio de 35 kg con diferentes especies. El 30% eran atendidos por personas con ingresos limitados y sus hongos eran económicos en comparación con el resto, el promedio de hongos que vendieron por día fue de 8 kg a precios del rango de \$20.00 a \$50.00 MXN. Mientras el resto de los puestos, el promedio fue de 32 kg por día y el precio varió entre \$40.00 a \$200.00 MXN. Para el caso de la localidad del Aguacate Sur, Municipio de Tancítaro, Michoacán, la cantidad promedio aprovechada varía según el tipo de consumidor y el precio es prácticamente el mismo en la comunidad y en la cabecera municipal con un promedio de \$35.00 MXN por kg (Zamora *et al.*, 2007). El 60% de puestos de hongos era atendido por mujeres. El promedio de hongos que vendieron fue de 40 kg. Llegan al tianguis alrededor de las seis de la mañana para tender el puesto en aproximadamente 45 minutos; posterior a ello, ya están listas para vender. Por lo general la venta de hongos termina alrededor de las 11:00 am, algunos puestos terminan antes de las nueve de la mañana. Estas mujeres emplean el resto del día para realizar actividades del hogar y del campo. En cambio, los hombres desde que amanece atienden a los animales de traspatio, luego se dirigen a la venta de hongos, posteriormente van a la milpa a quitar hierba (herbáceas), abonan y realizan actividades de albañilería. La diversidad de actividades productivas asegura ingresos para los hogares de las mujeres y hombres que recolectan hongos, por lo que es importante conservar el hábitat de los hongos y la milpa porque son fuente de alimentos e ingresos. El grupo de las mujeres continúan con la recolección de hongos jueves, viernes, sábado y martes. Dicha actividad es consistente con lo reportado por Jockes *et al.* (1996) quienes asumen que la diversidad de actividades que realizan las mujeres en el aprovechamiento y explotación de recursos forestales no maderables es resultado de las pocas oportunidades que tienen para emplearse en actividades del sector secundario y terciario. El grupo de hombres sólo recolectan hongos dos días a la semana.

Los recolectores jóvenes que no poseen el conocimiento tradicional acopian hongos a familias que esporádicamente los recolectan y los venden en el mercado municipal de Zinacantepec, pueblos circunvecinos y en la ciudad de Toluca.

La venta en la Ciudad de México es realizada por cinco familias recolectoras de hongos. Distribuyen principalmente *Morchella* spp. (mazorcas), deshidratadas a restaurantes, laboratorios de suplementos y en empresas (que enlatan y exportan principalmente a Europa y Estados

Unidos). Carr y Biggs (2008) reportan que los recursos forestales no maderables es un sector estratégico para la reducción de la pobreza y son la base de la seguridad alimentaria, afirma que hay 150 especies de recursos forestales no maderables en el comercio internacional, en los que se incluyen los hongos, dicha actividad de aprovechamiento involucra a trabajadores y productores.

Las familias que venden hongos en el tianguis de Acahualco obtienen un ingreso promedio de \$1,000.00 MXN por día, el cual se destina para solventar gastos familiares como alimentación y vestido. Para el caso de la comercialización de hongos hacia fuera de la comunidad, se registró que el precio de venta es mayor. Por ejemplo, el kilogramo en fresco de *Morchella spp.* (mazorca) tiene un precio de \$500.00 a \$800.00 MXN y 100 gramos deshidratada obtuvo el promedio de \$1,000.00 MXN.

Los factores que determinan el precio de los hongos son: a) El nivel económico de las personas, b) El tiempo empleado en la recolección, c) La cantidad disponible de los hongos. d) Los precios de cada puesto de hongo y e) Comida y traslado para llegar al bosque (caminando hacen una hora). Ejemplo, si emplean un día y sí los hongos son escasos, entonces el precio promedio es de \$70.00 MXN por kg. Las personas que poseen el conocimiento tradicional señalaron que los clavitos y las mazorcas disminuye su cantidad, cada año que pasa, debido a los cambios del clima, el suelo del bosque pierde humedad, y la vegetación deja de salir, solo los árboles están resistiendo. A estos factores se suma la extracción del musgo, la perlilla que es un arbusto (es utilizado para hacer Figuras navideñas como venados), así como la hierba de chivo, el tabaquillo, el trébol de monte y orégano de monte son herbáceas aromáticas (son utilizadas en infusiones como agua de tiempo, para el dolor de estómago y nervios). Esto indica que se debe hacer un estudio de la dinámica del suelo, su interacción con herbáceas/arbustos y como intervienen en la continuidad de los hongos. Debido a que las familias de los recolectores de hombres y mujeres dependen de los hongos como fuente de alimentación diversificada e ingresos complementarios. Adicionalmente, Zamora *et al.* (2007) indican que los servicios y productos ecológicos que ofrece el bosque están siendo comprometidos, como los ojos de agua y la diversidad de flora, fauna y de los hongos macromicetos.

Las especies de la tabla 1 fueron mencionadas por las personas que poseen el conocimiento tradicional y personas que carecen de él (son el 60%). El precio de estas varía de acuerdo con los incisos a) a la e): *Morchella spp.* (mazorcas), *Lyophyllum spp.* (clavitos), *Helvella spp.* (gachupin), *Ramaria spp.* (patita de pájaro), *Boletus spp.* (pancita) y *Clitocybe gibba* (Pers.) P. Kumm (tejamanilero) tienen un precio alto (>\$60.00 MXN/kg), mientras que *Boletus aff. luridiformis* (Rostk) (galambos), *Cantharellus cibarius* (Fr.) (duraznillo o flor de calabaza), *Lactarius deliciosus* (L.) Gray (enchilados) y *Amanita calyptroderma* (G. F. Atk. & V. G. Ballen) (tecomates) tienen un precio intermedio (\$40.00 MXN/kg) y los hongos con el menor precio ($\leq \$30.00$ MXN/kg) son: *Gomphus sp.*, *Russula brevipes* (Peck) (oreja), *Agaricus spp.* (pipila), *Bovista spp.*; *Lycoperdon spp.* (ternerita), *Suillus pungens* (Thiers & A. H. Sm.) (viejitas) y *Amanita sp.* (mantecadas).

Tabla 1. Precios e índices de 16 hongos comestibles
Table 1. 16 food mushrooms index of prices

| No. | Nombre común | Nombre científico | Precio (MXN/Kg) | CI _s | CFR _{IC} | PRE _e |
|-----|------------------|--|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 1 | Oreja | <i>Russula brevipes</i> (Peck) | \$30.00 | 0.67 | 0.67 | 0.83 |
| 2 | Enchilado | <i>Lactarius deliciosus</i> (L.) Gray | \$40.00 | 0.42 | 0.42 | 0.66 |
| 3 | Corneta | <i>Gomphus sp.</i> | \$30.00 | 0.83 | 0.58 | 0.65 |
| 4 | Patita de Pájaro | <i>Ramaria spp.</i> | \$70.00 | 0.51 | 0.50 | 0.63 |
| 5 | Pancita | <i>Boletus spp.</i> | \$60.00 | 0.92 | 0.75 | 0.57 |
| 6 | Mantecada | <i>Amanita sp.</i> | \$25.00 | 0.25 | 0.17 | 0.56 |
| 7 | Gachupin | <i>Helvella spp.</i> | \$70.00 | 1.25 | 0.83 | 0.47 |
| 8 | Tejamanilero | <i>Clitocybe gibba</i> (Pers.) P. Kumm | \$70.00 | 0.83 | 0.67 | 0.47 |
| 9 | Amarillo | <i>Cantharellus cibarius</i> (Fr.) | \$40.00 | 0.59 | 0.58 | 0.44 |

| No. | Nombre común | Nombre científico | Precio (MXN/Kg) | CI _s | CFR _{IC} | PRET _e |
|-----|--------------|--|--------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 10 | Clavito | <i>Lyophyllum</i> spp. | \$70.00 | 0.92 | 0.91 | 0.34 |
| 11 | Pipila | <i>Agaricus</i> spp. | \$30.00 | 0.17 | 0.17 | 0.28 |
| 12 | Tecomate | <i>Amanita calyptroderma</i> (G. F. Atk. & V. G. Ballen) | \$40.00 | 0.51 | 0.50 | 0.25 |
| 13 | Ternerita | <i>Bovista</i> spp.; <i>Lycoperdon</i> spp. | \$30.00 | 0.17 | 0.17 | 0.24 |
| 14 | Mazorca | <i>Morchella</i> spp. | \$200.00 | 0.75 | 0.58 | 0.22 |
| 15 | Jalambo | <i>Boletus aff. luridiformis</i> (Rostk) | \$50.00 | 0.42 | 0.42 | 0.15 |
| 16 | Viejita | <i>Suillus pungens</i> (Thiers & A. H. Sm.) | \$30.00 | 0.50 | 0.42 | 0.10 |

CI_s: Índice de importancia cultural, CFR: Citación de frecuencia relativa. PRET: Presencia relativa de la especie en el tianguis

Helvella spp. (gachupines) presentaron el mayor índice de importancia cultural (1.25) y el segundo mayor índice de frecuencia relativa de citación (0.83), tuvieron un índice medio de presencia en el tianguis de Acahuilco y el segundo mayor precio de venta (\$70.00 MXN). Los informantes clave mencionaron que los gachupines se venden en fresco y ellos los deshidratan para consumo familiar durante la temporada de secas.

Morchella spp. (mazorcas) no obstante que fueron las especies que tuvieron el mayor precio (\$200.00 MXN) de venta, su presencia relativa en el tianguis de Acahuilco fue una de las más bajas (0.22), esto coincide con los datos mencionados por los vendedores quienes indicaron que el principal punto de venta es en restaurantes y laboratorios. Esto es consistente con lo encontrado por Rodríguez-Muñoz *et al.* (2010) quienes mencionan que en comunidades del municipio de Texcoco los acopiantes del hongo mazorquita lo deshidratan y venden en restaurantes. También, los hombres los venden por mayoreo en la ciudad de México, y las mujeres lo hacen al menudeo en mercados locales.

Lyophyllum spp. (clavitos) fueron las especies que ocuparon el segundo lugar del índice de importancia cultural (0.92) y coincide con la mayor citación reportada por los informantes clave (0.91); sin embargo, su presencia relativa en el tianguis fue baja, no obstante que el precio de venta es el segundo de los más altos. Esto se debe a que los clavitos tienen una temporada corta (15 días) de fructificación. Además, los recolectores de hongos mencionaron que en los últimos años esta especie ha disminuido en el bosque y de forma general reconocen, que cada año, disminuye la cantidad y tamaño de éste y de todos los hongos.

Russula brevipes (Peck) (orejas) no obstante de situarse en la quinta posición de importancia cultural y frecuencia relativa de citación (0.67) obtuvo el primer lugar de presencia relativa en el tianguis, esto puede estar asociado al bajo costo de venta (\$30.00 MXN), que lo hace accesible a cualquier bolsillo y a la alta disponibilidad en el bosque. Asimismo, dicha especie forman micorrizas (Villarruel-Ordaz & Cifuentes, 2007), por lo que la continuidad de las especies forestales y *Russula brevipes* depende de la existencia de una de la otra. La Figura 3 presenta el ciclo de presencial en el tianguis de la *Russula b.* con registro de cuatro meses. La presencia continua de esta especie en el tianguis afirma lo que mencionaron las personas que poseen el conocimiento tradicional: los recolectores jóvenes recolectan de forma continua y extraen toda la cantidad disponible. Entonces, se debe estudiar y conservar las características del hábitat de *Russula b.* para un manejo adecuado.

Agaricus spp. (pipilas), *Bovista* spp. y *Lycoperdon* spp. (terneritas) tuvieron una menor frecuencia relativa, bajo índice de importancia cultural, la presencia en el mercado fue baja y de menor precio (\$30.00 MXN). En comparación con las especies de mayor importancia cultural son las que más se consumen y tienen un precio mayor de \$60.00 MXN. Estos datos indican que el consumo de las especies de importancia cultural son las más consumidas y están expuestas a ser sobreexplotadas.

Las especies que tuvieron el mayor índice de citación (CFR) y de importancia cultural son: *Boletus* spp. (pancita), *Helvella* spp. (gachupin), *Clitocybe gibba* (tejamanilero), *Lyophyllum* spp. (clavito) y *Morchella* spp. (mazorca), pero tuvieron menor presencia relativa en el tianguis, por lo que es necesario realizar una investigación si los recolectores están extrayendo estas especies

por encima de su capacidad de reproducción o si estas especies son naturalmente escasas. Asimismo, en los estudios de Carr & Biggs (2008) establecen que, en comunidades latinoamericanas aledañas a bosques, el 75% de su ingreso resulta de la sobreexplotación de los recursos forestales no maderables. Mwangi *et al.* (2009) señalan que en países en desarrollo hay un deterioro de bosques y selvas, lo cual compromete la disponibilidad de recursos naturales para la seguridad alimentaria, así como la pérdida de beneficios ecológicos, económicos y sociales. El manejo y conservación de los recursos naturales es un problema que afecta a las comunidades rurales en países en desarrollo, por lo que se debe trabajar en medidas ecológicas para la continuidad de ecosistemas.

Calendarización de la disponibilidad de hongos comestibles silvestres en el tianguis

Los hongos de la tabla 2 es la suma de las especies mencionadas por los dos grupos de recolectores; además, se organizaron de acuerdo con su presencia en el tianguis, en donde se registraron 15 especies adicionales de julio a octubre, dando un total de 31 especies de hongos, de éstas el 52% son de importancia cultural, distribuidas en 14 familias. La familia de mayor presencia fue *Tricholomataceae*, que está integrada por ocho especies, seguida por *Russulaceae* con cuatro especies, posteriormente *Boletaceae* con tres especies y 16 especies conformaron dos y una familia fúngica (Tabla 2).

Tabla 2. Hongos comestibles silvestres comercializados en el tianguis de San Antonio Acahualco
Table 2. Wild mushrooms offered in the San Antonio Acahualco's community market

| Nombre Común | Familia | Nombre científico |
|--------------------------------|--------------------|---|
| Pipas/pollitos | AGARICACEAE | <i>Agaricus</i> spp. |
| Champiñón de monte | AGARICACEAE | <i>Agaricus silvicola</i> (Vittadini) Peck |
| Tecomate | AMANITACEAE | <i>Amanita calyptroderma</i> (G. F. Atk. & V. G. Ballen) |
| Mantecadas | AMANITACEAE | <i>Amanita novinupta</i> (Tollus & J. Lindgr.) |
| Pancita | BOLETACEAE | <i>Boletus</i> spp. |
| Viejitas | BOLETACEAE | <i>Suillus pungens</i> (Thiers & A. H. Sm.) |
| Galambos | BOLETACEAE | <i>Boletus aff. luridiformis</i> (Rostk) |
| Duraznillo, Flor de calabacita | CANTHARELLACEAE | <i>Cantharellus cibarius</i> (Fr.) |
| Clarín | CLAVARIADELPHACEAE | <i>Clavariadelphus truncatus</i> (Quel.) Donk |
| Corneta blanca | GOMPHACEAE | <i>Gomphus kauffmanii</i> (AH Sm.) Corner |
| Corneta roja | GOMPHACEAE | <i>Gomphus</i> spp. |
| Gachupines | HELVELLACEAE | <i>Helvella</i> spp. |
| Bolsita de toro/pantalones | HELVELLACEAE | <i>Gyromitra infula</i> (Schaeffer: Fries) Quélét |
| Hongo de lala/Dulce | HYGROPHORACEAE | <i>Hygrophorus</i> aff. <i>gliocyclus</i> (Fr.) |
| Escobetas | HYGROPHORACEAE | <i>Tremellodendropsis</i> aff. <i>tuberosa</i> (Grev.) Crawford |
| Terneritas | LYCOPERDACEAE | <i>Bovista</i> spp.; <i>Lycoperdon</i> spp. |
| Mazorcas | MORCHELLACEAE | <i>Morchella</i> spp. |
| Huesitos/papas | PEZIZEACEAE | <i>Sarcosphaera crassa</i> (Santi) Pouzar |
| Patita de pájaro | RAMARIACEAE | <i>Ramaria</i> spp. |
| Enchilados | RUSSULACEAE | <i>Lactarius deliciosus</i> (L.) Gray |
| Orejas | RUSSULACEAE | <i>Russula brevipes</i> (Peck) |
| Orejas azules | RUSSULACEAE | <i>Lactarius indigo</i> |
| Hongo manalco/Ardillitas | RUSSULACEAE | <i>Russula</i> spp. |

| Nombre Común | Familia | Nombre científico |
|------------------------------|------------------|---|
| Tejamanilero | TRICHOLOMATACEAE | <i>Clitocybe gibba</i> (Pers.) P. Kumm |
| Clavitos | TRICHOLOMATACEAE | <i>Lyophyllum</i> spp. |
| Canario/Picudos | TRICHOLOMATACEAE | <i>Tricholoma aff. bufonium</i> (Pers.) Gille |
| Cola de rata/clavo de bosque | TRICHOLOMATACEAE | <i>Tricholoma</i> sp. |
| Clavo de pericón | TRICHOLOMATACEAE | <i>Lyophyllum</i> sp. |
| Cuchalero | TRICHOLOMATACEAE | <i>Collybia</i> sp. |
| Corralejo/Corralito | TRICHOLOMATACEAE | <i>Laccaria laccata</i> (Scop.) Cooke |
| Galleta | TRICHOLOMATACEAE | <i>Melanoleuca aff. melaleuca</i> (Pers.:Fr.) Murr. |

Nota: La mayor parte de estas establece una asociación mutualista entre los árboles del ex Parque Nacional Nevado de Toluca.

De estas familias fúngicas registradas siete coinciden (Boletaceae, Amanitaceae, Tricholomataceae, Russulaceae, Agaricaceae, Lycoperdaceae, Morchellaceae) con las reportadas en los estudios de Zamora et al. (2007). Sin embargo, la mayoría de las familias fúngicas registradas han sido reportadas en la investigación de Estrada-Martínez et al. (2009) para cuatro mercados regionales y comunidades de Sierra Nevada. Los resultados indican la similitud de ambos ecosistemas. Para el caso particular los recolectores de Acahualco extraen todos los hongos que conocen y usan para la venta.

Los recolectores realizan búsquedas continuas durante los cuatro meses, por lo que es importante establecer medidas ecológicas. Debido a otras investigaciones, se evidencia que esporomas de hongos están disponibles de junio a octubre en Ixtlán de Juárez, Oaxaca (Garibay-Orijel et al., 2009). Por lo que, en esta temporada debe haber espacios de tiempo para regular la recolecta. La continuidad del ecosistema forestal depende de la forma de recolección de las 31 especies extraídas, ya que el 72% de los géneros son micorrízicos, tales como: *Amanita*, *Boletus*, *Cantharellus*, *Clavariadelphus*, *Ramaria*, *Russula*, *Gomphus*, *Helvella*, *Laccaria*, *Sarcosphaera*, *Lactarius*, *Tricholoma* (Medel et al., 2012; Mendoza, 2004; Pera et al., 1998; Sánchez & Mata 2012; Villarruel-Ordaz & Cifuentes, 2007), y *Hygrophorus* (Ceballos Luis, 2008). La conservación del bosque debe ser de una forma que garantice la continuidad de los hongos, debido a que Stojek et al. (2022) evidencian que la riqueza de árboles, la riqueza de especies de plantas, el pH del suelo y la propia riqueza de hongos determinan el papel esencial en la producción de esporocarpos. Así como condiciones de luz, los regímenes de precipitación y cantidad de lluvia, temperatura y humedad edáfica propios, calidad y textura del suelo, retención de agua, presencia de árboles jóvenes, salud del arbolado, la cobertura, composición y estructura arbórea son elementales básicos para la producción fúngica (Sakamoto, 2018; Velasco et al., 2010; Pinna et al. 2010; Savoie & Largeau 2011; Straatsma et al. 2001). Dicha información ofrece las bases para realizar un manejo ecológico de los hongos, pero sobre todo se deben conservar factores bióticos del bosque.

Las Figuras 2, 3 y 4 muestran las especies que extraen los recolectores durante la temporada de lluvias. De acuerdo con el conocimiento tradicional, estas especies son consideradas como hongos de agua y recomiendan que sólo se deben recolectar al principio de la temporada de lluvia.

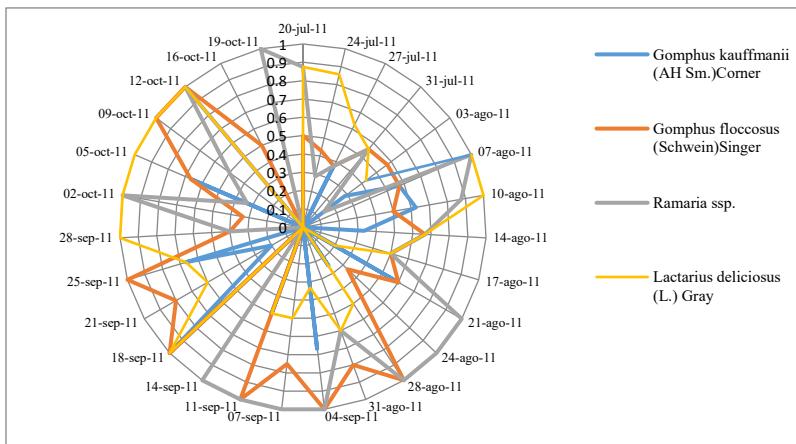


Figura 2. Calendarización de PRET en el tianguis de San Antonio Acahualco.

Figure 2. PRET calendaring at San Antonio Acahualco tianguis.

Lactarius deliciosus (enchilados) ocuparon el primer lugar en estar presentes en el tianguis. En los cuatro meses presentó tres picos máximos, dos al inicio de la temporada de hongos, con períodos del 20 al 24 de julio; luego del 7 al 10 de agosto; y el otro fue al final del ciclo (28 de septiembre al 12 de octubre) (Figura 2). En segundo lugar, está la *Ramaria* spp. (patita de pájaro) cuyo inicio de venta fue del 7 al 10 de agosto y su máxima presencia fue del 21 de agosto al 14 de septiembre (Figura 2). Para el caso de las *Gomphus* sp. (cornetas rojas) y *Gomphus kauffmannii* (cornetas blancas) el inicio de venta fue a partir del 20 y 27 de julio respectivamente, las cornetas rojas tuvieron tres picos máximos de presencia (28 de agosto al 11 de septiembre, 18 al 25 de septiembre y del 9 al 12 de octubre). Estas especies tuvieron presencia continuamente durante los cuatro meses, algunos de sus picos máximos se traslanan y otros se complementan haciendo que la actividad de extracción aparezca como continua (Figura 2).

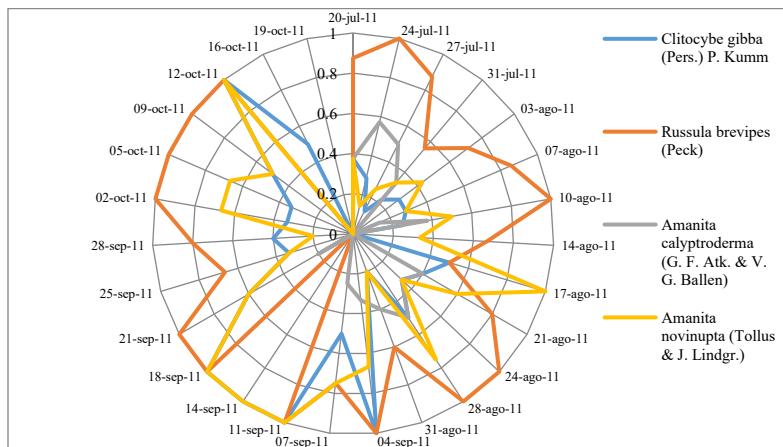


Figura 3. Presencia relativa de hongos comestibles silvestres en el tianguis

Figure 3. Relative presence in the community market of four wild edible mushrooms

Russula brevipes (orejas) fueron los hongos de mayor presencia durante los cuatro meses, solo estuvieron ausentes el 14 de septiembre (Figura 3). *Amanita calyptroderma* (tecomates) fue la especie de menor presencia y período de venta (20 de julio al 21 de septiembre). La venta de *Amanita novinupta* (mantecadas) fue de manera cíclica con 5 picos de presencia, siendo el pico de máxima venta del 7 al 18 de septiembre (Figura 3). Contrario a *Amanita calyptroderma* (tecomates) que sólo están presentes al inicio de la temporada. La presencia de *Clitocybe gibba* (tejanilero) se acentúa poco después que inicia la temporada y al final (Figura 3).

En la Figura 4, *Boletus* spp. (pancitas) su presencia fue mayor en comparación con *Helvella* spp. (gachupines), *Lyophyllum* spp. (clavitos) y *Suillus pungens* (viejitas). *Boletus* spp. presentaron dos picos máximos al inicio (20 julio al 21 agosto) y al final (18 septiembre al 12 octubre) de la temporada y un intermedio (24 agosto al 14 septiembre) con una presencia menos del 50%. *Helvella* spp. (gachupines) tuvo presencia poco después de iniciar la temporada; el 7 de agosto empezó a incrementar su presencia, para el 4 de septiembre tuvo su primer auge, del 11 al 18 de septiembre se acentuó y tuvo un último pico máximo del 9 al 12 octubre. *Suillus pungens* (viejitas) sólo estuvieron presentes al inicio de la temporada (20 julio al 10 de agosto) y *Lyophyllum* spp. (clavitos) estuvieron presentes al inicio (20 julio al 21 agosto y 28 agosto al 4 septiembre) y al final (19 octubre) de la temporada.

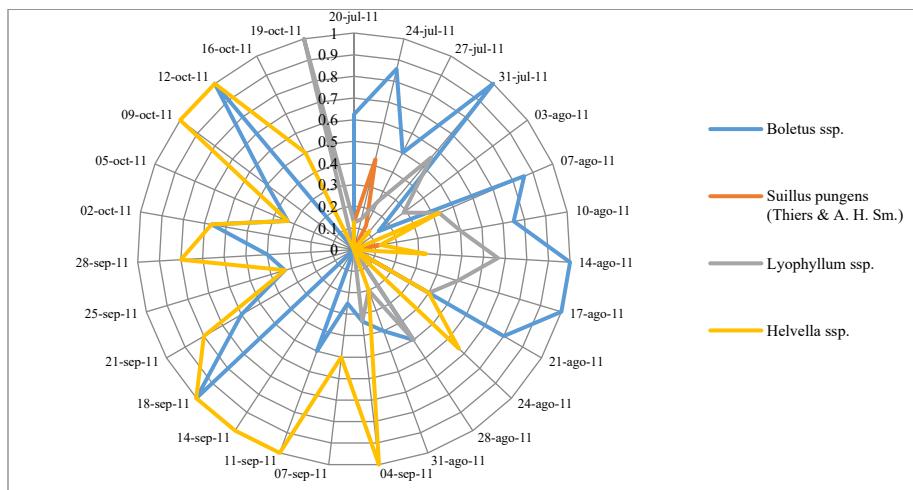


Figura 4. Presencia relativa de hongos comestibles en el tianguis
Figure 4. Relative presence in the community market of edible mushrooms

Durante cuatro meses se realiza la recolección de 12 especies descritas anteriormente, al menos siete familias fúngicas están presentes de forma continua (Gomphaceae, Ramariaceae, Russulaceae, Tricholomataceae, Amanitaceae, Boletaceae y Helvellaceae) y se encuentran disponibles para diversificar la preparación de platillos (FAO, 2011) en San Antonio Acahualco. Los informantes clave consideran a *Boletus* spp. (pancita), *Suillus pungens* (viejitas), *Lyophyllum* spp. (clavitos) como hongos de agua por su consistencia acuosa. Esto permite formular preguntas de investigación como: cuáles son las condiciones básicas del hábitat de los *Boletus* spp., *Suillus p.* y *Lyophyllum* spp. y cuál es la diferencia de hábitat con las especies de las Figuras 5, 6 y 7. Además, es importante zonificar el bosque e identificar los espacios activos en donde se manifiesta la simbiosis para programar la recolección para dar continuidad y disponibilidad de los hongos comestibles silvestres.

Por el comportamiento de aparición de las especies en el tianguis se deduce que el resto de las 19 especies la fructificación es lenta, porque requieren de condiciones de acumulación de humedad, temperatura y descomposición de materia orgánica. Hombres y mujeres expresaron las características del hábitat de los hongos de la siguiente manera: “*las hierbas son la cobija de los hongos, el abono es la hojarasca de los árboles y el suelo tiene que estar húmedo para que brote el hongo*”. Este conocimiento tradicional coincide con la ciencia, debido a que las condiciones bióticas y abióticas determinan el ciclo de hongos. En otras palabras, la cantidad de lluvia, temperatura, árboles jóvenes, por cantidad de la producción de carbohidratos, pH y textura del suelo o retención de agua (Sakamoto 2018; Velasco *et al.*, 2010; Pinna *et al.*, 2010b; Savoie & Largeau, 2011; Straatsma *et al.* 2001).

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran las especies que anuncian el término de la temporada de los hongos de agua, y el final de la comercialización de éstos en el tianguis de Acahualco. Los siguientes hongos son identifican como hongo de aire y de hielo.

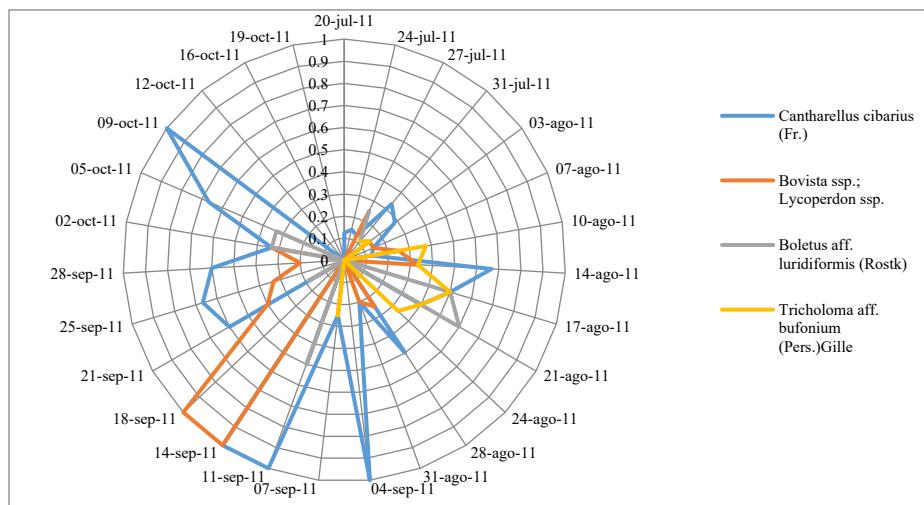


Figura 5. Calendarización de la presencia relativa de los hongos silvestres en el tianguis
Figure 5. Scheduling of the relative presence in the community market of wild mushrooms

Cantharellus cibarius (duraznillo): el 14 de agosto empezó a incrementar su presencia y tuvo tres picos máximos (4 septiembre, 11 al 14 septiembre y 9 octubre) (Figura 5). Para el caso de *Bovista* spp. y *Lycoperdon* spp. (terneritas) sólo tuvieron un punto de auge (14 al 18 septiembre). El *Boletus* aff. *luridiformis* (galambos) y *Tricholoma* aff. *bafoninum* (canarios o picudos) su presencia fue relativamente baja, por lo que es importante realizar trabajo de campo para identificar los motivos de su disponibilidad.

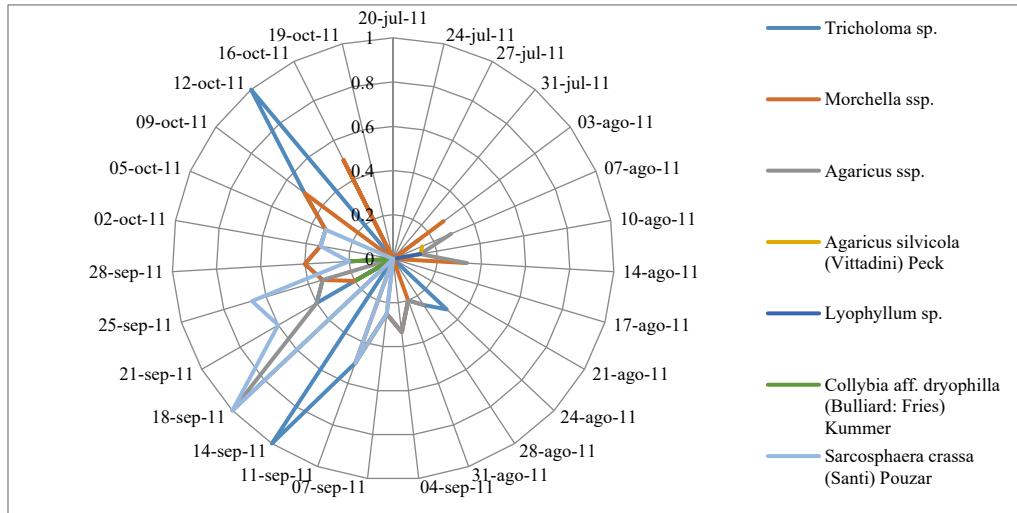


Figura 6. Presencia de siete especies en el tianguis de Acahualco
Figure 6. Presence of seven species in the community market of Acahualco

Tricholoma sp. (cola de rata/clavo de bosque) alcanzó dos puntos máximos (14 septiembre y 12 octubre) y *Sarcosphaera crassa* (huesitos/papas) logró un punto máximo (18 septiembre) ocupando el primer y segundo lugar con mayor presencia en el tianguis, esto permite cuestionar si la población es mayor en comparación *Morchella* spp. (mazorca), *Agaricus* spp. (pipila), *Agaricus silvicola* (champiñón de monte), *Lyophyllum* spp. (clavitos) y *Lyophyllum* sp. (clavitos de pericón). Así como cuestionar si están bajo alguna categoría de presión (Figura 6).

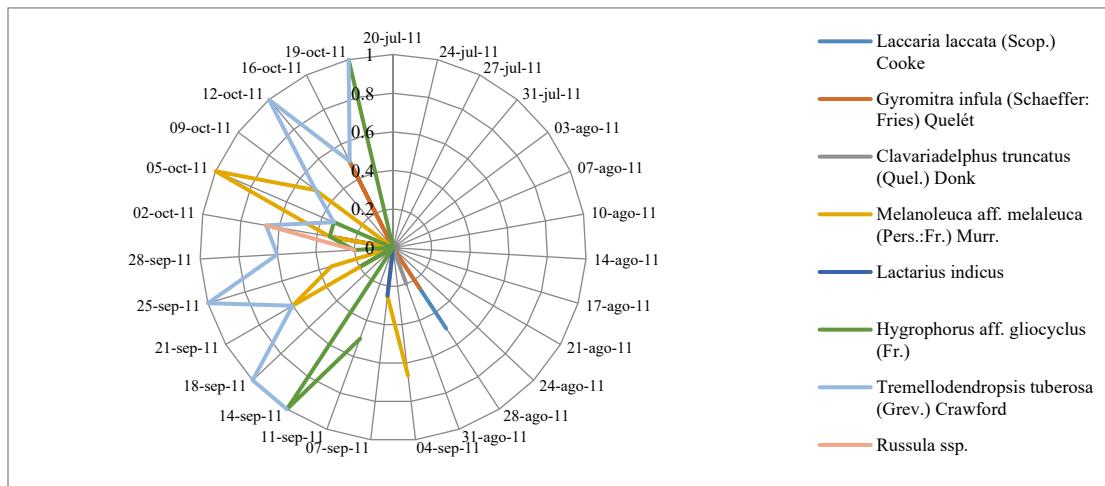


Figura 7. Presencia de ocho especies en el tianguis de Acahualco
Figure 7. Presence of eight species in the community market of Acahualco

La Figura 7 muestra que sólo tres de las ocho especies de hielo (*T. tuberosa*, *H. aff. gliocyclus* y *M. aff. melaleuca*) tienen mayor presencia en el tianguis. Solo son comercializadas durante 2 meses (septiembre y octubre), no hay venta de ellos fuera de este período. Las especies de menor presencia como *L. laccata*, *G. infula*, *C. truncatus*, *L. indicus* y *Russula* spp. permiten cuestionar que está pasando con su población, así como el estado de conservación del bosque de Acahualco. El comportamiento de los consumidores, las necesidades y el nivel económico de los recolectores, así como la presencia/cantidad de los hongos durante los cuatro meses son la clave para establecer estrategias de conservación del hábitat de hongos; por lo que se debe recurrir al método científico y al conocimiento etnomicológico para establecer reglas de recolección del hongo, conservando elementos bióticos y abióticos del bosque, estos serían la conservación de la textura del suelo, evitar el transito continuo, mantener las condiciones de sombra, luz y retención de agua, reforestar en claros talados y con especies forestales locales, debido a que la presencia de árboles jóvenes, salud del arbolado, la cobertura, composición y estructura arbórea son elementales básicos para la producción de los hongos. Además, los árboles permiten los régimenes de precipitación y cantidad de lluvia, temperatura y humedad edáfica propia, calidad y textura del suelo. En cuanto la aportación del conocimiento tradicional y la dinámica del consumo/venta de los hongos, es el aporte de las dos tablas y seis Figuras; en estas últimas se respetó el orden de presencia de las especies en el tianguis de Acahualco con el objetivo de que sean consideradas en la sustentación de la fenología de éstas en futuras investigaciones de conservación y manejo.

Los estudios etnomicológicos permiten conocer las formas en que se generan, transmiten y evolucionan los conocimientos micológicos tradicionales, además de analizar las formas de apropiación de los recursos por parte de las comunidades humanas y generar información que pueden ser útiles en el desarrollo de proyectos, en donde el conocimiento tradicional aporta alternativas de producción, utilización y manejo tanto rural como industrial de los macromicetos (Salinas-Rodríguez *et al.*, 2017; Estrada-Martínez *et al.*, 2009).

CONCLUSIONES

San Antonio Acahualco ha dejado de ser un pueblo Otomí, pero aún hay vestigios de la herencia cultural de los hongos comestibles silvestre. Se identificaron dos grupos de recolectores de hongos, uno posee el conocimiento tradicional, por lo que conocen las características del hábitat de los hongos y bajo este conocimiento tienen técnicas de recolección que conservan la disponibilidad de los hongos, además de que están preocupados del futuro del bosque. El segundo grupo, no posee el conocimiento tradicional y representan el 60% de los recolectores, su colecta

es de forma continua y extraen todos los hongos comestibles. Los hombres y mujeres que recolectan hongos comestibles para la venta lo hacen con el fin de contribuir al sustento familiar, sin embargo, están extrayendo todos los hongos comestibles de importancia cultural. La forma de extracción es continua durante julio a octubre (evidenciada por el PRET). Sin embargo, los recolectores con escasos recursos sólo toman lo necesario para subsistir. De alguna forma han observado que solo se debe tomar cantidades básicas para dar continuidad a la diversidad alimenticia de su propio entorno.

LITERATURA CITADA

- Aguilar Cuevas A. Y. (2012). *Inoculación de Morchella esculenta y Pisolithus tinctorius en Fraxinus uhdei (Wenzig) Lingelsh (1907)*. <https://cdigital.uv.mx/search?spc.page=1&query=Aguilar%20Cuevas%20A.%20Y.%20202012>
- Alday, J. G., Martínez de Aragón, J., de-Miguel, S., & Bonet, J. A. (2017). Mushroom biomass and diversity are driven by different spatio-temporal scales along Mediterranean elevation gradients. *Scientific Reports*, 7(1), 45824. <https://doi.org/10.1038/srep45824>
- Burrola-Aguilar, C., Montiel, O., Garibay-Orijel, R., & Zizumbo-Villarreal, L. (2012). *Traditional knowledge and use of wild edible mushrooms in the region of Amanalco, State of Mexico* (Vol. 35).
- Carr, M., & Biggs, S. (2008). *Gender and non-timber forest products Promoting food security and economic empowerment The following people reviewed the content: Rama Rao and Bhargavi Motukuri (International Network for Bamboo and Rattan), Kate Schreckenberg (Overseas Development Institute), Nazneen Kanji (Aga Khan Development Network), Sophie Grouwels (Food and Agriculture Organization of the United Nations)*.
- Ceballos Luis. (2008). *Hongos del Arboreto y del monte Abantes*. <https://es.scribd.com/doc/196007369/Cuaderno-de-Hongos-Reducido>
- Cifuentes Blanco J., Villegas R. M., P.-R. L. (1986). Hongos. In C. F. In Lot, A. (Ed.), *Manual de herbario* (CNF. A. C.).
- Contreras Cortés Leonardo Ernesto Ulises, L., Vázquez García, A., & Ruan-Soto, F. (2018). Ethnomycology and mushroom selling in a market from Northwest Puebla, México. *Scientia Fungorum*, 47, 47.
- Dubovoy Celia. (2012). 1968 conocimiento de los hongos en el México antiguo. *Etnobiología*, 10(1), 82–84.
- Egli, S., Peter, M., Buser, C., Stahel, W., & Ayer, F. (2006). Mushroom picking does not impair future harvests - Results of a long-term study in Switzerland. *Biological Conservation*, 129(2), 271–276. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.10.042>
- Bello-Cervantes, E. B.-C., Metrio, A. C.-, Montoya, A., Trejo, I., & Blanco, J. C. (2021). Variation of Ethnomycological Knowledge in a Community from Central Mexico. *Journal of Fungal Diversity*, 1(1), 6–26. <https://doi.org/10.14302/issn.2766-869X.jfd-19-2718>
- Estrada-Flores, J. G., Martínez-Hernández, J., Valdés-Piña, M. G., Arriaga-Jordán, C. M., & Albarrán-Portillo, B. (2019). Recolección de hongos comestibles silvestres en el contexto del pastoreo de alta montaña en la localidad de Agua Blanca en el Nevado de Toluca, México. *Agro Productividad*, 12(5). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1399>
- Estrada-Martínez Emma, Guzmán Gastón, Cibrián Tovar David, & Ortega Paczka Rafael. (2009). Contribución al conocimiento etnomicológico de los hongos comestibles silvestres de mercados regionales y comunidades de la Sierra Nevada (México). *Interciencia*, 34(1), 25–33. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33934104.pdf>
- FAO. (2011). *Los bosques para una mejor nutrición y seguridad alimentaria*. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dcc042e3-0e68-42ad-8cbe-fb016ed9e0ec/content#:~:text=Los%20bosques%20as%C3%AD%20como%20los,frutos%2C%20nueces%20y%20hojas%20comestibles>
- Fontúrbel, F. E., Betancurt-Grisales, J. F., Vargas-Daza, A. M., & Castaño-Villa, G. J. (2022). Effects of habitat degradation on bird functional diversity: A field test in the Valdivian rainforest. *Forest Ecology and Management*, 522, 120466. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120466>

- García Santiago William. (2014). *Hongos silvestres comestibles: su papel en los esquemas alimentarios de los pobladores de Oxchuc Chiapas, México*. [Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural]. El Colegio de la Frontera Sur.
- Garibay-Orijel, R., Martínez-Ramos, M., & Cifuentes, J. (2009). Disponibilidad de esporomas de hongos comestibles en los bosques de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80(002). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2009.002.615>
- INEGI. (2020). *Censos de Población y Vivienda*. <https://www.inegi.org.mx/>
- Joekes, S., Green, C., & Leach, M. (1996). *Integrating Gender into Environmental Research and Policy*. https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Integrating+Gender+into+Environmental+Research+and+Policy+&btnG=
- Leonard, P., & Evans, S. (1997). A scientific approach to a policy on commercial collecting of wild fungi. *Mycologist*, 11(2), 89–91. [https://doi.org/10.1016/S0269-915X\(97\)80047-X](https://doi.org/10.1016/S0269-915X(97)80047-X)
- López-García, A., Pérez-Moreno, J., Jiménez-Ruiz, M., Ojeda-Trejo, E., Delgadillo-Martínez, J., & Hernández-Santiago, F. (2020). Conocimiento tradicional de hongos de importancia biocultural en siete comunidades de la región chinanteca del estado de Oaxaca, México. *Scientia Fungorum*, 50, e1280. <https://doi.org/10.33885/sf.2020.50.1280>
- Mariaca Méndez Ramón, Silva Pérez Luz del Carmen, & Castaños Montes Carlos Alberto. (2001). Proceso de recolección y comercialización de hongos comestibles silvestres en el Valle de Toluca, México. *Ciencia Ergo Sum*, 8(1), 30–40. <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/7932/6505>
- Medel, R., Baeza, Y., Mata, G., & Trejo, D. (2012). Ascomicetos ectomicorrízicos del Parque Nacional Cofre de Perote, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Micología*, 35, 43–47.
- Mendoza Díaz, Ma. M. (2004). *Determinación de los hongos asociados con encinos y su importancia ecológica en la porción noroeste de la sierra de Pachuca, Hidalgo*.
- Mwangi, E., Meinzen-Dick, R., & Sun, Y. (2009). *Does Gender Influence Forestry Management? Exploring Cases from East Africa and Latin America*. <http://www.cid.harvard.edu/cidwp/grad/040.html>.
- PDM. (2022). *Plan de Desarrollo Municipal 2022-2024 del Honorable Ayuntamiento de Zinacantepec*. <https://zinacantepec.gob.mx/pdf/Plan%20Definitivo.pdf>
- Pera, J., Alvarez, I. F., & Parlade, J. (1998). Eficacia del inoculo micelial de 17 especies de hongos ectomicorrícos para la micorrización controlada de: *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pseudotsuga menziesii*, en contenedor. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 7(1 y 2), 139-153
- Perete Lara, J., & Velazquez, A. L. (2023). Micofagia como alimento base de la gastronomía tradicional en Xalatlaco, Estado de México. *ÁNFORA*, 30(55), 201–226. <https://doi.org/10.30854/anf.v30.n55.2023.943>
- Pinna, S., Gévry, M.-F., Côté, M., & Sirois, L. (2010a). Factors influencing fructification phenology of edible mushrooms in a boreal mixed forest of Eastern Canada. *Forest Ecology and Management*, 260(3), 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.04.024>
- Rodríguez-Muñoz, G., Martelo, E. Z., & Martínez-Corona, B. (2010). *Mujeres y hombres: manejo de recursos del bosque Santa Catarina del Monte, Estado de México*. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ed.)
- Ruiz-Almenara, C., Gándara, E., & Gómez-Hernández, M. (2019). Comparison of diversity and composition of macrofungal species between intensive mushroom harvesting and non-harvesting areas in Oaxaca, Mexico. *PeerJ*, 7, e8325. <https://doi.org/10.7717/peerj.8325>
- Sakamoto, Y. (2018). Influences of environmental factors on fruiting body induction, development and maturation in mushroom-forming fungi. *Fungal Biology Reviews*, 32(4), 236–248. <https://doi.org/10.1016/j.fbr.2018.02.003>
- Salinas-Rodríguez Mariela, Gómez-Reyes Víctor Manuel, & Blanco García Arnulfo. (2017). Conocimiento tradicional de los hongos silvestres comestibles y venenosos de dos localidades del municipio de Pátzcuaro, Michoacán. *Biológicas*, 19(1), 28–34.
- Sánchez Vázquez, J. E., & Mata, G. (2013). *Hongos comestibles y medicinales en Iberoamérica: investigación y desarrollo en un entorno multicultural*.

Recibido:
18/junio/2024

Aceptado:
06/enero/2025

- Savoie, J.-M., & Largeteau, M. L. (2011). Production of edible mushrooms in forests: trends in development of a mycosilviculture. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 89(4), 971–979. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-3022-4>
- Servín Campuzano, L. S., & Alarcón-Cháires, P. E. (2018). Conocimiento tradicional de los hongos silvestres comestibles en la comunidad p'urhépecha de Comachuén, Nahuatzen, Michoacán. *Acta Universitaria*, 28(1), 15–29. <https://doi.org/10.15174/au.2018.1277>
- Signorini, M. A., Piredda, M., & Bruschi, P. (2009). Plants and traditional knowledge: An ethnobotanical investigation on Monte Ortobene (Nuoro, Sardinia). *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 5(1), 6. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-5-6>
- Stojek, K., Gillerot, L., & Jaroszewicz, B. (2022). Predictors of mushroom production in the European temperate mixed deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, 522, 120451. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120451>
- Straatsma, G., Ayer, F., & Egli, S. (2001). Species richness, abundance, and phenology of fungal fruit bodies over 21 years in a Swiss forest plot. *Mycological Research*, 105(5), 515–523. <https://doi.org/10.1017/S0953756201004154>
- Velasco Bautista, E., Zamora-Martínez, M. C., Nieto De Pascual Pola, C., Iroel Martínez-Valdez, J., & Montoya, A. (2010). Modelos predictivos de la producción de hongos silvestres comestibles en bosques de coníferas, Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 95–104.
- Villarruel-Ordaz José Luis, & Cifuentes Blanco Joaquín. (2007). Macromicetos de la Cuenca del Río Magdalena y zonas adyacentes, Delegación la Magdalena Contreras, México, D. F. *Revista Mexicana de Micología*, 25, 59–68.
- Zamora Equihua, V., Gómez Peralta, M., Marrufo, G. V., Del Pilar, M., & Torres, A. (2007). Conocimiento etnomicológico de hongos silvestres comestibles registrados para la zona de Tancítaro, Michoacán. In *Biológicas* (Issue 9).

Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

ESTUDIO DESCRIPTIVO SOBRE EL USO DE PLANTAS ANTIINFLAMATORIAS PARA TRASTORNOS MENSTRUALES EN MUJERES RESIDENTES EN TRUJILLO, LA LIBERTAD, PERÚ

DESCRIPTIVE STUDY ON THE USE OF ANTI-INFLAMMATORY PLANTS FOR MENSTRUAL DISORDERS IN WOMEN RESIDENTS IN TRUJILLO, LA LIBERTAD, PERU

Santamaría Balarezo, A.E., C.A. Pérez-Pérez, H.E. Cavero Parra, J.E. Paz López y J.S. Guillén Sánchez

**ESTUDIO DESCRIPTIVO SOBRE EL USO DE PLANTAS ANTIINFLAMATORIAS
PARA TRASTORNOS MENSTRUALES EN MUJERES RESIDENTES EN TRUJILLO,
LA LIBERTAD, PERÚ**

**DESCRIPTIVE STUDY ON THE USE OF ANTI-INFLAMMATORY PLANTS FOR
MENSTRUAL DISORDERS IN WOMEN RESIDENTS IN TRUJILLO, LA LIBERTAD,
PERU**



Estudio descriptivo sobre el uso de plantas antiinflamatorias para trastornos menstruales en mujeres residentes en Trujillo, La Libertad, Perú**Descriptive study on the use of anti-inflammatory plants for menstrual disorders in women residents in Trujillo, La Libertad, Peru**

Alisson Esthefany Santamaría
Balarezo, Carlos Alberto
Pérez-Pérez, Hevi Elise Cavero
Parra, Jhonler Estalin Paz
López y Jhoseline Stayce
Guillén Sánchez

**ESTUDIO DESCRIPTIVO
SOBRE EL USO DE
PLANTAS
ANTIINFLAMATORIAS
PARA TRASTORNOS
MENSTRUALES EN
MUJERES RESIDENTES EN
TRUJILLO, LA LIBERTAD,
PERÚ**

**DESCRIPTIVE STUDY ON
THE USE OF ANTI-
INFLAMMATORY PLANTS
FOR MENSTRUAL
DISORDERS IN WOMEN
RESIDENTS IN TRUJILLO,
LA LIBERTAD, PERU**

POLIBOTÁNICA
Instituto Politécnico Nacional

Núm. 59: 347-359. Enero 2025

DOI:
[10.18387/polibotanica.59.22](https://doi.org/10.18387/polibotanica.59.22)

Alisson Esthefany Santamaría-Balarezo <https://orcid.org/0000-0003-3322-5786>

Carlos Alberto, Pérez-Pérez <https://orcid.org/0000-0003-3018-0690>

Hevi Elise Cavero-Parra <https://orcid.org/0000-0002-1898-6328>

Jhonler Estalin Paz-López <https://orcid.org/0000-0002-2474-5686>

*Facultad de Ciencias de la Salud, Escuela de Medicina, Universidad César Vallejo,
Trujillo 13007, Perú*

Jhoseline Stayce Guillén-Sánchez. Autora de correspondencia:

jhoselineguillen@gmail.com / <https://orcid.org/0000-0002-0899-6725>

*Programa de Investigación Formativa e Integridad Científica, Universidad César
Vallejo, Trujillo 13007, Perú*

RESUMEN: En el Perú existen más de veinte mil especies con cualidades medicinales que abarcan actividades antiinflamatorias, antimicrobianas y antioxidantes. Estas plantas pueden ser adquiridas fácilmente por su bajo costo y sus efectos positivos para el tratamiento de algunas dolencias físicas. El objetivo de este estudio fue describir el uso de plantas antiinflamatorias para trastornos menstruales en mujeres peruanas procedentes de la región costa, sierra y selva. Los datos fueron recolectados a partir de una encuesta aplicada a 100 personas con participación voluntaria, midiendo variables como características demográficas, tipo de planta utilizada, compra y uso reportado a nivel personal y familiar. Se registró que el ingreso familiar de la mayoría de las mujeres estuvo por debajo del salario mínimo, y que las procedentes de la región costa y sierra son las que más utilizan plantas antiinflamatorias para aliviar los trastornos de la menstruación. Además, existió una correlación positiva baja ($\rho = 0.213$, $p < 0.05$) entre el grado de formación y la compra de las plantas antiinflamatorias para su uso en dicho evento ginecológico. En conclusión, las plantas antiinflamatorias más utilizadas son la manzanilla y el orégano.

Palabras clave: Mujer, trastornos menstruales, plantas antiinflamatorias, uso tradicional.

ABSTRACT: In Peru there are more than twenty thousand species with medicinal qualities that include anti-inflammatory, antimicrobial and antioxidant activities. These plants can be easily acquired due to their low cost and their positive effects for the treatment of some physical ailments. The objective of this study was to describe the use of anti-inflammatory plants for menstrual disorders in Peruvian women from the coastal, mountain and jungle regions. The data was collected from a survey administered to 100 people with voluntary participation, measuring variables such as demographic characteristics, type of plant used, purchase and reported use at a personal and family level. It was recorded that the family income of the majority of the women was below the minimum wage, and that those from the coastal and mountain regions are the ones who most use anti-inflammatory plants to relieve menstruation disorders. Furthermore, there was a low positive correlation ($\rho = 0.213$, $p < 0.05$) between the degree of training and the purchase of anti-inflammatory plants for use in said gynecological event. In conclusion, the most used anti-inflammatory plants are chamomile and oregano.

Key words: Women, menstrual disorders, anti-inflammatory plants, traditional use.

INTRODUCCIÓN

El procedimiento de la medicina natural se fundamenta en el empleo de hierbas o plantas medicinales con la finalidad de reemplazar fármacos tales como las pastillas, para la rehabilitación de afecciones que aquejan a las personas. Las sustancias de las plantas se utilizan en diferentes preparaciones para mejorar la salud; según investigaciones ejecutadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), se consideran medicamentos herbolarios a las infusiones, insumos y material herbario que implican como sustancias activas fragmentos esenciales de plantas u otros componentes vegetales, así como también la mezcla de estos componentes, por lo que su uso está fijado y distinguido como eficiente. Los medicamentos herbolarios se usan desde tiempos pasados para sanar o mitigar dolencias, dando lugar a los fitofármacos, y es apreciado por los precios accesibles que tiene y la baja toxicidad que maneja en comparación con los productos sintéticos (Gallegos, 2016).

Actualmente, existe una gran atención por la medicina tradicional y dentro de este grupo se encuentra las plantas medicinales que han ocasionado abundantes indagaciones siendo difundidas en medios de comunicación masiva. Sin embargo, hay un mínimo uso de fármacos de origen vegetal por parte del profesional sanitario; ya que sus prescripciones están radicadas solo en fármacos sintéticos, hasta para una enfermedad considerada como padecimiento leve. En esta línea, las personas del sexo femenino pueden estar expuestas a afecciones asociadas con el sobrepeso, enfermedades de su sistema reproductivo, con el alumbramiento y sus períodos menstruales; los cuales no solo perjudican su bienestar, sino que también ponen en peligro sus vidas (Theuser *et al.*, 2022; Vega *et al.*, 2016). Los trastornos menstruales afectan a la mayoría de las mujeres y principalmente entre las edades de 12 a 17 años porque están íntimamente relacionados con procesos implicados en el desarrollo. Durante la pubertad, el ciclo menstrual posterior a la primera regla suele ser muy irregular, por lo que distinguir qué es normal y qué no lo es, puede considerarse un desafío. En edades posteriores, la magnitud de los trastornos menstruales se reduce gradualmente entre el cuarto y quinto año después del primer período menstrual, aunque persisten en aproximadamente el 20% de las pacientes que requieren diagnóstico y tratamiento (Serret *et al.*, 2012).

Gran porcentaje de plantas medicinales se utilizan para tratar los problemas que trae la menstruación y que muchas veces están acompañadas de cólicos que reducen la capacidad para que la mujer ejerza sus labores normales. Este problema al ser estimado de baja importancia, ocasiona que las mujeres no acudan a un centro de salud y como solución para los síntomas y signos recurren a lo que son las plantas medicinales para disminuir el dolor, además de considerar que son una solución económica o viable. Algunos de los tipos de plantas de las que se hace uso para tratar cólicos menstruales son el ajenjo (*Artemisia absinthium*), zaragoza (*Glycyrrhiza glabra*), mastranto (*Lippia alba*), toronjil (*Melissa officinalis*) y la canela (*Cinnamomum zeylanicum*). De toda esta lista descrita, solo se utilizan las hojas, a excepción de la canela que se emplea la cáscara para preparar infusiones que serán administradas por vía oral (Ascanio *et al.*, 2023; Sánchez-Prieto *et al.*, 2023).

En el Perú, las mujeres consumen plantas antiinflamatorias en forma de infusión, jarabe y/o extracto, para aliviar malestares físicos, sin embargo, el tipo de planta utilizada depende de la región donde residan, edad, educación, entre otros factores socioculturales (Cachay & Vásquez, 2023). Por ejemplo, en un estudio realizado en la sierra, distrito de Jaén, Cajamarca, comprobó que los pobladores utilizan plantas medicinales de la familia Asteráceas (12%) y Fabáceas (8.5%) para tratar enfermedades infecciosas y bacterianas, siendo recolectadas de manera silvestre como hierba (44.5%). La forma de preparación más predominante fue la infusión (26.21%) y las hojas fueron las estructuras más utilizadas (40.71%) (Peña & Cruz, 2024). Entre las Asteráceas se encuentran la valeriana, que combate el dolor de cabeza, anís serrano, que es antidiarreico, y vira, que actúa como desinflamante de ovario. En la costa, se encuentra la cola de caballo y el ajenjo, que son utilizadas por sus efectos desinflamantes y antidiarreicas, respectivamente, y se usa toda la planta para infusión, a excepción de la manzanilla que solo se usan sus flores y hojas (De La Cruz-Castillo *et al.*, 2024).

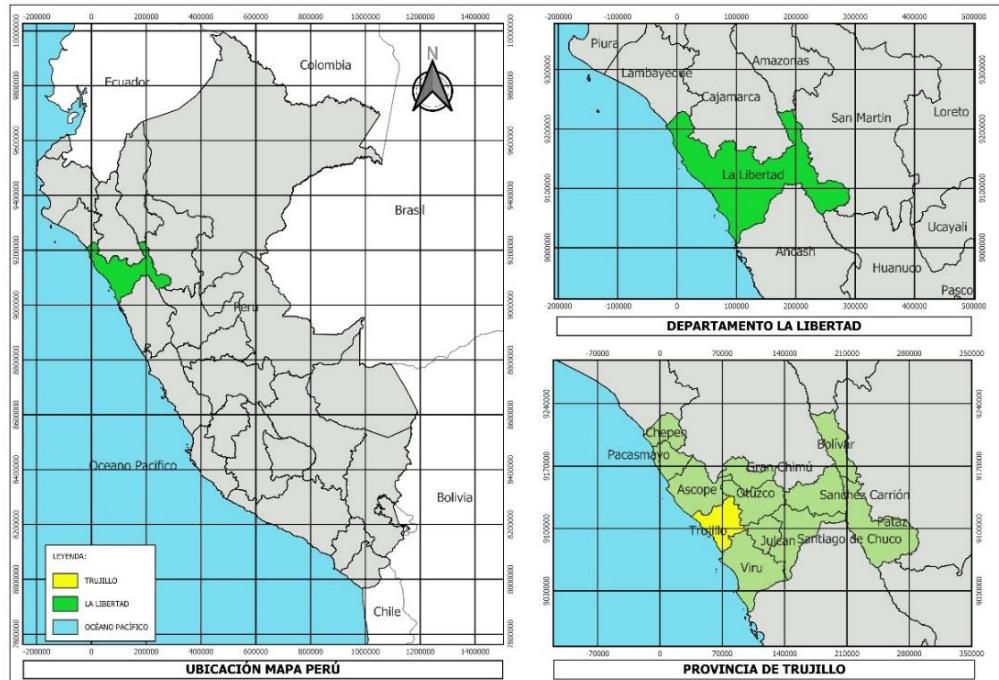
Bazán-Castillo *et al.* (2023), determinaron la etnobotánica de las plantas medicinales expendidas en un centro de abastos de Lima, Perú. La investigación mostró que la mayoría de plantas compradas eran utilizadas para la gastritis (n=216), inflamación de ovarios (n=127) e infección a

las vías urinarias (n=90). Adicionalmente, las plantas más usadas para tratar problemas respiratorios, principalmente, bronquitis, asma y gripe, fueron la huamapinta, eucalipto y matico, respectivamente, lo que puede ser consistente con el clima de la ciudad, ya que al presentar una humedad relativa alta (83%-100%), sus habitantes tienen más propensión de sufrir este tipo de afecciones (Álvarez, 2014). Por otro lado, en la selva las plantas más utilizadas para la dismenorrea son las hojas de guayaba y achiote, por su acción antiespasmódica y antinflamatoria (De La Cruz-Castillo *et al.*, 2024).

En este contexto, el estudio de las plantas medicinales no se limita al enfoque botánico; también se debe considerar los aspectos culturales que han dado lugar a la obtención de estos conocimientos; su uso depende del conocimiento científico y la experiencia ancestral o familiar. Es importante destacar que la comprensión cultural de la herbolaria terapéutica debe ser centro de investigación, para que así el enfoque cualitativo pueda respaldar de cualquier forma las interpretaciones subjetivas. En base a lo expuesto, se puede sugerir que las plantas medicinales en aspectos ginecológicos son muy importantes debido a sus propiedades curativas, ya que más de la mitad de las personas conocen los beneficios de su empleo, lo que las convierte en una opción efectiva para prevenir y tratar algunas enfermedades que afectan a las mujeres; dando así un resultado positivo a las personas que lo utilizan para los trastornos menstruales (Ascanio *et al.*, 2023). En un análisis realizado por Crisostomo y Quispe (2023) en 250 personas se evidenció que las plantas medicinales eran usadas con regularidad para el tratamiento de problemas gastrointestinales como la indigestión (26.8%), cólicos estomacales (20.4%), úlceras (15.6%), gases (12.8%), vómitos (10.8%), diarrea (7.6%), por último, dolor abdominal (6%). Además, se encontró un gran consumo de estas plantas en personas de atención terciaria, las cuales expresan su interés por que el médico conozca, utilice y recete medicinas a base de hierbas como tratamiento (Cuyás-Hernández, 2016); lo cual puede ser muy favorable si se considera que los fitoquímicos presentes en estas plantas son flavonas, flavonoides, isoflavonas, cumarinas y alcaloides, de los cuales se tiene evidencia científica que son antiinflamatorios, anticancerígenos y antioxidantes (Ascanio *et al.*, 2023). Finalmente, el objetivo de la presente investigación es identificar las plantas más utilizadas por las mujeres peruanas para trastornos menstruales procedentes de diferentes regiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la ciudad de Trujillo, La Libertad, Perú. Ubicada en el litoral costero a los 8°00'30" y 8°08'30" L. S. y los 80°50'00" y 79°15'00" L. O., de climas áridos y semicálidos, y con temperaturas entre 22.7°C y 15.8°C (Figura 1).

**Figura 1.** Área de estudio**Figure 1.** Study area

La investigación fue tipo básica con enfoque cualitativo y de nivel descriptivo, que permitió comprender la realidad de las mujeres en cuanto al uso de plantas con actividad antiinflamatoria para tratar los síntomas de la menstruación. La muestra fue obtenida bajo un muestreo no probabilístico y estuvo conformada por 100 mujeres con participación voluntaria entre 15 y 50 años que residen actualmente en la ciudad de Trujillo, La Libertad. La información fue recolectada entre los meses de noviembre-diciembre del 2023 a través de la técnica encuesta cuyo cuestionario fue elaborado vía formulario Google y estuvo conformado por diez preguntas que recogía información de aspectos socioculturales y económicos, como región de procedencia, grado de formación (egresados: personas que han culminado la universidad, estudiantes universitarios; mujeres que se encuentran cursando la universidad al momento de la recolección de datos, y estudiantes de secundaria: mujeres que se encuentran cursando el cuarto y quinto año de educación secundaria), ingreso familiar mensual, acceso a internet, y conocimiento de uso dentro del entorno, las respuestas que involucran la variable “uso de plantas antiinflamatorias” contra los dolores menstruales fueron categorizadas en “siempre”, “a veces” y “nunca”. La validez del instrumento se realizó por juicio de expertos los cuales pertenecían a las áreas de ciencias de la salud e ingeniería, expertos en la línea de investigación, quienes sugirieron algunos ajustes según la naturaleza del estudio. El valor obtenido fue de 0.96, lo que implica una “validez muy buena”. El análisis estadístico se hizo a través del paquete estadístico para ciencias sociales (SPSS) versión 26 (IBM Corp., Armonk, NY, EE. UU.) utilizando medidas descriptivas e inferenciales para interpretación y correlación de las variables categóricas, respectivamente. Se consideró significación estadística a un valor de p inferior a 0.05. La investigación se siguió acorde a los lineamientos establecidos por el código de ética de la Universidad César Vallejo mediante Resolución de Consejo Universitario N°0126-2017-UCV.

RESULTADOS

La tabla 1 muestra las principales características de la muestra en estudio. Las participantes en su mayoría eran graduadas, provenían de la región sierra y su ingreso familiar era menor al salario mínimo establecido por el gobierno peruano. El 77.78% de las mujeres egresadas de nivel de educación superior universitaria mencionaron haber utilizado plantas antiinflamatorias entre “a veces” y “siempre” para abordar los trastornos menstruales en comparación con las estudiantes universitarias que sólo el 54.28% afirma utilizarlas (Figura 2); adicionalmente, el 72% asegura que al menos una mujer dentro de su entorno familiar ha utilizado este tipo de plantas. En los resultados se destaca que, en comparación con otras regiones, la comunidad de la selva muestra una mayor propensión a incorporar estas plantas en sus prácticas tradicionales para tratar los trastornos menstruales. Este patrón podría estar vinculado a factores ambientales, culturales o incluso a la disponibilidad de ciertas especies vegetales en estas áreas específicas, lo que sugiere una posible adaptación de las prácticas medicinales a las condiciones particulares de cada región. Por otro lado, el 34% de encuestadas refiere que “siempre” tienen acceso internet lo cual puede propiciar la información necesaria sobre el uso de estas plantas como medicina tradicional. Generalmente existe una marcada disparidad entre ambos grupos de mujeres, ya que las estudiantes al tener un acceso considerablemente mayor a internet en comparación con los graduados que se dedican al ámbito laboral, son influenciadas en el uso. Los medios de comunicación actúan como facilitadores para la adquisición de conocimientos relacionados con las propiedades beneficiosas de ciertas plantas.

En la figura 3, muestra las respuestas de las participantes ante las preguntas: ¿Con qué frecuencia usa plantas antiinflamatorias para los trastornos menstruales? y ¿Con qué frecuencia compra las plantas antiinflamatorias para tratar los trastornos menstruales? El 44.1% de las mujeres procedentes de la región costa refieren que “siempre” compran las plantas antiinflamatorias a diferencia del 32.4% 23.4% de la sierra y selva, respectivamente. Solo el 25.7% de las mujeres de la selva reportaron “nunca” comprarlas. Con respecto al uso, la mayoría de mujeres de la sierra (42.3%) y costa (33.3%) utilizan estas plantas reflejadas en categorías de “siempre” y “a veces”, respectivamente.

Tabla 1. Características del grupo de estudio
Table 1. Characteristics of the study group

| Características | Categorías | Frecuencia relativa hi (%) |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Región | Costa | 36 |
| | Sierra | 37 |
| | Selva | 27 |
| Grado de formación | Egresados | 36 |
| | Estudiantes universitarios | 35 |
| | Estudiantes de secundaria | 29 |
| Ingreso familiar | 1025 soles | 30 |
| | Menos de 1025 soles | 43 |
| | Más de 1025 soles | 27 |
| Fuente de información | Acceso a internet | |
| | Siempre | 34 |
| | A veces | 40 |
| | Nunca | 26 |
| Conocimiento (uso dentro del entorno) | | |
| Siempre | | 40 |
| A veces | | 32 |
| Nunca | | 28 |

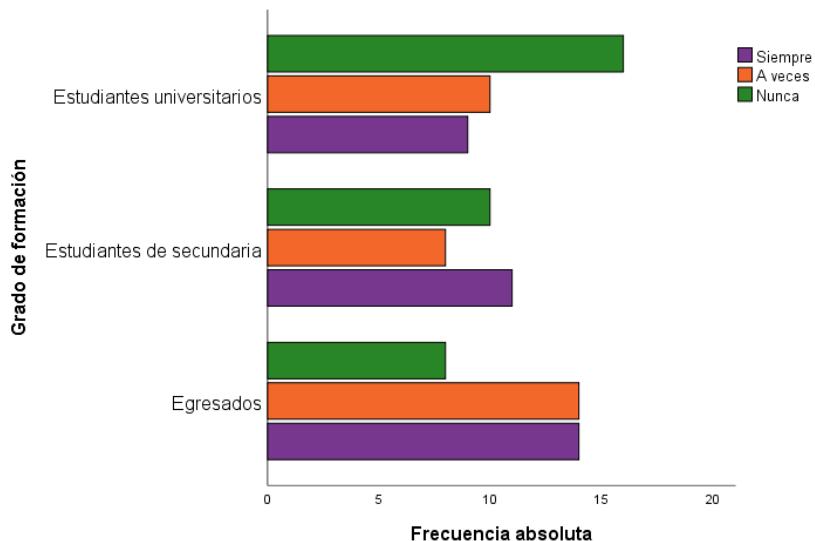


Figura 2. Uso de plantas antiinflamatorias por grado de formación
Figure 2. Use of anti-inflammatory plants by level of educational training

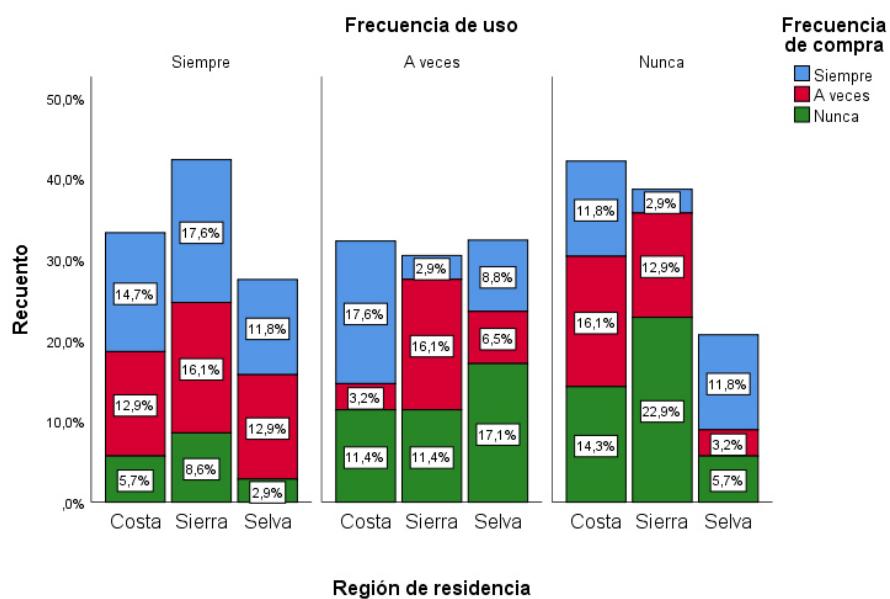


Figura 3. Uso y compra de plantas antiinflamatorias por región
Figure 3. Use and purchase of anti-inflammatory plants by region

Las mujeres exhiben una preferencia notable por el uso de la manzanilla, seguido del orégano, mientras que la uña de gato registra una frecuencia baja en la región costa (Figura 4a). La manzanilla, conocida por sus propiedades calmantes, podría ser percibida como una opción más versátil y compatible con las necesidades de este grupo demográfico. Además, se observa que las estudiantes universitarias demuestran una preferencia hacia la adquisición de uña de gato, a diferencia de las estudiantes de secundaria que prefieren usar el orégano (Figura 4b). Este tipo de plantas medicinales son adquiridas en forma de filtrantes y ramas que pueden comprarse en diversos mercados, y sus formas de consumo son como infusiones y dentro de preparaciones culinarias. En este último, las plantas más utilizadas en las regiones son la muña (19.05%), cedrón (15.51%) y orégano (14.03%), mientras que en forma de infusión la manzanilla (49.02%) y el eucalipto (2.14%), en la región costa y selva, respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2. Formas de consumo de plantas medicinales más habituales en el Perú – Top 7**Table 2.** Most common forms of consumption of medicinal plants in Peru – Top 7

| Plantas medicinales | Región | Frecuencia absoluta fi | Frecuencia relativa hi (%) |
|---|--------|------------------------|----------------------------|
| Para infusión | | | |
| Manzanilla | Costa | 436 | 49.22 |
| | Sierra | 358 | 18.83 |
| | Selva | 408 | 21.84 |
| Hierba Luisa | Costa | 167 | 20.14 |
| | Sierra | 161 | 6.95 |
| | Selva | 285 | 17.39 |
| Eucalipto | Costa | 17 | 2.05 |
| | Sierra | 16 | 0.69 |
| | Selva | 35 | 2.14 |
| Para infusión y preparaciones culinarias | | | |
| Cedrón | Costa | 62 | 7.48 |
| | Sierra | 359 | 15.51 |
| | Selva | 76 | 4.64 |
| Muña | Costa | 56 | 6.76 |
| | Sierra | 441 | 19.05 |
| | Selva | 281 | 17.14 |
| Menta | Costa | 36 | 4.34 |
| | Sierra | 103 | 4.45 |
| | Selva | 68 | 4.15 |
| Orégano | Costa | 25 | 3.02 |
| | Sierra | 323 | 13.95 |
| | Selva | 230 | 14.03 |

Nota: Datos tomados del Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú (2024)

Note: Data taken from the National Institute of Statistics and Informatics of Peru (2024)

La elección de estas plantas antiinflamatorias por mujeres egresadas y universitarias indica una inclinación hacia enfoques naturales y tradicionales para abordar los trastornos menstruales, buscando beneficios tanto para la relajación como para la reducción de la inflamación y el dolor asociado al periodo menstrual ya que el 77.3% confirma haber comprado “a veces” plantas antiinflamatorias, siendo en su mayoría mujeres provenientes de la costa y sierra, asimismo, la prueba no paramétrica de Spearman indicó que existe alguna correlación positiva baja entre el grado de formación educativa y la compra de plantas ($\rho = 0.215$, $p = 0.032 < 0.05$). No obstante, es crucial destacar que cualquier elección de uso debe ser evaluada y supervisada por un profesional de la salud para asegurar su seguridad y eficacia en cada caso individual.

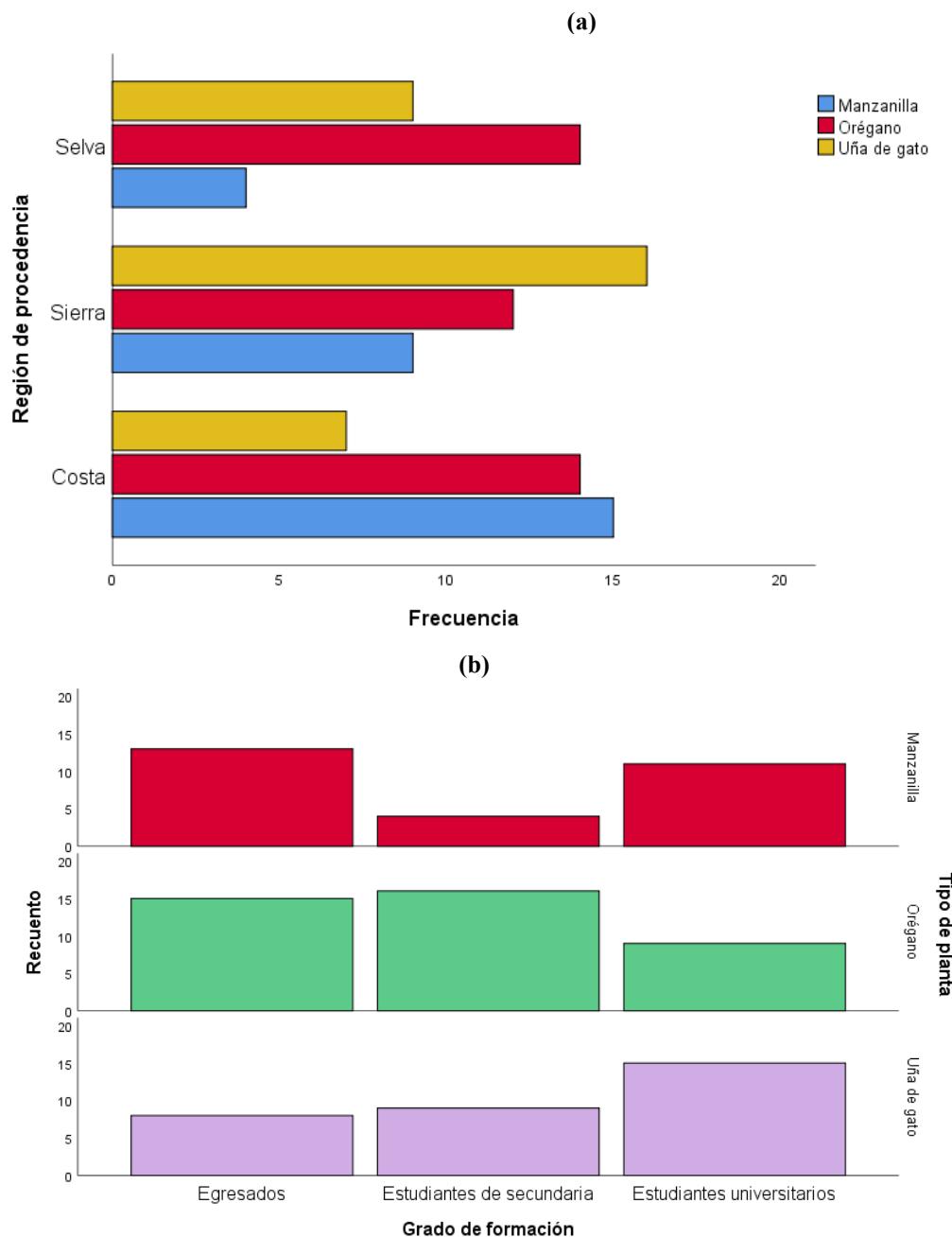


Figura 4. Principales plantas referidas que son utilizadas por las mujeres peruanas según región (a) y grado de formación (b).

Figure 4. Main plants referred to that are used by Peruvian women according to region (a) and level of education (b).

DISCUSIÓN

La comunidad que reside en la región de la costa y sierra muestra un índice de inclinación más alto a incorporar plantas antiinflamatorias en las prácticas de tratamiento para trastornos menstruales, 25% y 24%, respectivamente, a diferencia de la selva. Se puede establecer relación puesto que la mayoría de encuestadas fueron de ambas regiones, además, la región andina es el territorio peruano de la que procede la mayor parte de plantas donde su uso se desarrolló y se

transmitió desde tiempos ancestrales, y se sugiere que actualmente son utilizadas para brindar una solución rápida a malestares debido al complejo acceso de los centros de salud o el costo de los fármacos sintéticos (Walter, 2017; Philippe, 2015). Estos resultados son similares a los obtenidos por Choque *et al.* (2019) que demostró que aquellas ciudades productoras de la mayor cantidad de plantas medicinales son también en las que se realiza un mayor consumo de las mismas, se menciona también que la razón de ello es que el precio es accesible y la calidad de las plantas medicinales es mejor.

Los hallazgos evidenciaron que la forma de consumo mayoritario de las plantas antinflamatorias es en infusiones, siendo la manzanilla y el eucalipto los más utilizados, mientras que la muña y el orégano son utilizadas dentro de preparaciones culinarias, así como en infusión. Esto fue coincidente con el estudio etnobotánico realizado por De La Cruz-Castillo *et al.* (2024) en la ciudad de Trujillo, donde las flores y hojas de la manzanilla, caléndula y flor de overo, son mayormente consumidas como infusión en todas las regiones, a diferencia de la valeriana que su consumo predomina en la sierra. Con el fin de identificar el grado de importancia o valor cultural de estas plantas, los autores calcularon los índices de valor de uso de cada especie, los cuales fueron de 0.76, 0.69, 0.67, 0.51, respectivamente; valores mayores a 0.5 indican que la planta es importante para los pobladores trujillanos.

Silva-Alarcón *et al.* (2019) mencionan que, la mayoría de plantas provienen de diferentes lugares del país, como Huaraz, Tarma, Huancayo, Huánuco, Cerro de Pasco, y Huancavelica las cuales son comercializadas en fresco (65.6%) y seco (13.1%) predominando las de forma de hierbas como la camomila o manzanilla, seguidas de arbustos como el orégano (*Origanum vulgare*), y las lianas como la uña de gato (*Uncaria tomentosa*) que son las menos diversas. El 65.51% de estudiantes que cursan la educación secundaria y el 77.7% egresadas de educación superior son las que más utilizan este tipo de plantas, y el 72% refiere conocer al menos a una mujer de su entorno cercano que ha utilizado estas plantas, lo que puede sugerir una influencia en el contexto sociocultural (Fuentes *et al.*, 2022; Cachay & Vásquez, 2023), siendo corroborado con el estudio de Acosta *et al.* (2023), quienes demostraron que el uso de plantas medicinales en una comunidad andina peruana depende de las fuentes de información, que son principalmente los padres (23.2%), seguida de los abuelos (22.5%) y la presencia de curanderos en la zona (82.4%). Asimismo, su uso radica más en la población joven (51%) y adultos (42%), concentrados en grados de instrucción de nivel superior (40%) y secundario (32%), siendo en su mayoría solteros (51%) y con trabajo independiente (57%).

La manzanilla y el orégano fueron las plantas medicinales más utilizadas, resultados similares a los obtenidos por Chamba *et al.* (2019), los cuales reportaron que como primera alternativa la población hace uso de plantas medicinales y en su listado mencionaron el toronjil, geranio y manzanilla específicamente por sus propiedades antiinflamatorias y antibacterianas. Esto puede ser explicado, debido a la presencia de componentes fenólicos como carvacrol y timol, y kaempferol y dihidrokaempferol, en el orégano y uña de gato, respectivamente, que reduce la inflamación de órganos y revierte lesiones celulares, que pueden estar asociadas con daños a la estructura histológica de las células y actividad mutagénica (ElSawy *et al.*, 2019; Chin-Wong *et al.*, 2008). Por su parte, la manzanilla en su composición tiene aceites esenciales como bisabolol y apigenina que presentan actividad espasmolítica (Meza & Dicovskiy, 2020).

En este contexto, se ha demostrado que el hecho de consumir plantas medicinales es una práctica ancestral por un comportamiento cultural distinto en el que las creencias y tradiciones dominantes sustentan el uso de las mismas y de forma que se vuelve en un punto de partida para encontrar estrategias de salud exitosas. En otro estudio, López y Bretones (2022) señalan que la manzanilla presenta una extensión de virtudes medicinales, entre ellas se utiliza como remedio para trastornos menstruales y cólicos desde tiempos prerromanos, añadiendo también que se prescribió como tratamiento para el insomnio; en el caso del orégano, las mujeres lo utilizan para diversas afecciones ginecológicas, como dolores abdominales durante la menstruación, infecciones de la vagina y dolores en el trabajo de parto, las que son manejadas con el uso de plantas a través de infusiones, decoucciones, emplastos y baños a vapor (Días & Asenjo, 2023). Además, Bedoya *et al.* (2022) demostraron que gracias a los componentes estructurales semejantes entre las plantas medicinales es que se logran los efectos antiinflamatorios lo que a su vez radica en el contenido de flavonoides, por ejemplo, se hace mención de que el uso y consumo del aceite de hinojo logra

la inhibición de una prostaglandina que a su vez disminuirá las contracciones que se dan en el útero a causa de los trastornos menstruales.

Finalmente, cabe resaltar que al ser un estudio cualitativo los resultados obtenidos no pueden generalizarse, sin embargo, la comprensión de la información puede servir para valorar los conocimientos ancestrales sobre este tipo de plantas y seguir fortaleciendo su uso y consumo, siempre y cuando se acompañe con la supervisión de un profesional de la salud para evitar efectos adversos.

CONCLUSIONES

La investigación realizada ha permitido reconocer que las mujeres peruanas tienen una actitud positiva sobre el uso de plantas antiinflamatorias para trastornos menstruales, una práctica que ha perdurado a lo largo de varias generaciones. A través del estudio, se ha llegado a la conclusión de que más del 70% de las mujeres peruanas han empleado y tienen conocimiento de personas dentro de su entorno cercano que han utilizado plantas antiinflamatorias con el fin de aliviar los dolores menstruales. La región selva cuenta con un menor porcentaje de mujeres encuestadas que usan plantas antiinflamatorias para mitigar los dolores menstruales, a diferencia de la región costa y selva, que fueron mayores al 30%. Se ha demostrado la compra de diversas plantas antiinflamatorias con efectos positivos, especialmente, la manzanilla y el orégano, ya que la mayoría de mujeres con trastornos menstruales las utilizan. Se destaca que las mujeres con educación superior universitaria tienden a utilizar estas plantas en mayor medida que las estudiantes, además, la correlación positiva, aunque baja, entre el grado de formación y la compra de plantas antiinflamatorias sugiere que, a mayor nivel académico, mayor es la conciencia sobre el uso de estas plantas como una alternativa válida para el tratamiento de trastornos menstruales. En cuanto a las perspectivas futuras basadas en el presente estudio, se hace necesario profundizar en el estudio de la efectividad y seguridad del uso de plantas medicinales antiinflamatorias mediante enfoques científicos rigurosos que incluyan diseños experimentales y ensayos clínicos. Los estudios correlacionales entre el uso de estas plantas y los diversos factores demográficos y ambientales que influyen en su uso y consumo, son fundamentales para una mejor comprensión de cómo estos influyen en la toma de decisiones de salud entre las mujeres de distintas regiones del país. Asimismo, sería de gran valor investigar la integración de la medicina moderna y tradicional, lo cual puede abrir nuevos horizontes para promover el bienestar femenino desde un escenario intercultural.

Conflictos de interés

Los autores manifiestan no tener conflictos de interés.

LITERATURA CITADA

- Acosta, M., Sladaña, F., Guerra, J., Calderon, M., Crusatt, A., & Utus, R. (2023). The ethnobotany of medicinal plants and their deterioration in a community in the mountains of Peru. *Revista de Investigación Científica Tayacaja*. Obtenido de <https://revistas.unat.edu.pe/index.php/RevTaya/article/view/215/198>
- Álvarez, A. (2014). Preventín. Obtenido de <https://revistas.usil.edu.pe/index.php/zoo/article/download/1626/1683/4886>
- Ascanio, E., Chavez, G., & Ortiz, L. (2023). View of traditional use and qualitative chemical composition of medicinal plants in the communities of Sardinata and Cúcuta in Norte de Santander - Colombia. Obtenido de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ciencias_horticolas/article/view/15527/12836
- Bazán-Castillo, M., De La Cruz-Castillo, A., & Mostacero, J. (2023). Etnobotánica de la flora medicinal expendeda en el emporio comercial “La Parada” para el tratamiento de enfermedades del sistema respiratorio, Lima, Perú. *REBIOL*, 43(1), 24-31.

- Bedoya, M., Cisneros, C., Lazaro, B., Mendoza, K., & Cisneros, E. (2022). *Foeniculum vulgare* (Hinojo): Alternativa terapéutica femenina. *Revista Científica Ciencia Médica*, 25(1), 49-57. <https://doi.org/10.51581/rccm.v25i1.468>
- Cachay, M., & Vásquez, M. (2023). Contexto sociofamiliar que favorece la inteligencia emocional en adolescentes: una revisión. *Revista de Investigación en Psicología. Revista de Investigación en Psicología*, 26(1), 171-186. <https://doi.org/10.15381/rinvp.v26i1.24429>
- Chamba, M., Mora, G., Paccha Tamay, C., & Reyes Rueda, E. (2019). Conocimientos, actitudes y prácticas de la medicina ancestral en la población de Casacay Ecuador. *Tzhoecoén*, 11(4), 88–94. <https://doi.org/10.26495/tzh.v11i4.1237>
- Chin-Wong, J., Ordemar, P., Monge, A., & Moreno, M. (2008). Efecto de Uncaria tomentosa en la mutagénesis de *Salmonella typhimurium* inducida por 7,12 dimetilbenzantranenceno con activación metabólica *in vitro*. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/262735920_Efecto_de_Uncaria_tomentosa_en_la_mutagenesis_de_Salmonella_typhimurium_inducida_por_712_dimetilbenzantranceno_con_activacion_metabolica_in_vitro
- Choque, M., Nadid, N., Seña, D., Medinaceli, O., Fernández, R., Cárdenas, L., Dafne, M. (2019). Traditional knowledge of the medicines of medicinal plants of the city of Sucre-Bolivia. *Bio Scientia*, 2(4), 102–115. Obtenido de <https://revistas.usfx.bo/index.php/bs/article/view/289>
- Crisostomo, C., & Quispe, L. (2023). *Estudio etnofarmacológico de las plantas medicinales con mayor uso para tratar enfermedades digestivas en los pobladores de la comunidad de Chiara, distrito de Combapata, Canchis, Cusco, octubre 2023*. Tesis de pregrado, Universidad María Auxiliadora. Obtenido de <https://repositorio.uma.edu.pe/handle/20.500.12970/2028>
- Cuyás-Hernández, M. (2016). *Plantas medicinales en España. Uso, propiedades y precauciones en la actualidad*. Tesis de pregrado, Universidad Complutense de Madrid.
- De La Cruz-Castillo, A. M.-L.-M., Gil-Rivero, A., Vásquez-Boyer, C., Villacorta-Vásquez, J., & Alipio-Rodríguez, A. (2024). Estudio etnobotánico de la flora medicinal de la provincia de Trujillo, Perú. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 23(1), 12-28. <https://doi.org/10.37360/blacpma.24.23.1.2>
- Días, M., & Asenjo, J. (2023). Andean women: Attitudes towards the use of plants for the treatment of gynecological events. *Revista Cuidarte*, 14(2). <https://doi.org/10.15649/cuidarte.2724>
- Elsawy, A., Alkushi, G., Alasmari, W., Sinna, M., Eslam, A., Elmabdouly, M., & Sakran, A. (2019). Does oregano protect against testicular toxicity produced by ethylene glycol in adult male albino rat? *International Journal of Morphology*, 37(1), 358-362. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022019000100358>
- Fuentes, J., Herrero-Martín, G., Montes-Martínez, M., & Jáuregui-Lobera, I. (2022). Alimentación familiar: influencia en el desarrollo y mantenimiento de los trastornos de la conducta alimentaria. *Journal of Negative and No Positive Results*, 5(10), 1221-1244. <https://dx.doi.org/10.19230/jonnpr.3955>
- Gallegos, G. (2016). Las plantas medicinales: Principal alternativa para el cuidado de la salud, en la población rural de Babahoyo, Ecuador. *Anales de la Facultad de Medicina*, 77(4), 327-332. <https://doi.org/10.1155/2021/6002949>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI]. (1 de junio de 2024). *Encuesta Nacional de Hogares (ENAHO)*. Obtenido de https://proyectos.inei.gob.pe/iinei/srienaho/Consulta_por_Encuesta.asp
- López, M., & Bretones, A. (2022). The Great “Invisibles”: Medicinal Plants in the Imperial Roman Period in the Iberian Peninsula between Archaeobotany and Literary Sources. *Studia Historica. Historia Antigua*, 41, 1-33.
- Meza, L., & Dicovskiy, L. (2020). Potential use of Chamomilla L. Matricaria manzanilla and experiences in Nicaragua. *Revista de Ciencia y Tecnología El Higo*, 10(1), 1-8.
- Peña, L., & Cruz, L. (2024). *Estudio etnobotánico del uso de plantas medicinales del caserío Valencia, distrito y provincia de Jaén-Cajamarca*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Jaén. Obtenido de <https://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/695>

Recibido:
25/junio/2024

Aceptado:
4/noviembre/2024

- Philippe, J. (2015). *Lista de plantas medicinales comunes en la subregión andina: Propuestas para su integración en los sistemas de salud.* Obtenido de <https://bvs.minsa.gob.pe/local/MINSA/3544.pdf>
- Sánchez-Prieto, M., Losa-Puig, H., Domínguez-Osorio, N., Sanjosé-Alemany, M., Losa-Domínguez, F., & Sánchez-Borrego, R. (2023). El alivio natural: Sauzgatillo (*Vitex agnus-castus*) para el síndrome premenstrual y la dismenorrea. *Revista Chilena de Obstetricia y Ginecología*, 88(2), 121-125. <https://doi.org/10.24875/rechog.22000116>
- Serret, J., Hernández, A., Mendoza, O., Cárdenas, R., & Villasis, M. (2012). Alteraciones menstruales en adolescentes. *Boletín Médico del Hospital Infantil de México*, 69(1), 63-76.
- Silva-Alarcón, J., Cabrera, J., Trujillo, O., & Reyes-Mandujano, I. (2019). Características de las plantas medicinales comercializadas en diferentes mercados de Lima Metropolitana y sus efectos sobre el medio ambiente y la salud pública. *Horizonte Médico*, 19(4), 63-69. <https://doi.org/10.24265/horizmed.2019.v19n4.09>
- Theuser, A., Hack, C., Fasching, P., Antoniadis, S., Grasruck, K., & Wasner, S. (2021). Patterns and trends of herbal medicine use among patients with gynecologic cancer. *Geburtshilfe und Frauenheilkunde*, 81(6), 699-707. <https://doi.org/10.1055/a-1487-6284>
- Vega, N., Jiménez, S., & Merconchini, M. (2016). Trastornos menstruales en la adolescente posmenárquica: Un reto terapéutico en la atención primaria de salud. *Medicentro Electrónica*, 20(1), 56-59.
- Walter, D. (2017). A contribution to ethnobotany in the Cordillera Blanca (Sierra de Ancash). *Ibero-Amerikanisches Institut Preussischer Kulturbesitz*, 34(1), 149-176.