



Ciencia Nicolaita

86



diciembre
de 2022

Revista Científica
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Ciencia Nicolaita

ISSN: 2007-7068

Marco Antonio Landavazo Arias
Coordinador de la Investigación Científica

Pedro Corona Chávez
Editor

Comité Editorial

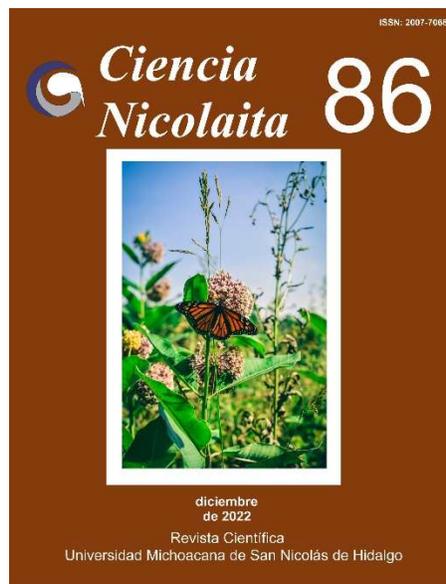
Luca Tessieri, Instituto de Física y Matemáticas; **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología; **Martina Medina Nava**, Facultad de Biología; **María de Lourdes González Arqueros**, Conacyt – Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra; **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales; **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina; **Jorge Alejandro Verduzco Martínez**, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales; **Claudio Rubén Fuerte Esquivel**, Facultad de Ingeniería Eléctrica; **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica; **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil.

Comité Editorial Externo

Daniele Colosi, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México; **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, USA; **Rafael Ángel Reyna Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México; **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México; **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Postgrado en Botánica, Estado de México; **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México; **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México; **Enrique Acha Daza**, Profesor Emérito de la Universidad de Tampere, Finlandia; **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua; **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Equipo Editorial: Sergio Ramírez Murillo, Naborina Villaseñor Santoyo.

Administrador página web: Hugo César Guzmán Rivera.



Ciencia Nicolaita

ISSN: 20007-7068

Revista Ciencia Nicolaita Número 86, diciembre de 2022

<https://www.cic.cn.umich.mx/cn>

Directorio	2
Contenido	3
Presentación. Pedro Corona Chávez. Editor	5

VOLUMEN MONOGRÁFICO SISTEMÁTICA DE LA VIDA
Editores invitados: Sabina Irene Lara Cabrera,
Omar Domínguez Domínguez y Carlos Alonso Maya Lastra

***Flora y vegetación del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC):
Cerro de Comburinda, municipio de Tingambato, Michoacán, México***

Marisol Sales-Figueroa y Patricia Silva-Sáenz

<https://doi.org/10.35830/cn.vi86.653>

6

***Vislumbrando la diversidad de clinostomidos (Platyhelminthes: Digenea), parásitos
asociados a peces y aves acuáticas en México y Centroamérica mediante información
obtenida de la biología molecular***

Ana Lucía Sereno-Uribe, Alejandra López-Jiménez, Mirza Patricia Ortega-Olivares,
Leopoldo Andrade-Gómez, Marcelo Tonatiuh González-García y Martín García-Varela

<https://doi.org/10.35830/cn.vi86.661>

33

<i>Las especies crípticas: un reto para los estudios modernos de sistemática, descripción de la biodiversidad y conservación de las especies</i>	
Gerardo Pérez Ponce de León, Brenda Solórzano García	45
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.672	
<i>La relevancia emergente de una visión pluralista de la biología sistemática</i>	
Efraín De Luna, Dolores González	54
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.676	
<i>Evaluación bioinformática de datos Hyb-Seq para 3 especies de Salvia subgénero Calosphace (Lamiaceae).</i>	
Daniel Simbrón Romero, Carlos Alonso Maya Lastra y Sabina I. Lara Cabrera	69
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.689	
<i>Lo controversial de los cambios nomenclaturales: tres casos de estudio en plantas</i>	
Sabina Irene Lara Cabrera y Yocupitzia Ramírez Amezcua	84
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.691	
MISCELÁNEA	
<i>Análisis espacial del riesgo de inundación a través de Sistemas de Información Geográfica: Caso sector Hacienda-Margarita, Puebla</i>	
Eduardo Jerjes Molina-Blancas, Stephanie Scherezada Salgado-Montes, María Lourdes Guevara-Romero	97
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.629	
<i>Despliegue de gotas sobre superficie a alta temperatura</i>	
Luis Fernando Huerta Mendoza, Gildardo Solorio Díaz, Crisanto Mendoza Covarrubias, Alicia Aguilar Corona	111
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.662	
<i>Análisis geotécnico de la estabilidad del talud “El Álamo”, ubicado en la antigua carretera de Mil Cumbres</i>	
Arreygue Rocha J.E., Ávila Ambriz G.H. y Hurtado Beltrán A.	122
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.678	
<i>Diseño de prensa hidráulica para reciclar polietileno de alta densidad (HDPE) en forma de placas</i>	
Renato González Bernal, Carlos Alfredo Zamudio Guerrero, Juan José Piña Castillo, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez, Francisco Israel Tinoco Reyes	136
https://doi.org/10.35830/cn.vi86.682	
Página legal y créditos	149

Presentación

Ciencia Nicolaita es una revista científica editada en versión electrónica de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que acepta para su publicación artículos originales resultado de investigaciones que demuestren rigor en su metodología, resultados y discusión.

Ciencia Nicolaita se propone difundir contribuciones en las áreas del conocimiento de Físico Matemáticas, Ciencias Biológicas, Ecología y Ambiente, Ciencias de la Tierra, Ciencias Agro y Químico Biológicas, Ciencias de la Salud, Ingeniería química, Metalurgia y Materiales, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica y Arquitectura e Ingeniería Civil.

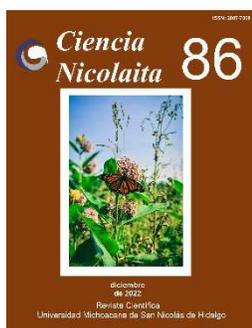
Como una nueva propuesta de revista institucional, Ciencia Nicolaita ofrece la oportunidad de publicar diversas formas de comunicación de la ciencia, desde **volúmenes monográficos** relacionados con las diversas áreas del conocimiento, **artículos in extenso** con datos científicos originales que demuestren rigor en su metodología, resultados y discusión, **artículos de revisiones del trabajo científico** de investigadores nicolaitas o de externos por invitación, **artículos de análisis** y debates científicos actuales, **reseñas** de temas relevantes obtenidas a partir de obra (libros), entrevistas, congresos y simposios nacionales e internacionales, **artículos de educación** de cada área científica con referencias críticas en el desarrollo de técnicas o materiales de enseñanza y **noticias documentadas** de la comunidad científica universitaria (premios, congresos, patentes, logros).

El número 86 de la revista Ciencia Nicolaita contiene diez publicaciones, seis de las cuales pertenecen al **volumen monográfico** "SISTEMÁTICA DE LA VIDA", reunidos por los Editores invitados: Sabina Irene Lara Cabrera, Omar Domínguez Domínguez y Carlos Alonso Maya Lastra. En este volumen se presentan contribuciones de localidades específicas como la región de Tingambato, como se discuten aspectos de nomenclatura y taxonomía de plantas y parásitos, remarcando la complejidad y el dinamismo de una clasificación biológica en relación con el avance del conocimiento descriptivo de las especies.

El número 86 de la revista Ciencia Nicolaita contiene además cuatro contribuciones de ingeniería en su sección de **miscelánea**, las cuales muestran una gran calidad en datos experimentales y teóricos.

Consideramos nuevamente que el número 86 de la revista Ciencia Nicolaita cumple con la nueva propuesta de abrir las posibilidades de comunicación científica institucional y esperamos que pueda ser bien recibido y aprovechado por investigadores, docentes y estudiantes

Pedro Corona Chávez
Editor



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Flora y vegetación del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC): Cerro de Comburinda, municipio de Tingambato, Michoacán, México

Flora and vegetation of the Voluntary Area for Conservation (ADVC): Cerro de Comburinda, municipality of Tingambato, Michoacán, Mexico

Marisol Sales-Figueroa y Patricia Silva-Sáenz*

Para citar este artículo: Marisol Sales-Figueroa y Patricia Silva-Sáenz*, 2022. Flora y vegetación del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC): Cerro de Comburinda, municipio de Tingambato, Michoacán, México. Ciencia Nicolaita no. 86, 6-32. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.653>



Historial del artículo:

Recibido: 6 de mayo de 2022

Aceptado: 28 de julio de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: patricia.silva@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Flora y vegetación del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC): Cerro de Comburinda, municipio de Tingambato, Michoacán, México

Flora and vegetation of the Voluntary Area for Conservation (ADVC): Cerro de Comburinda, municipality of Tingambato, Michoacán, Mexico

Marisol Sales-Figueroa y Patricia Silva-Sáenz*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Biología.

Resumen

El presente artículo muestra los resultados del inventario florístico realizado en el Área Destinada Voluntariamente a la Conservación (ADVC) del cerro de Comburinda, Michoacán, México, el cual tiene una superficie aproximada de 983 ha. La lista se compone de 76 familias, 180 géneros y 229 especies con siete taxa infraespecíficos; el clado de las eudicotiledóneas es dominante; la familia más diversa es Asteraceae y los géneros *Salvia* y *Solanum* son los mejor representados; los bosques de coníferas, de encino y de mesófilo de montaña, fueron los tipos de vegetación identificados; asimismo, se encontraron siete especies en riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010. Es importante mencionar que las actividades humanas están ocasionando un notable deterioro en la diversidad biológica de la zona, por lo que este estudio será una herramienta útil para encaminar acciones en favor de la recuperación, la conservación y el manejo del área.

Palabras clave: bosque mesófilo de montaña, conservación, diversidad vegetal, especies en riesgo, bosques

Abstract

Here we present a floral inventory for the cerro de Comburinda Voluntary Conservation Area (ADVC from spanish Área Destinada Voluntariamente a la Conservación), Michoacán, México. The ADVC comprises an approximate area of 983 ha. The floral inventory includes representatives of 76 families, 180 genera, 229 species and 7 infraspecific taxa; the Clade Eudicot is dominant and the Asteraceae is the most diverse family; both *Salvia* and *Solanum* are the most diverse genera; we identified conifer forests, oak forest, mountain cloud forest as the main vegetation types; of the 229 species, seven are considered under risk of conservation according to NOM-059-SEMARNAT-2010. It is important to mention that human activities are causing a notable deterioration in the biological diversity of the area, so this study will be a useful tool to direct actions in favor of the recovery, conservation and management of the area.

Keywords: mountain cloud forest, conservation, plant diversity, species at risk, forests

Introducción

El estado de Michoacán ocupa uno de los primeros lugares en diversidad vegetal de México, al albergar a un gran número de especies de plantas vasculares con aproximadamente 5 885 especies (Villaseñor, 2016). Sin embargo, el esfuerzo de colecta no es igual en todo el estado, y aunque existen grandes avances en relación con el registro de la flora para documentar las coníferas (Madrigal-Sánchez, 1982) o los encinos (Bello y Labat, 1987; Arizaga *et al.*, 2009), la labor de inventariar la flora completa ha sido insuficiente. Además, actualmente son escasos los listados florísticos realizados en los cerros de la entidad, mencionándose, por ejemplo, el del cerro del Águila en el municipio de Morelia (Cornejo-Tenorio *et al.*, 2013) y del Quinceo (Huerta-Badillo, 1990), el del cerro de Patamban de los municipios de Tangancícuaro y Los Reyes (Torres, 1994), el del cerro Curutarán de Jacona (Sánchez-Rodríguez, 2007), además del trabajo de la *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes*, los cuales han sido publicados desde 1992 hasta la actualidad (<http://inecolbajio.inecol.mx/floradelbajio/index.php/fasciculos/publicados>), y que incluyen 53 municipios del norte del estado.

Adicionalmente, en el municipio de Tingambato se reportan escasos estudios relacionados con la flora, ya sea como listados de un grupo específico —como es el caso de las orquídeas (Domínguez-Gil, 2015)— o de especies en particular: *Podocarpus reichei* J. Buchholz & N.E. Gray (Villanueva, 1993); *Rhynchostele cervantesii* (Lex.) Soto Arenas & Salazar (Magaña-Lemus *et al.*, 2021; Cervantes-Uribe, 2018); *Oncidium reichenheimii* (Linden & Rchb. f.) Garay & Stacy (Herrera-Villanueva *et al.*, 2019). Dichos trabajos aportan información valiosa de esos grupos de plantas; sin embargo, cabe reconocer, que aún falta por inventariar una gran parte del municipio.

Las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) en México, son un instrumento para la preservación de la biodiversidad y de viabilidad, además de tener potencial para incrementar la superficie de conservación de tierras forestales (Raya-Lemus, 2017). El 27 de abril de 2011, y con base en el decreto que reformó y adicionó diversas disposiciones de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, la comunidad de Tingambato decidió integrar las tierras comunales conocidas como “Cerro del

Comburinda”, perteneciente al municipio de Tingambato, al sistema de ADVC (Magaña, 2017), obteniendo el certificado por parte de la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del estado de Michoacán (Raya-Lemus, 2017), actualmente Secretaría de Medio Ambiente, Cambio Climático y Desarrollo Territorial (SE-MADECCDET).

En este contexto, cabe mencionar que los objetivos planteados en esta investigación fueron: primero, elaborar una lista florística de plantas vasculares y, segundo, describir la vegetación presente en el área. Con esto se pretende contribuir al conocimiento de la flora vascular de Tingambato y en particular del cerro de Comburinda, pues a pesar de ser una zona decretada ADVC, sigue padeciendo deterioro ambiental evidente, ocasionado principalmente por el cambio de uso de suelo para cultivo de aguacate. Se espera que los resultados de este trabajo puedan motivar la realización de investigaciones futuras en otros campos de la biología en ese lugar y en áreas adyacentes, a la vez que se refuercen las acciones de mantenimiento por parte de los comuneros de la localidad y las autoridades correspondientes.

Materiales y métodos

Área de estudio

La porción del cerro que corresponde al área natural protegida en la categoría de ADVC, tiene una superficie de 983 ha y se localiza dentro del municipio de Tingambato, ubicado al norte del estado de Michoacán (Figura 1). Las coordenadas geográficas son: 19°28'20" de latitud norte y 101°48'45" de longitud oeste (INEGI, 2017), colindando con el municipio de Nahuatzen; al sur 19°26'59.33" y -101°49'07.65" colindando con el municipio de Salvador Escalante; al este 19°27'22.50" y 101°50'22.66" colindando con Erongaricuaro; y al oeste 19°27'56.60" y -101°48'04.85" colindando con Uruapan (Navia y Cumana, 2011). Además, tiene colindancia al norte con la barranca del Agua Escondida, al sur con la comunidad indígena de Zirahuén y Tarascón, al oriente con la comunidad indígena de San Juan Tumbio y al poniente con la vía del tren (Magaña, 2017).

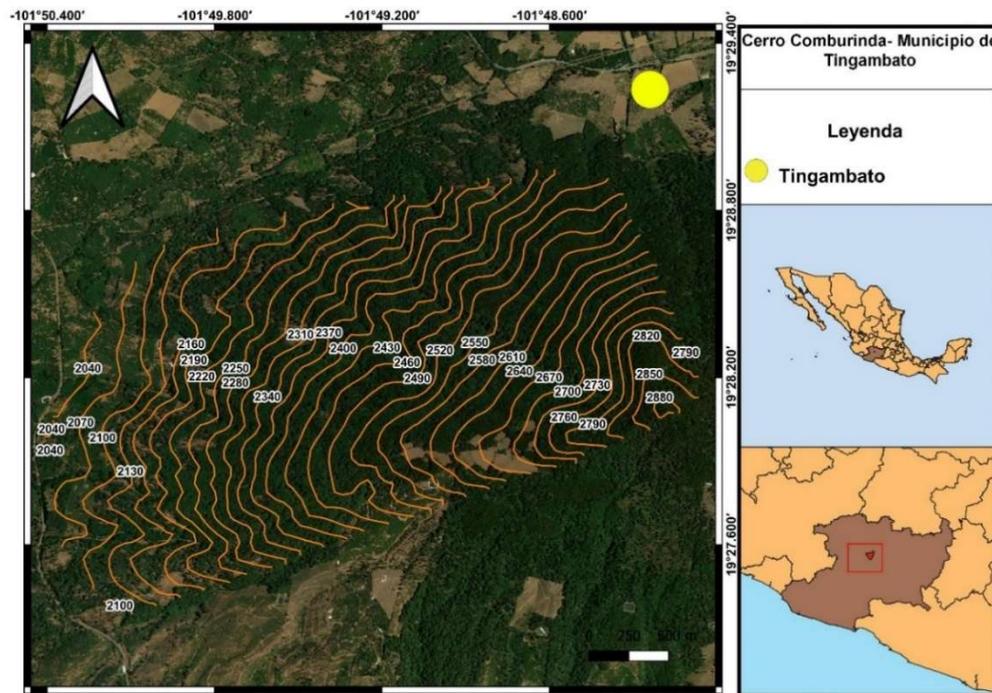


Figura 1. Ubicación geográfica del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación del cerro de Comburinda, Tingambato, Michoacán, México.

La ADVC del cerro de Comburinda, se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico y dentro de la subprovincia Neovolcánica Tarasca; forma parte de una montaña de origen volcánico, por lo que sus rocas son de ese mismo tipo, específicamente extrusivas (basalto). Tiene un rango altitudinal de 2 000 a 2 850 m s. n. m. El suelo corresponde a un andosol húmico y andosol ócrico (INEGI, s/f). De acuerdo con García (1988), el clima es Cb(w2)(w)j, templado subhúmedo con lluvias en verano, estación que se caracteriza por tener largos periodos frescos, donde la temperatura media anual es de 15.7 °C, la media máxima de 24.8 °C y la media mínima de 7.2 °C, mientras que la precipitación es de 1 098.8 mm al año (CONAGUA, s/f). En cuanto a la vegetación, Villanueva (1993) reporta que para el municipio hay bosques mixtos y de coníferas (encino-pino), cedro, aile, oyamel y juníperos que contrastan con diversos cultivos; por su parte, INEGI (2010) registra en el área de estudio básicamente bosque; y Domínguez-Gil (2015) reconoce tres tipos de vegetación: bosque mesófilo de montaña, bosque de *Pinus-Quercus* y bosque de *Quercus-Pinus*. La delimitación del área de estudio fue realizada por GIRA (Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada) por petición de la comunidad indígena de Santiago Tingambato (Navia y Cumana, 2011).

Colecta de material y determinación taxonómica de especies

Fueron realizadas 22 salidas al campo: de agosto de 2014 a diciembre de 2015, básicamente cada 15 días en la época de lluvias y cada 22 días el resto del año. Se colectaron entre cuatro y seis ejemplares de cada especie, procurando que presentaran estructuras reproductoras, necesarias para su determinación. Asimismo, se realizó el proceso de herborización tradicional de acuerdo a Sánchez-González y González (2007).

Una vez herborizado el material se procedió a su determinación taxonómica en el laboratorio herbario de la Facultad de Biología (EBUM) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, esto con ayuda de claves de diversas floras: flora fanerogámica del Valle de México (Calderón y Rzedowski, 2005), los fascículos de la Flora del Bajío y de regiones adyacentes (<http://incolbajio.incol.mx/floradelbajio/index.php/fasciculos/publicados>), Flora Novo-Galiciana (McVaugh, 1984, 1985, 1987, 1989 y 2001), entre otras, así como literatura especializada de algunos géneros, entre ellos: *Salvia* (Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011) y *Euphorbia* (Martínez-Gordillo *et al.*, 2002).

Con la información obtenida de cada ejemplar durante la colecta (características botánicas: altura en

arbustos y árboles, tipo de corteza y DAP de árboles, color de flores, forma biológica), del ambiente (hábitat, vegetación, coordenadas geográficas, altitud, etc.) y los resultados de la determinación taxonómica, fue elaborada una base de datos a partir de la cual se elaboraron las etiquetas de los ejemplares para la colección científica y, a partir de dicha base, se preparó el inventario aquí presentado y se realizó el análisis cuantitativo.

El cotejo de los ejemplares se realizó en el EBUM y en el herbario del Instituto de Ecología A. C. (IEB) localizado en Pátzcuaro, Michoacán; algunos pocos ejemplares fueron cotejados en el Herbario Nacional (MEXU) de la Universidad Nacional Autónoma de México. Una vez realizado el cotejo, el material botánico fue etiquetado y depositado en los mismos tres herbarios.

Para el ordenamiento taxonómico, en el inventario se utilizó el sistema de clasificación PPG I (2016) para los helechos, para gimnospermas el de Christenhusz *et al.* (2011) y para angiospermas la de APG IV (2016). Al listado se agregaron los registros de colectas botánicas del área estudiada registradas en dos colecciones científicas (IEB y MEXU), así como cuatro colectas recientes de otro colector, pero que no fueron localizadas durante los recorridos de campo que se realizaron para el presente estudio.

A partir de las observaciones de campo, de las colectas botánicas identificadas taxonómicamente y del criterio de Rzedowski (2006), se describe la vegetación y también se incluye información sobre una comunidad de plantas arvenses que, aunque en general los especialistas del tema no lo consideran como un tipo de vegetación, se menciona aquí por la relevancia que adquiere al desplazar la cubierta vegetal original del lugar de estudio, además de la amplia superficie que cubre en el área.

Para llevar a cabo la descripción de la vegetación, se consultó, para el caso de las malezas, (*) a Villaseñor y Espinosa (1998), Vibrans y Tenorio-Lezama (2015), Calderón y Rzedowski (2004), Rojas-Chávez y Vibrans (s/f) y Sánchez-Ken *et al.* (2012); el endemismo (**) y especies introducidas o exóticas (°), es con base en Villaseñor (2016); mientras que las descripciones de las especies se fundamentan en diversos textos, tales como el de Alfonso-Corrado *et al.* (2014), Fonseca (2013) y Martínez-De La Cruz, *et al.* (2018); para determinar las especies que están catalogadas

en riesgo, se revisó la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010); finalmente, la flora se compara con dos trabajos similares llevados a cabo en lugares cercanos, aplicando el índice de similitud de Sorensen (Franco *et al.*, 1985).

Resultados

Flora

Se registraron 229 especies de plantas vasculares y siete categorías infraespecíficas (dos subespecies y cinco variedades) que se clasifican en 180 géneros y 76 familias (Apéndice). A la lista obtenida se adicionaron cuatro especies y dos categorías obtenidas de cuatro colectores en el pasado, depositados en los herbarios IEB y MEXU, así como cuatro colectas recientes de otro colector que no fue posible localizar en este estudio, señaladas como € en el apéndice.

Es notable la dominancia del clado de las Eudicotiledóneas sobre los demás grupos, ya que incluye casi dos terceras partes de la flora registrada. Las Polypodiopsida están representadas por siete familias que, en conjunto con las Lycopodiopsida (con solo una familia), representan el 8.5% del total de la flora registrada. Las Monocotiledóneas, las Magnólidas y las Gimnospermas, obtienen el segundo, cuarto y quinto lugar en número de especies, respectivamente (Cuadro 1). Asimismo, se registraron nueve familias con cinco o más géneros, las cuales tienen una representatividad de 44.7% de los géneros y 46.1% de las especies registradas. Las seis primeras familias registran diez o más especies y reúnen 38.1% del total (Cuadro 2). Los géneros con más de tres especies son 12 y en conjunto conforman el 20.6% del total (Cuadro 3).

La forma biológica mejor representada fue la herbácea con 197 especies (83.5%), seguida por la arbustiva con 19 (8.1%) y continuada por la arbórea con 20 (8.9%). Del total de hierbas, están presentes diversas variantes: trepadoras, rastreras, e incluso cuatro hierbas parásitas. Por otra parte, del total de especies se encontraron 92 malezas que constituyen el 38.9%, nueve especies exóticas (3.8% del total) y 49 endémicas, esto es, 20.7% de la flora (Apéndice). La flora del ADVC del cerro Comburinda, tiene mayor similitud específica (32.6%) con el cerro Patamban (Torres, 1994), al compartir 109 especies, mientras que con el cerro del Águila (Cornejo-Tenorio *et al.*, 2013) tiene una menor similitud al compartir 86 especies, siendo semejante en 19.5%.

**Cuadro 1**

Diversidad florística del Área Destinada Voluntariamente para la Conservación del cerro de Comburinda, Tingambato, Michoacán, México. Entre paréntesis se señalan los porcentajes relativos.

Taxa	Familias	Géneros	Especies	Categorías infra-específicas (CI)	Especies y CI
Lycopodiopsida	1 (1.3)	1 (0.6)	1	0	1 (0.4)
Polypodiopsida	7 (9.2)	12 (6.7)	18	1	19 (8.1)
Pinidae	2 (2.6)	3 (1.7)	6	0	6 (2.5)
Magnolidae	3 (3.9)	5 (2.8)	9	0	9 (3.8)
Monocotiledóneas	11 (14.5)	32 (17.8)	35	0	35 (14.8)
Eudicotiledóneas	52 (68.4)	127 (70.6)	160	6	166 (70.3)
Totales	76	180	229	7	236

Cuadro 2

Familias mejor representadas en el Área Destinada Voluntariamente para la Conservación del cerro de Comburinda, Tingambato, Michoacán, México.

FAMILIA /	No. Géneros/especies
Asteraceae	23/30
Fabaceae	12/16
Lamiaceae	6/13
Poaceae	10/11
Orchidaceae	10/10
Solanaceae	4/10
Rosaceae	5/7
Malvaceae	6/6
Rubiaceae	5/6
Totales	81/109

Cuadro 3

Géneros mejor representados en el Área Destinada Voluntariamente para la Conservación del cerro de Comburinda, Tingambato, Michoacán, México.

GENEROS	No. De especies
Salvia	8
Solanum	7
Peperomia	5
Pinus	4
Quercus	4
Dryopteris .	3
Pteris	3
Brassica	3
Lepidium	3
Raphanus	3
Desmodium	3
Oenothera	3
Total	49

Especies registradas en la NOM-059-SEMARNAT-2010

Siete especies se encuentran enlistadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010), tres sujetas a Protección especial (Pr): *Cupressus lusitanica* Mill. (Cupressaceae), *Phymosia rosea* (DC.) Kearney (Malvaceae) y *Monotropa hypopitys* L. (Ericaceae); tres en estatus de Amenazadas (A): *Rhynchosstele cervantesii* (Orchidaceae) que además es endémica del país, *Carpinus caroliniana* (Betulaceae) e *Hibiscus spiralis* Cav. (Malvaceae, endémica); y una especie en Peligro de extinción (P): *Tilia americana* (Malvaceae). Se muestran cuatro de ellas en la figura 2. Los forofitos observados de *R. cervantesii* fueron: *Clethra mexicana* DC., *Quercus laurina* Bonpl. y *Meliosma dentata* (Liebm.) Urb.

Vegetación

La vegetación del cerro de Comburinda presenta manchones traslapados o entremezclados, esto quizá se debe a que desde tiempo atrás el área ha sido sometida a un diverso y amplio manejo. En cuanto a los tipos de vegetación que se reconocen dentro de esta

ADVC, son tres: 1. Bosque de coníferas, a su vez con dos variantes: a) Bosque de *Pinus* y b) Bosque mixto de *Pinus* - *Quercus*; 2. Bosque de *Quercus*; y 3. Bosque mesófilo de montaña. Se contempló además una comunidad de plantas arvenses.

1. Bosque de coníferas

- a. **Bosque de *Pinus*** (Figura 3A). Los pinares se localizan dentro del área de estudio a una altitud entre 2 130 a 2 790 m s. n. m., cubriendo una extensión aproximada a 38 ha, se encuentran solo en pequeños manchones entremezclados con la asociación de *Pinus* y *Quercus*, separados unos ejemplares de otros y compartiendo con especies del estrato arbustivo: *Acalypha mollis* Kunth, *Baccharis heterophylla* Kunth y *Rumfordia floribunda* DC. El estrato herbáceo está compuesto por especies como: *Pseudognaphalium semiamplexicaule* (DC.) Anderb., *Helianthemum coulteri* S. Watson., *Hypericum philonotis* Schltld. &



Figura 2. Especies en la NOM-059-SEMARNAT-2010 del Área Destinada Voluntariamente para la Conservación del cerro de Comburinda: A) *Rhynchosstele cervantesii* (La Llave & Lex.) Soto Arenas & Salazar, especie endémica del país y en la categoría Amenazada. Foto: M. Sales-Figueroa. B) *Tilia americana* L., en Peligro de extinción. Foto: J.A. Blanco-García. C) *Carpinus caroliniana* Walter, Amenazada. Foto: J.A. Blanco-García. D) *Monotropa hypopitys* L., Sujeta a protección especial. Foto: P. Silva-Sáenz.



Cham., *Medicago lupulina* L., *Paspalum prostratum* Scribn. & Merr, *Pinaropappus roseus* (Less.) Less., entre otras.

- b. **Bosque mixto de *Pinus* y *Quercus*** (Figura 4). Esta asociación es la que abarca una mayor extensión dentro del polígono estudiado con alrededor de 639 ha; puede localizarse a altitudes que van desde los 2 000 hasta los 2 850 m s. n. m., predominando la especie *Pinus montezumae* Lamb., codominando con encinos (*Quercus* spp.), aunque también se pueden encontrar otras especies de *Pinus* asociadas, como *P. patula* Schltdl. & Cham., *P. teocote* Schltdl. & Cham. y diferentes especies de *Quercus*: *Q. martinezii* C.H. Mull. y *Q. laurina*. Esta vegetación se encuentra compartiendo el estrato arbustivo con especies como *Barkleyanthus salicifolius* (Kunth) H. Rob. & Brettell, *Rubus* spp., *Calliandra grandiflora* (L'Hér.) Benth. y *Cestrum thyrsoideum* Kunth, entre otros. El estrato herbáceo de esta vegetación es el más diverso en cuanto a especies, tanto que se puede observar en la gran mayoría de las especies colectadas (142) (Apéndice).

En algunas zonas del cerro se localiza también la asociación inversa, es decir, dominando el *Quercus* sobre el *Pinus*, con predominio principalmente entre *Quercus laurina*, *Q. martinezii* C.H. Mull. con *Pinus pseudostrobus* Brongn. y *P. montezumae* Lamb. Los encinos en este tipo de vegetación son de grandes tallas, siendo lugares muy prósperos en los cuales se albergan especies epífitas como algunos helechos y orquídeas, así como los llamados localmente “gallitos” (*Tillandsia* spp.). Además, pueden estar presentes otras especies arbóreas como *Arbutus xalapensis* Kunth, *Clethra mexicana* y *Crataegus mexicana* DC. Este tipo de vegetación se encuentra compartiendo el estrato arbustivo con especies tales como *Ceanothus caeruleus* Lag., *Eugenia fragrans* (Sw.) Willd., *Hibiscus spiralis*, *Toxicodendron radicans* (L.) Kuntze., entre otros. El estrato herbáceo se caracteriza por una mayor presencia de especies epífitas: *Pecluma alfredii* (Rosenst.) M.G. Price., *Peperomia galioides* Kunth, *Peperomia hispidula* (Sw.) A. Dietr., *Peperomia quadrifolia* (L.) Kunth, *Pleopeltis angusta* Humb. & Bonpl. ex

Willd. var. *angusta*, *Pleopeltis mexicana* (Fée) Mickel & Beitel. y *Rhynchostele cervantesii*.

2. Bosque de *Quercus* (Figura 3C).

En el ADVC del cerro de Comburinda, este tipo de vegetación se presenta de forma muy escasa, es decir, los manchones son pequeños, cubriendo en conjunto aproximadamente 21 ha, localizándose entre 2 100 y 2 430 m s. n. m. Las especies que se pueden encontrar son asociaciones principales de *Quercus laurina* y, ocasionalmente, otras especies de *Quercus* spp. Dependiendo del sitio, las asociaciones pueden variar; sin embargo, fue difícil de determinarlas con exactitud ya que son árboles jóvenes (situación quizá derivada de los frecuentes incendios), etapa en la que fisionómicamente son muy parecidos una especie con otra. El estrato arbustivo está conformado principalmente por *Ceanothus caeruleus* Lag. y *Rumfordia floribunda* DC.; en el estrato herbáceo se pueden encontrar *Gamochaeta americana* (Mill.) Wedd., *Passiflora subpelata* Ortega, *Valeriana urticifolia* Kunth, entre otras.

3. Bosque mesófilo de montaña (Figura 3B).

Cubre aproximadamente 66 ha entre los 2 070 hasta los 2 820 m s. n. m. Se caracteriza principalmente por condiciones especiales de humedad y de temperatura. Se encontró en cañadas muy húmedas en las que se localizan las escorrentías de la precipitación, por lo que la alta captación de agua, así como la retención de la misma, puede ser la causa para que existan las condiciones favorables para este tipo de vegetación. El área estudiada se localiza en la misma latitud que la asociación de *Pinus* y *Quercus*, aunque en diferentes altitudes y notables condiciones de luz perceptible entre ambos tipos. Las principales especies que se pudieron colectar e identificar son: *Oreopanax echinops* (Schltdl. & Cham.) Decne. & Planch., *Clethra mexicana*, *Meliosma dentata*, *Styrax argenteus* C. Presl. y *Alnus acuminata* Kunth subsp. *arguta* (Schltdl.) Furlow.

El estrato arbustivo no es muy abundante y se pudieron localizar especies del género *Solanum* L. y *Cestrum thyrsoideum* Kunth; asimismo, se observó una especie de “liana” (*Philadelphus mexicanus* Schltdl.). En el estrato herbáceo se pueden apreciar ejemplares de *Tillandsia* spp., así como helechos y las piperáceas que, si bien no son diversas, sí son muy abundantes,

pudiéndose encontrar tanto de hábito terrestre, rupícola y epífita.

La comunidad de plantas arvenses.

Cubren una superficie aproximada de 125 ha, en terrenos localizados desde la base del cerro hasta en la cima del mismo y se pudo registrar en diferentes ambientes:

- a. **Cultivo de aguacate.** Estas comunidades se localizan principalmente en las faldas del cerro, son abundantes y dispersas, su extensión actual sobre el área de estudio es de 103 ha, lo que corresponde a más de

10 % del total de ADVC. Cabe mencionar que las colectas en estos terrenos aguacateros se restringieron debido a que son áreas de propiedad privada y a que constantemente se “desyerba”, pero también destaca el hecho de que algunos de estos cultivos conservan parte de la vegetación original y son áreas que aún conservan especies de la vegetación primaria, incluyendo helechos terrestres y orquídeas terrestres y epífitas, así como otras herbáceas (Apéndice).



Figura 3. Tres tipos de la vegetación del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación del cerro de Comburinda: A) Bosque de *Pinus*, B) Bosque mesófilo de montaña, C) Bosque de *Quercus*. Fotos: J.A. Blanco-García.

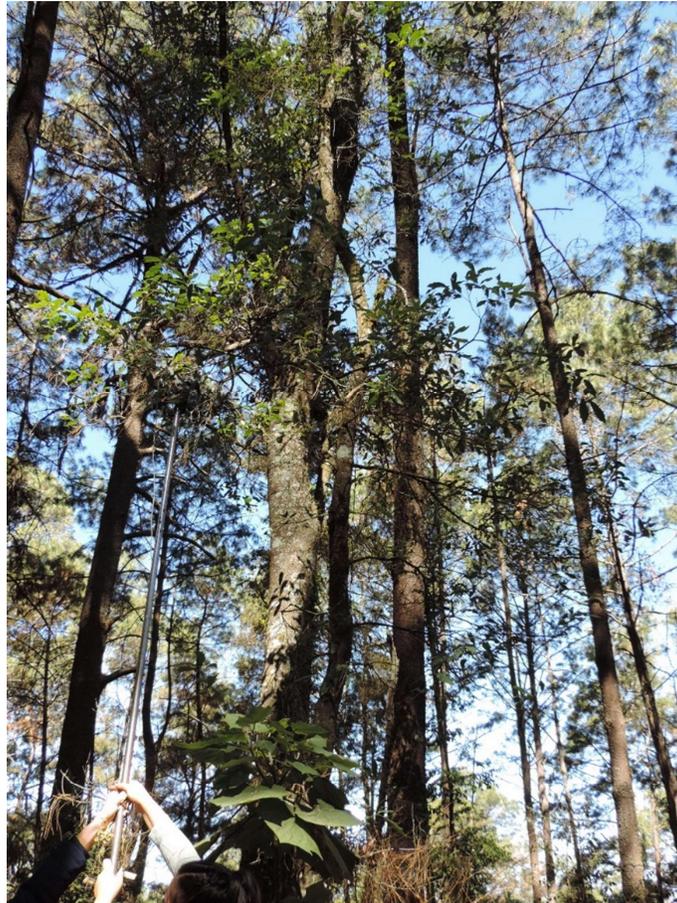


Figura 4. Bosque mixto de *Pinus* y *Quercus*, el de mayor extensión en el Área Destinada Voluntariamente a la Conservación del cerro de Comburinda, Tingambato, Michoacán, México. Foto: J.A. Blanco-García.

- b. **Cultivo de *Avena sativa* L.** que se ubica en las partes más altas, aproximadamente en 2 750 m s. n. m. del área, ocupando cerca de 18 ha. Las especies encontradas ahí son escasas, probablemente debido a que es una zona donde se ha removido su vegetación original y no se encuentra un estrato arbóreo; sin embargo, sí se encontraron algunas especies creciendo alrededor de dicho cultivo: *Phytolacca rosea*, especie en la categoría Sujeta a protección especial, según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010), *Alnus acuminata* subsp. *arguta* y algunos individuos de especies del género *Pinus*. Lo mismo pasa con el estrato arbustivo, el cual se limita básicamente a *Monnina ciliolata* Sessé & Moc. ex DC. y *Rumfordia floribunda* DC. El estrato herbáceo es algo más diverso (Apéndice).

Discusión

La flora

De acuerdo con Rzedowski (1996) y Villaseñor (2004, 2018), en México las familias Asteraceae y Poaceae junto a las Fabáceas, son las mejor representadas en el centro del país, abundantes en regiones de climas templados. Esto coincide con los resultados aquí obtenidos. La familia Asteraceae se distribuye por todo México, siendo Michoacán uno de los estados que alberga un gran número de especies: entre 714 (Zamudio y Carranza, 2019) y 837 (Villaseñor, 2018), representando las encontradas en el área de estudio, entre 4.20 % y 3.58 % del dato estatal.

La familia Fabaceae es la tercera familia de angiospermas más grande en términos de número de especies después de Asteraceae y Orchidaceae; económicamente, ocupa el segundo lugar en importancia después de Poaceae (LPWG, 2017), y se encuentra dentro de las más importantes en la entidad, siendo común

encontrar que la posicionan en el segundo lugar en diversos trabajos florísticos (Correa-Pérez y Antaramián-Harutunian, 2003; Rzedowski, 2003; Cué-Bär *et al.*, 2006; Zamudio y Carranza, 2019); de acuerdo con Zamudio y Carranza (2019), las del ADVC del cerro de Comburinda, incluye 2.9 % del total estatal (de 595 taxones distintos). Y en cuanto a las Poaceae, con base en los datos de Sánchez-Ken (2019), en la zona estudiada se encuentra el 2.4 % del total estatal (de 448 especies y 59 categorías infraespecíficas) y el 2.9 % del registro para Michoacán (381 taxones), de acuerdo a Zamudio y Carranza (2019).

Cabe mencionar que la especie *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham está representada por pocos individuos juveniles cerca de las cabañas, derivado de actividades de reforestación.

Con relación a los géneros, *Salvia* es el género más grande de la familia (Flores-Tolentino *et al.*, 2020) y alberga entre 62 y 69 especies en el estado de Michoacán (Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011; Martínez-Gordillo *et al.*, 2013; Lara-Cabrera *et al.*, 2016; Martínez-Gordillo *et al.*, 2017; Flores-Tolentino *et al.*, 2020), siendo los bosques templados de *Pinus-Quercus* y de *Quercus*, donde más registros presenta; el municipio de Tingambato cuenta con 14 especies (Cornejo-Tenorio e Ibarra-Manríquez, 2011); las especies localizadas en el área de estudio, son alrededor del 14 % del estado y 64.2 % del municipio. El género *Solanum* es el más diverso dentro de su familia con 130 especies reportadas para el país y 29 para Michoacán (Martínez *et al.*, 2017); las seis especies del área de estudio son 4.6 % y 20.6 %, respectivamente.

La presencia de un alto porcentaje de malezas (entre las cuales están las nueve exóticas registradas) es significativa de la perturbación a la que ha sido expuesto el área de estudio, pues este tipo de plantas crecen en sitios alterados por el hombre (Rzedowski, 2006; Rojas y Vibrans, s/f). La presencia de una quinta parte de la flora endémica en el ADVC, implica la necesidad de conocer los atributos biológicos y ecológicos de dichas especies para comprender mejor la dinámica que ahí ocurre, y destaca el hecho de 16 especies que son también endémicas (Apéndice), hecho que coincide con Rzedowski (1991) cuando menciona que plantas comunes y distintivas del paisaje en el país, entre ellas malezas, tienen una distribución restringida; además, los bosques de coníferas y encino son sitios propicios para el endemismo (Rzedowski,

1992). El registro de especies exóticas (marcadas con ° en el apéndice) en el área de estudio pone de manifiesto cierto deterioro en el lugar, pues de acuerdo con Velázquez *et al.* (2014), la introducción de estas especies, aun cuando los efectos dañinos no sean visibles, es un factor que puede ocasionar pérdidas en el ecosistema.

La proporción de las diferentes formas biológicas coincide con Villaseñor (2004) para el país y con Rzedowski (2003) para Michoacán. Este último autor menciona que dichas proporciones son propias de floras intertropicales de ambientes moderadamente húmedos. Además, como describe Rzedowski (2006), es común que la vegetación de bosque con coníferas (presente en el ADVC), tenga un sotobosque conformado en su mayoría por herbáceas, ya que siempre está presente este estrato dominante sobre las leñosas y, además, se ve favorecido por incendios, particularmente para las gramíneas, que aquí ocupan el cuarto lugar de diversidad entre las familias. Los incendios que se han presentado no en pocas ocasiones ahí, puede ser también otro factor que influye en la estructura de las formas de vida, puesto que la producción de brotes tiernos de hierbas y arbustos (que luego se aprovechan para pastoreo, una práctica también evidente en el área de estudio) se ve favorecida, lo cual coincide con lo que reporta Rzedowski (2006) en los bosques de encino de México. Por su parte, Verzino y colaboradores han estudiado que la estructura vertical del bosque se altera y se reduce la regeneración y diversidad de estratos como el arbóreo y arbustivo (2005).

Con relación a la semejanza con otros trabajos similares, debe hacerse notar que los datos son parciales, pues el ADCV del cerro Comburinda, no abarca la totalidad del cerro, por lo que será necesario complementar el inventario en toda la elevación para conocer más ampliamente las diferencias y/o aproximaciones en la estructura florística, con lo cual, seguramente, la semejanza florística se modificaría.

La mayor similitud entre en el cerro Patamban con la flora aquí presentada (con una distancia entre ambos de 63 kilómetros), puede deberse a varios factores, entre ellos a que ambas áreas comparten comunidades que involucran a los bosques de *Pinus* con *Quercus* (específicamente la asociación *Pinus – Quercus*, igualmente es la de mayor superficie), además del bosque mesófilo, algunos tipos de suelo y el

clima, a la vez que una especie de la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010) es compartida: *Carpinus caroliniana*, habitando en ambos cerros en bosque mesófilo de montaña.

Señalan Stevenson y Rodríguez (2008), que la composición de especies vegetales de un sitio va a depender de la combinación de historia (manejo, explotación, incendios) vinculada con los procesos bióticos (dispersión, depredación) y abióticos (características del suelo, humedad, temperatura). En este mismo sentido, Rzedowski (2006) reconoce que el hombre ha tenido una influencia importante en la composición florística del bosque de pino al realizar diversas actividades, e igualmente Jiménez *et al.* (2016) mencionan la influencia antropogénica sobre la regeneración, la estructura y la composición de los bosques. En este sentido, en ambas localidades se realizan actividades que afectan y que son evidentes, por ejemplo, la tala clandestina y los desmontes para terrenos destinados a la agricultura. Aunado a esto, Rzedowski (2006) reconoce la influencia de los incendios en la composición y estructura de la vegetación, y en el cerro Comburinda es un fenómeno constante año con año, lo que puede estar influyendo en los valores obtenidos.

Con el cerro del Águila la diferencia florística es más amplia, y no esperada totalmente, considerando que es más cercano (aproximadamente 48 kilómetros) y que comparten algunos tipos de suelo y el clima; el rango altitudinal no está tan alejado y ambos presentan también el bosque de *Pinus - Quercus*. No obstante, una parte del cerro del Águila lo cubre el bosque tropical caducifolio, además de que está rodeado por vastos asentamientos urbanos y carreteras circundantes, lo que ejerce una enorme presión sobre la vegetación y en general sobre sus recursos naturales, aunado al corte de árboles para aprovechamiento de madera y el cambio de uso de suelo para varios tipos de cultivo, actividades que se plantea afectan más negativamente la cubierta vegetal original (Cornejo-Tenorio *et al.*, 2013). Esta última investigación también coincide con la presencia de dos especies en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010): *Cupressus lusitanica* y *Tilia americana*.

Vegetación. Acerca de las especies arvenses, se considera necesario ampliar investigaciones en el estudio de estos ambientes, considerando que Tingambato es uno de los municipios del estado de Michoacán más afectados por el cambio de uso de suelo con

una pérdida de más del 30 % de sus bosques, lo cual está teniendo como consecuencias la fragmentación de los ecosistemas forestales, la erosión del suelo, así como la pérdida de elementos estructurales y funciones del hábitat (Bocco *et al.*, 2001; Chávez-León *et al.*, 2012).

Especies en riesgo. Documentando las especies reportadas en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT, 2010), cinco de ellas no son de distribución limitada: *Cupressus lusitanica* (“cedro blanco”) se distribuye de manera continua en zonas montañosas en 19 estados del país y Guatemala (Zamudio y Carranza-González, 1994; Calderón y Rzedowski, 2005), y en muchos lugares es cultivada (Gernandt y Pérez-De la Rosa, 2014; Silva-Sáenz, 2019). En el caso de *Monotropa hypopitys* (“pipa de indio”), se ha reportado con distribución neártica en bosques de coníferas y encinos, asociada a micorrizas (Calderón y Rzedowski, 2005). Respecto a *Tilia americana* (“cirimo”), especie en Peligro de extinción, tiene una amplia distribución en Norteamérica, habiendo sido registrada desde el sureste de Canadá hasta el sur de México (Pérez-Calix, 2009). La especie *Rhynchosstele cervantesii* (“orquídea lirio”), con estatus de Amenazada, tiene un área de distribución en los estados de Guerrero, Michoacán y Morelos (CONABIO, 2010). Domínguez-Gil (2015) la reporta como la orquídea más abundante y de las más frecuentes en bosque mesófilo de montaña (vegetación donde se colectó en la presente investigación) en el ADVC del cerro de Comburinda, sobre nueve especies de forofitos. Además, Cervantes-Urbe (2018) menciona que la planta es tolerante a la perturbación antrópica de moderada intensidad en ese tipo de vegetación, ya que no tiene especificidad por los forofitos y lo cambia según el grado de perturbación, lo que puede representar una ventaja para adaptarse a distintos ambientes, e incluso el sustrato en sitios perturbados es variable, lo que también le puede beneficiar para establecerse.

La especie *Carpinus caroliniana* (“lechillo”), con estatus de Amenazada, a pesar de que es reportada por Carranza y Madrigal (1995) desde Canadá hasta Guatemala, no es muy abundante; la vegetación donde habita no es extensa, e incluso la consideran vulnerable a la extinción en la zona del Bajío y regiones adyacente. *Hibiscus spiralis* (“arete de indio”), también Amenazada, es ubicada por Calderón y Rzedowski

(2005) en matorrales xerófilos y mencionan que parece estar casi limitada al Valle de México; sin embargo, Villaseñor (2016) la reporta también en la Ciudad de México y en los estados de México, Michoacán, Morelos, Oaxaca, Veracruz y Yucatán. *Phymosia rosea*, especie Sujeta a protección especial, es descrita por Calderón y Rzedowski (2004) como muy escasa en México y a veces cultivada, con distribución desde Jalisco hasta Veracruz y Guatemala, principalmente en la vertiente del pacífico, aunque de acuerdo con Cervantes (1992) y Fryxell (1993), se distribuye desde Chihuahua hasta Guatemala y el Salvador, pero es vulnerable a la extinción; no obstante, también mencionan que en algunos otros sectores se registra como abundante. En el ADVC del cerro Comburinda, se registraron solo dos individuos de esta especie: la localización de uno de ellos fue en el bosque mesófilo de montaña, coincidiendo con lo reportado por Fryxell (1993), mientras que el otro individuo fue registrado en la comunidad arvense (en un cultivo de *Avena sativa*).

Conclusiones

Con este trabajo se da a conocer la diversidad florística del ADVC del cerro de Comburinda, así como la definición de las variantes en la vegetación. La notable presencia de malezas en su flora, se puede interpretar como un ambiente altamente perturbado, pero también especies que traen consigo diversos servicios como la retención de suelo y alimento para la fauna. Dada la actual perturbación derivada de la presencia de actividad humana, esta información es una herramienta que coadyuvará a diversas labores para la planeación, la restauración y el mantenimiento del sitio, así como para dar seguimiento a los cambios en su composición con respecto a las exóticas que vayan introduciendo y, considerando que casi 13 % de la superficie son cultivos, a la presencia de arvenses que invadan el lugar.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a V. W. Steinmann, revisor de algunas Euforbiáceas y de una parte del Abstract. Al personal del herbario IEB del INECOL A. C. Al Centro Regional del Bajío por permitir el cotejo de material botánico. A D. Valentín-Martínez, J. Contreras-León y P. Chamu-Alonso, quienes colaboraron en el campo y

en el laboratorio, y a S. Sales-Magaña quien colaboró en los recorridos de campo. A C. Motuto-Mendoza y C. Zavala-Álvarez por ayudar en la base de datos. A García-Blanco por proporcionar las fotografías y datos de algunas especies. A los revisores anónimos y a la editora del área de Ciencias Biológicas de esta revista, por la revisión del documento.

Referencias

- Alfonso-Corrado, C., Campos-Contreras, J., Sánchez-García, G., Monsalvo-Reyes, A., and Clark-Tapia, R., 2014, Manejo forestal y diversidad genética de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl, & Cham, en Sierra Juárez, Oaxaca: *Madera y bosques*, 20, 2, 11-22. ISSN 2448-7597 (web) 1405-0471 (print). DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2014.202160>
- APG (Angiosperm Phylogeny Group IV), 2016, An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV: *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181, 1, 1-20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Arizaga, S., Martínez-Cruz, J., Salcedo-Cabrales, M., and Bello-González, M.A., 2009, Manual de la biodiversidad de encinos michoacanos: *México, Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. ISBN: 978-968-817-921-5.
- Bello-González, M.A., and Labat, J.N., 1987, Los encinos (*Quercus*) del estado de Michoacán, México: México, Centre d'Études Mexicaines et Centraméricaines y Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, p. 93.
- Bocco, G., Mendoza, M., and Masera, O., 2001, La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación: *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 1, 44, 18-38. ISSN: 0188-4611. <https://doi.org/10.14350/rig.59133>
- Calderón de R., G., and Rzedowski, J., 2004, Manual de malezas de la región de Salvatierra, Guanajuato. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes (fascículo complementario XX): *México, Instituto de Ecología, A. C., Centro Regional del Bajío*, p. 315. ISSN: 0188-5170 ISBN 970-709-050-2.
- Calderón de R., G., and Rzedowski J., 2005, Flora fanerogámica del Valle de México: *México, Instituto de Ecología, A. C., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de*



- la Biodiversidad*, p. 1406. ISBN: 970-9000-17-9 (print) 978-607-7607-36-6 (web).
- Carranza González, E., and Madrigal Sánchez, X., 1994, *Betulaceae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes: Instituto de Ecología, A. C., Centro Regional del Bajío*, 39, 1-22. ISSN 0188-5170 DOI: <https://doi.org/10.21829/fb.239.1995.39>.
- Cervantes-Aceves, N., 1992, *La familia Malvaceae en el estado de Jalisco, México (Colección Flora de Jalisco 3), México, Universidad de Guadalajara, Editorial de la Universidad de Guadalajara*, p. 393. ISBN 10: 9688952915.
- Cervantes-Urbe, J., 2018, *Efecto de la perturbación antrópica en la ecología de Rhynchosstele cervantesii (Orchidaceae) en un Bosque Mesófilo de Montaña Tingambato, Michoacán, México: Tesis de Maestría, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo*, p. 79.
- Chávez-León, G., Tapia Vargas, L.M., Bravo Espinoza, M., Sáenz Reyes, J.T., Muñoz Flores, H.J., Vidales Fernández, I., Larios Guzmán, A., Rentería Ánima, J.B., Villaseñor Ramírez, F.J., Sánchez Pérez, J. de la L., Alcantar Rocillo, J.J., and Mendoza Cantú, M., 2012, *Impacto del cambio de uso de suelo forestal a huertos de aguacate: México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*, p. 116. ISBN: 978-607-425-825-7.
- Christenhusz, M., Reveal, J., Farjon, A., Gardner, M.F., Mill, R.R., and Chase M.W., 2011, *A new classification and linear sequence of extant gymnosperms: Phytotaxa*, 19, 55-70. DOI: <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.19.1.3>
- CONABIO, 2010, *El Bosque Mesófilo de Montaña en México: amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible: México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, p. 197. ISBN: 978-607-7607-35-9.
- CONAGUA, "Servicio Meteorológico Nacional", <https://smn.conagua.gob.mx/es/>, http://smn1.conagua.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=190:michoacan&catid=14:normales-por-estacion [consultado el 10 diciembre de 2016].
- Cornejo-Tenorio, G., Sánchez-García, E., Flores-Tolentino, M., Santana-Michel, F.J., and Ibarra-Manríquez, G., 2013, *Flora y vegetación del cerro del Águila, Michoacán, México: Acta Botánica Mexicana*, 91, 2, 155-180. <https://doi.org/10.17129/botsci.411>
- Cornejo-Tenorio, G., and Ibarra-Manríquez, G., 2011, *Diversidad y distribución del género Salvia (Lamiaceae) en Michoacán, México: Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 4, 1279-1296. <https://dx.doi.org/10.22201/ib.20078706e.2011.4.668>
- Correa-Pérez, G., and Antaramián-Harutunian, A., 2003, *Atlas Geográfico del Estado de Michoacán: México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), EDDISA S. A de C. V.*, p. 309.
- Cué-Bär, E.M., Villaseñor, J.L., Arredondo-Amezcuca, L., Cornejo Tenorio, G., and Ibarra-Manríquez, G., 2006, *La flora arbórea de Michoacán, México: Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 78, 47-81. ISSN: 0366-2128 DOI: <https://10.17129/botsci.1721>
- Domínguez-Gil, I., 2015, *Listado y caracterización ecológica de las orquídeas epífitas del Predio del Tenderio, de la comunidad indígena de Santiago Tingambato, Michoacán, México: Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo*, p. 63.
- Flores-Tolentino, M., Lara-Cabrera, S.I., and Villaseñor, J.L., 2020, *Distribution, richness and conservation of the genus Salvia (Lamiaceae) in the State of Michoacán, Mexico: Biodiversity Data Journal*, 8.e56827, 1-24. DOI: 10.3897/BDJ.8.e56827.
- Fryxell, P.A., 1993, *Malvaceae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes: Instituto de Ecología, A. C., Centro Regional del Bajío*, 16, 153-156. ISSN 0188-5170 DOI: <https://doi.org/10.21829/fb.177.1993.16>
- Fonseca, R.M., 2013, *Pinaceae: Flora de Guerrero*, 58, 1-62. ISBN: 978-607-02-4863-4.
- García, E., 1988, *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: Talleres Larios, S. A.*, p. 220. ISBN-10 (02) 970-32-1010-4.
- Franco López, J., Cruz Agüero, G., Rocha Ramírez, A., Navarrete Salgado, N., Flores Martínez, G., Kato Miranda, E., Sánchez Colon, S., Abarca Arenas, L.G., Bedia Sánchez, C.M., and Winfield Aguilar, I., 1985, *Manual de ecología: México, Trillas*, p. 127. ISBN: 968241721X, 9789682417214
- Gernandt, D.S., and Pérez-de la Rosa, J.A., 2014, *Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México: Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126-133. DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>.
- Herrera-Villanueva, P., Ávila-Díaz, I., López-Toledo, L., Cabrera-Martínez, L., and Villanueva, C.L., 2019, *Ecological characterization of Oncidium reichenheimii with regard to its conservation: Ecology*, 576-587.
- Huerta-Badillo, V.M., 1990, *Estudio florístico del cerro Quinceo, municipio de Morelia, Michoacán, México:*

- Tesis de Licenciatura, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, p. 247.
- INEGI, "Regiones Naturales y Biogeográficas de México", <https://www.inegi.org.mx/> y <https://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/internet/regionesnaturalesbiogeografiamexico.pdf> [consultado el 20 diciembre de 2016].
- INEGI, "Compendio de información geográfica municipal. Tingambato Michoacán de Ocampo. Clave geoestadística 16090", <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825293048> [consultado el 20 enero de 2017].
- INEGI "Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017", https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bv-inegi/productos/nueva_estruc/anuarios_2017/702825092092.pdf [consultado el 19 julio de 2022].
- Jiménez González, A., Pionce Andrade, G.A., Sotolongo Sospedra, R., and Ramos Rodríguez, M.P., 2016, Perturbaciones humanas sobre composición y estructura del bosque semidecíduo mesófilo de la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario, Cuba: *SATHIRI*, 10, 196-206. DOI: <https://doi.org/10.32645/13906925.185>
- Lara-Cabrera, S.I., Bedolla-García, B.Y., Zamudio, S., and Domínguez-Vázquez, G., 2016, Diversidad de Lamiaceae en el estado de Michoacán: *Acta Botánica Mexicana*, 116, 107-149. ISSN: 2448-7589 (web) 0187-7151 (print) DOI: <https://doi.org/10.21829/abm116.2016.1120>
- LPWG (The Legume Phylogeny Working Group), 2017, A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny: *TAXON*, 66, 44-77. DOI: 10.12705/661.3.
- Madrigal-Sánchez, X., 1982, Claves para la determinación de las coníferas silvestres del estado de Michoacán, *Boletín de Divulgación Científica*, p. 100.
- Magaña, D.M., 2017, Respuesta a la solicitud correspondiente al área Natural protegida conocida como el Cerro de Comburinda del municipio de Tingambato con el número de folio 04365: *México, Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático (SEMARNACC)*, p. 1-2.
- Magaña-Lemus, R.E., Ávila-Díaz, I., and Herrerías-Diego Y., 2021, Mating system and female reproductive success of the endemic and endangered epiphyte *Rhynchosstele cervantesii* (Orchidaceae) in a cloud forest in Michoacan, Mexico: *Plant Ecology and Evolution*, 154, 56-62. DOI: <https://doi.org/10.5091/plecevo.2021.1551>
- Martínez-De La Cruz, I., Villaseñor, J. L., Aguilera-Gómez, L., and Rubí-Arriaga, M., 2018, Angiospermas nativas documentadas en la literatura para el estado de México: *Acta Botánica Mexicana*, 124, 135-217. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm124.2018.1273>
- Martínez-Gordillo, M., Fragoso-Martínez, I., García-Peña, M. del R., and Montiel, O., 2013, Géneros de Lamiaceae de México, diversidad y endemismo: *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 84, 30-86. ISSN: 2007-8706 (web) 1870-3453 (print) DOI: <https://doi.org/10.7550/rmb.30158>
- 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., and Zamudio, S., 2017, Lamiaceae de México: *Botanical science*, 95, 4, 780-806. ISSN: 2007-4476 (web) 2007-4298 (print) DOI: 10.17129/botsci.1871.
- Martínez, M., Vargas-Ponce, O., Rodríguez, A., Chiang, F., and Ocegueda, S., 2017, Solanaceae family in México: *Botanical Sciences*, 95, 1, 131-145. DOI: <https://doi.org/10.17129/botsci.658>
- Martínez-Gordillo, M., Jiménez-Ramírez, J., Cruz-Durán, R., Juárez-Arriaga, E., García, R., Cervantes A., and Mejía-Hernández, R., 2002, Los géneros de la familia *Euphorbiaceae* en México: *Anales del Instituto de Biología*, 73, 2, 115-281. ISSN: 0374-5511 DOI: <https://doi.org/10.21829/abm61.2002.909>
- McVaugh, R., 1984, "Compositae", in W. Anderson, ed., *Flora Novo-Galiciana 12: Ann Arbor*: University of Michigan Press, 1-1157. ISBN: 0-472-04812-0.
- McVaugh, R., 1985, "Orchidaceae", in W. Anderson, ed., *Flora Novo-Galiciana 16: Ann Arbor*: University of Michigan Press, 1-363. ISBN: 0-472-04816-3.
- McVaugh, R., 1987, "Leguminosae", in W. Anderson, ed., *Flora Novo-Galiciana 5: Ann Arbor*: University of Michigan Press, 1-786. ISBN: 0-472-04968-2
- McVaugh, R. 1989. "Bromeliaceae to Dioscoreaceae", in W. Anderson, ed., *Flora Novo-Galiciana 15, Ann Arbor*: University of Michigan Press, 1-398. ISBN: 0-9620733-0-X.
- McVaugh, R., 2001, "Ochnaceae to Loasaceae", in W. Anderson, ed., *Flora Novo-Galiciana 3. Ann Arbor*: University of Michigan Press, 1-751. ISBN: 0-9620733-5-0.



- Navia, A.J., and Cumana, N.I., 2011, Establecimiento de un área natural protegida en la categoría de área voluntaria para la conservación en la Comunidad Indígena de Santiago Tingambato, Michoacán "Cerro Comburinda": *México, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada (GIRA)*, p. 78.
- Pérez-Calix, E., 2009, Tiliaceae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes: *Instituto de Ecología, A. C., Centro Regional del Bajío*, 160, 1-40. DOI: <https://doi.org/10.21829/fb.88.2009.160>
- PPG I (The Pteridophyte Phylogeny Group), 2016, A community-derived classification for extant lycophytes and ferns: *Journal of Systematics and Evolution*, 54, 563-603. DOI: <https://doi.org/10.1111/jse.12229>
- Raya-Lemus, E., 2017, Áreas de conservación voluntaria: esquemas alternativos en la conservación de tierras forestales en Michoacán: Tesis de Maestría, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, p. 240.
- Rojas Chávez, S., and Vibrans, H., "Catálogo de Malezas de México: Familia Brassicaceae (Cruciferae)", <https://docplayer.es/95390968-Catalogo-de-malezas-de-mexico-familia-brassicaceae-cruciferae-sonia-rojas-heike-vibrans.html> [consultado el 20 diciembre de 2015].
- Rzedowski, J., 1991, El endemismo de la flora fanerogámica mexicana: una apreciación analítica preliminar: *Acta Botánica Mexicana*, 15, 47-64. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm15.1991.620>
- Rzedowski, J., 1992, Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México: *Ciencias*, 14, 47-56. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm14.1991.611>
- Rzedowski, J., "Vegetación de México", Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMx_Cont.pdf [consultado el 19 julio de 2022].
- Rzedowski, J., 1996, Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México: *Acta Botánica Mexicana*, 35, 25-44. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm35.1996.955>
- Sánchez-González, A., and López-Mata, L., 2003, Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal: *Anales del Instituto de Biología. (Serie Botánica)*, 74, 1, 47-71. ISSN: 0374-5511.
- Sánchez-González, A. y González L.M., 2007, "Técnicas de recolecta y herborización de plantas", in R.A. Contreras, I. Goyenechea, C. Cuevas and U. Iturbe, *La Sistemática, base del conocimiento de la biodiversidad*, México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, pp. 177-193. ISBN 970-769-099-2.
- Sánchez-Ken, J.G., 2019, Riqueza de especies, clasificación y listado de gramíneas (Poaceae) de México, *Acta Botánica Mexicana*, 126, 1-73. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1379>.
- Sánchez-Ken, J.G., Zita-Padilla G.A., and Mendoza-Cruz, M., 2012, Catálogo de malezas gramíneas nativas e introducidas de México: *México, Consejo Nacional Consultivo Fitosanitario*, p. 433.
- Sánchez-Rodríguez M., 2007, "Jacona. Historia de un pueblo y su desencuentro con el agua", in E. Cárdenas et al., *Informe Final de la Primera Etapa del proyecto Reserva Patrimonial del Curutarán, Zapopan, Jalisco, México*, México, Academia Mexicana de Paisaje, pp. 371-392. ISBN 978-607-97707-1-6.
- SEMARNAT, "Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMAT-NAT-2010: Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo", https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091#:~:text=Esta%20Norma%20Oficial%20Mexicana%20tiene,riesgo%20para%20las%20es [consultado el 10 febrero de 2022].
- Silva-Sáenz, P., 2019, "Gimnospermas: ahuehuetes, cedros, pinos y cícadas", in CONABIO, *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2, vol. II*, Ciudad de México, CONABIO, pp. 203-223. ISBN 978-607-8570-33-1 (Obra completa), 978-607-8570-35-5 (Volumen II).
- Stevenson, P.R., and Rodríguez, M.E., 2008, Determinantes de la Composición Florística y Efecto de Borde en un Fragmento de Bosque en el Guaviare, Amazonía Colombiana: *Colombia Forestal*, 11, 5-18. DOI: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2008.1.a01>
- Torres Rodríguez, L., 1994, Contribución al conocimiento de las plantas vasculares del Cerro Patamban, municipio de Tangancicuaro y los Reyes Michoacán, México: Tesis de Licenciatura, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, p. 88.
- Velásquez V., E., Rivera V., G., Pérez F., M.A., and Cortázar C., A., 2014, "Introducción de especies exóticas: implicaciones para la biodiversidad", in C.L. Miceli M., and F.

de J. Reyes E., *Biodiversidad y sustentabilidad. Volumen II*, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, pp. 113-167. ISBN: 978-607-8410-16-3.

Verzino, G., Joseau, J., Dorado, M., Gellert, E., Rodríguez R., G., and Nóbile, R., 2005, Impacto de los incendios sobre la diversidad vegetal, sierras de Córdoba, Argentina: *Ecología Aplicada*, 25-34. ISSN 1726-2216 (print).

Vibrans, H., and Tenorio-Lezama, P., "Malezas de México", <https://www.gob.mx/conabio/>, <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/home-malezas-mexico.htm> [consultado el 10 febrero de 2022].

Villanueva, M.G., 1993, Autoecología de *Podocarpus reichei* en el Cerro de Comburinda de los municipios de Pátzcuaro, Salvador Escalante y Tingambato, Michoacán: Tesis de Licenciatura, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, p. 75.

Villaseñor, J.L., 2004, Los géneros de plantas vasculares de la flora de México: *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 105-135. ISSN: 0366-2128 DOI: <https://10.17129/botsci.1694>

Villaseñor, J.L., 2016, Checklist of the native vascular plants of Mexico: *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87, 3, 519-902. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>

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

Villaseñor, J.L., and Espinosa G., F.J., 1998, Catálogo de Malezas de México: *México, Fondo de Cultura Económica*, p. 448. ISBN 9789681658786

Zamudio, S., and Carranza-González, E., 1994, Cupressaceae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes: *Instituto de Ecología, A. C., Centro Regional del Bajío*, 29, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.21829/fb.229.1994.29>

Zamudio S., and Carranza G., E., 2019, "Angiospermas", in CONABIO, *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado 2, vol. II*, Ciudad de México, CONABIO, pp. 229-238. ISBN 978-607-8570-33-1 (Obra completa), 978-607-8570-35-5 (Volumen II).

APÉNDICE

Listado florístico y de vegetación del Área Destinada Voluntariamente a la Conservación Cerro de Comburinda municipio de Tingambato, Michoacán, México.

Simbología: Tipo de vegetación: bosque de *Pinus-Quercus* (BPE), bosque de *Quercus-Pinus* (BEP), bosque de *Pinus* (BP), bosque de *Quercus* (BE), bosque mesófilo de montaña (BMM), comunidad de plantas arvenses (ARV). **Forma Biológica:** hierba erecta (HE), hierba epífita (HEP), hierba trepadora (HT), hierba decumbente (HD), hierba rastrera (HR), árbol (AR), arbusto (AB), arbusto trepador (ABT), parásita (P), acaule (AC). **€ Otros colectores:** Horalia Díaz Barriga (HDB), Sergio Zamudio Ruiz (SZR), M. Cruz E. y T. Platas H (CyP), José Arnulfo Blanco García (JABG). **Herbarios:** Herbario del Instituto de Ecología A.C. (IEB); Herbario Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México (MEXU). *Malezas. ° Introducidas al país. **Endémicas.

FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
LYCOPODIOPSIDA					
Selaginellaceae					
<i>Selaginella pallescens</i> (C. Presl) Spring		262	2029	ARV	HE
POLYPODIOPSIDA					
Aspleniaceae					
<i>Asplenium monanthes</i> L.		221, 222, 223	2581- 2636	BPE, BE, BEP	HE



FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
Blechnaceae					
<i>Blechnum occidentale</i> L.		227, 231	2400- 2414	BPE, BMM	HE
Dennstaedtiaceae					
<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn		305	2400	BP, BEP, BPE	HE
Dryopteridaceae					
<i>Dryopteris pseudofilix-mas</i> (Fée) Rothm.		230	2414	BPE, BP, BEP	HE
<i>Dryopteris rossii</i> C. Chr.	**	20	2448	BPE, BP	HE
<i>Dryopteris wallichiana</i> (Spreng.) Hyl.		229	2431	BPE	HE
<i>Phanerophlebia nobilis</i> (Schltdl. & Cham.) C. Presl		45	2590	BMM, BPE	HE
<i>Botrychium virginianum</i> (L.) Sw.		46	2580	BPE, BP, BE	HE
Polypodiaceae					
<i>Pecluma alfredii</i> (Rosenst.) M. G. Price		86	2366	BEP, BMM	HEP
<i>Pleopeltis angusta</i> Humb. & Bonpl. ex Willd. var. <i>angusta</i>		74	2366	BPE, BMM	HEP
<i>Pleopeltis mexicana</i> (Fée) Mickel & Beitel		18	2440	BPE, BMM	HE
<i>Polypodium subpetiolatum</i> Hook.		306	2450	BPE, BMM	HE
Pteridaceae					
<i>Adiantum andicola</i> Liebm.		185	2439	BPE, BP, BMM	HE
<i>Adiantum capillus-veneris</i> L.		228, 286	2638- 2414	BPE, BP, BMM	HE
<i>Pteris cretica</i> L.		9, 94	2352- 2411	BPE/BMM	HE
<i>Pteris orizabae</i> M. Martens & Galeotti		219, 224	2532- 2638	BPE	HE
<i>Pteris tripartita</i> Sw.		304	2400	BPE	HE
Thelypteridaceae					
<i>Thelypteris patens</i> (Sw.) Small		184	2439	BPE	HE
PINIDAE					
Cupressaceae					
<i>Cupressus lusitanica</i> Mill.		203	2203	BPE	AR
Pinaceae					
€ <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltdl. & Cham.		JABG- 640	2300	BPE	AR
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.		95, 213	2647- 2700	BPE, BP	AR
<i>Pinus pseudostrobus</i> Brongn.		173, 301	2680	BPE, BP	AR
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	**	302	2681	BPE, BP	AR
<i>Pinus teocote</i> Schlecht. & Cham		303	2700	BPE, BP	AR
MAGNÓLIIDAE					
Piperaceae					

FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
<i>Peperomia bracteata</i> A. W. Hill		125	2386	BEP, BMM, BE	HE
* <i>Peperomia hispidula</i> (Sw.) A. Dietr.		93, 113	2347- 2492	BEP, BPE, BMM	HEP
<i>Peperomia leptophylla</i> Miq.		208	2571	BPE, BMM, BE	HEP
* <i>Peperomia quadrifolia</i> (L.) Kunth		91	2365	BEP, BMM, BE	HE
<i>Peperomia umbilicata</i> Ruiz & Pav.		244	2767	BPE, BMM, BE	HE
€ <i>Piper uhdei</i> C. DC.	**	CyP-71 (IEB)	2400	BMM	HE
Papaveraceae					
* <i>Bocconia frutescens</i> L.		22	2533	BPE	AB
Ranunculaceae					
* <i>Ranunculus macranthus</i> Scheele		75	2627	BPE, BP, BE	HE
* <i>Thalictrum gibbosum</i> Lecoy.	**	56	2415	BPE	HE
MONOCOTILEDÓNEAS					
Araceae					
<i>Arisaema macrospatum</i> Benth.	**	272	2199	BEP	HE
Amaryllidaceae					
* <i>Hymenocallis harrisiana</i> Herb.	**	284	2083	BPE, ARV	HE
Alstroemeriaceae					
<i>Bomarea edulis</i> (Tussac) Herb.		44, 139	2583	BPE, BP	HT
Asparagaceae					
* <i>Echeandia flavescens</i> (Schult. & Schult. f.) Cruden		116	2414	BPE, ARV	HE
Bromeliaceae					
<i>Tillandsia dugesii</i> Baker	**	266	2477	BPE, BMM	AC
<i>Tillandsia</i> L.		220	2638	BPE	AC
Commelinaceae					
* <i>Commelina tuberosa</i> L.		29	2582	BPE	HE
<i>Tradescantia commelinoides</i> Schult. & Schult. f.		63	1899	BMM	HE
Dioscoreaceae					
* <i>Dioscorea convolvulacea</i> Schldl. & Cham.		30, 280	2083	BPE	HT
Hydroxylaceae					
* <i>Hypoxis mexicana</i> Schult. & Schult. f.		48, 277	2472- 2481	BPE, BP, ARV	HE
Iridaceae					
<i>Nemastylis tenuis</i> (Herb.) Benth. & Hook. f. ex S. Watson		279	2255	BPE, ARV, BP	HE
* <i>Sisyrinchium scabrum</i> Cham. & Schldl.		83	2638	BPE, ARV	HE
* <i>Sisyrinchium toluense</i> Peyr.	**	34	2472	BPE, BP	HE
<i>Tigridia pulchella</i> B. L. Rob.	**	206	2414	BPE	HE



FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
Orchidaceae					
<i>Corallorhiza maculata</i> (Raf.) Raf.		248	2490	BP, BE, BMM	HE
<i>Erycina hyalinobulbon</i> (Lex.) N. H. Williams & M. W. Chase	**	299	2209	BEP	
<i>Goodyera striata</i> Rchb. f.		148	2500	BPE, BE, BMM	HE
<i>Govenia liliacea</i> (Lex.) Lindl.		10	2411	BPE, BMM, BP	HE
<i>Habenaria clypeata</i> Lindl.		47, 114, 117	2488- 2765	BPE, BMM	HE
<i>Malaxis fastigiata</i> (Reichb. F.) Kuntze		25, 258	2254- 2558	BPE, BMM	HE
<i>Rhynchosstele cervantesii</i> (Lex.) Soto Arenas & Salazar	**	175	2710	BMM	HEP
<i>Aulosepalum pyramidale</i> (Lindl.) M. A. Dix & M. W. Dix		239	2170	BPE, BE	HE
<i>Sarcoglottis schaffneri</i> (Rchb.f.) Ames		205, 250, 298	1911- 2208	BPE	HE
* <i>Trichocentrum pachyphyllum</i> (Hook.) R. Jiménez & Carnevali	**	305	2199	BPE, ARV	HEP
Poaceae					
* <i>Agrostis schaffneri</i> E. Fourn.	**	287	2676	Arv	HE
* <i>Bothriochloa saccharoides</i> (Sw.) Rydb.		6	2403	BPE	HE
° <i>Bromus catharticus</i> Vahl		32	2558	BPE, ARV	HE
<i>Bromus dolichocarpus</i> Wagnon		8, 243	2460- 2751	BPE	HE
* <i>Eragrostis intermedia</i> Hitchc.		101	2373	BEP, ARV	HP
* <i>Muhlenbergia cenchroides</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) P. M. Peterson.		129	2258	BPE, BP	HE
* <i>Paspalum prostratum</i> Scribn. & Merr.		255	2282	BP, ARV	HE
° <i>Pennisetum clandestinum</i> Hochst. ex Chiov.		5	2476	BPE	HE
<i>Piptochaetium fimbriatum</i> (Kunth) Hitchc.		127	2318	BPE	HE
* <i>Sporobolus indicus</i> (L.) R. Br.		259	2320	BPE	HE
<i>Zeugites americanus</i> Willd.		118	2414	BPE	HE
EUDICOTILEDÓNEAS					
Acanthaceae					
<i>Pseuderanthemum praecox</i> (Benth.) Leonard		201	2103	BPE	HE
Amaranthaceae					
* <i>Iresine diffusa</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.		109	2412	BPE	AB
Anacardiaceae					
* <i>Toxicodendron radicans</i> (L.) Kuntze		233	2309	BPE	HE
Apiaceae					
<i>Arracacia atropurpurea</i> (Lehm.) Hemsl.		23, 106, 212	2646- 2677	BMM/ BPE	HT

FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
* <i>Cyclospermum leptophyllum</i> (Pers.) Sprague ex Britton & P. Wilson.		209, 267	2035- 2532	BPE	HE
Apocynaceae					
<i>Asclepias similis</i> Hemsl.		67, 144	2244- 2430	BPE	HE/HD
<i>Gonolobus uniflorus</i> Kunth		241	1953	BPE	HE
Araliaceae					
<i>Oreopanax echinops</i> (Schltdl. & Cham.) Decne. & Planch.		98	2419	BPE, BMM	AR
Asteraceae					
<i>Ageratina</i> L.		186	2434	BEP	HE
* <i>Ageratina maireriana</i> (DC.) R. M. King & H. Rob.		188	2399	BEP	HE
<i>Archibaccharis schiedeana</i> (Benth.) J. D. Ja- cks.		42	2450	BPE	HT
<i>Baccharis heterophylla</i> Kunth		193	2689	BP	HE
* <i>Barkleyanthus salicifolius</i> (Kunth) H. Rob. & Brettell		235	2147	BPE	HE
<i>Bidens ostruthioides</i> (DC.) Sch. Bip.		33, 103, 145	2415- 2448	BPE	HE
<i>Brickellia squarrosa</i> B. L. Rob. & Seaton	**	192	2723	BP	HE/HD
<i>Cirsium subcoriaceum</i> (Less.) Sch. Bip.		151, 180	2643- 2718	BPE	HE
* <i>Cirsium raphilepis</i> (Hemsl.) Petr.	**	153	2643	BPE	HE
<i>Cosmos parviflorus</i> (Jacq.) Pers.		106	2332	BEP	HE
<i>Cosmos crithmifolius</i> Kunth		107	2365	BP	HE
* <i>Erigeron galeottii</i> (A. Gray) Greene.	**	27	2582	BPE, ARV	HE
* <i>Erigeron longipes</i> DC.		195	2690	Arv, BPE, BP	HE
* <i>Erigeron variifolius</i> S. F. Blake		110	2487	BPE	HE
* <i>Gamochaeta americana</i> (Mill.) Wedd.		216	2636	BEP, BP	HE
* <i>Heterotheca inuloides</i> Cass.	**	82	2531	BPE, ARV, BP	HE
* <i>Jaegeria hirta</i> (Lag.) Less.		59, 120	2414- 2415	BPE, ARV	HE
* <i>Montanoa frutescens</i> Mairet ex DC.	**	115	2641	BPE, BP, BMM	HE
* <i>Pinaropappus roseus</i> (Less.) Less.		240, 245	2170- 2650	BPE, BP, ARV	HE
* <i>Piqueria trinervia</i> Cav.		76	2715	ARV	HE
* <i>Pseudognaphalium luteoalbum</i> (L.) Hilliard & B.L. Burt		257	2322	BPE	HE
<i>Pseudognaphalium semiamplexicaule</i> (DC.) Anderb.		196	2532	BP	HE
<i>Rumfordia floribunda</i> DC.	**	282	1953	BPE, BP	HE
* <i>Sigesbeckia jorullensis</i> Kunth		132	2756	BPE, BP	HE
* <i>Stevia ovata</i> Willd. var. <i>ovata</i>		128	2281	BPE	HE



FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
<i>Stevia subpubescens</i> Lag.	**	176	2611	BPE	HE
* <i>Tagetes filifolia</i> Lag.		198	2287	BPE, ARV	HE
* <i>Tagetes lunulata</i> Ortega	**	143	2332	BPE, ARV	HE
° <i>Taraxacum officinale</i> F. H. Wigg.		168	2210	BPE, ARV, BP	HE
* <i>Vernonia alamanii</i> DC.	**	234	2165	BPE, ARV	HE
Begoniaceae					
<i>Begonia balmisiana</i> Balmis	**	264	2029	BPE, BMM, BE	HE
Betulaceae					
<i>Alnus acuminata</i> Kunth subsp. <i>arguta</i> (Schltdl.) Furlow.		133, 157	2733- 2754	BPE, BMM	HE
€ <i>Carpinus caroliniana</i> Walter		JABG- 641	2300	BPE	AR
Brassicaceae					
° <i>Brassica rapa</i> L.		79	2690	BPE, ARV	AR
* <i>Lepidium virginicum</i> L.		268	2030	ARV	HE
° <i>Raphanus raphanistrum</i> L.		294	2627	BPE, ARV	HE
Cactaceae					
<i>Disocactus speciosus</i> (Cav.) Barthlott		21	2448	BPE	HE
Campanulaceae					
* <i>Diastatea micrantha</i> (Kunth) McVaugh		19, 37, 205	2213- 2472	BPE	HE
* <i>Lobelia fenestralis</i> Cav.		80	2690	BPE, BP	HE
Caprifoliaceae					
<i>Valeriana scandens</i> L.		264	2643	BPE	HT
<i>Valeriana urticifolia</i> Kunth		84	2641	BPE	HE
Cistaceae					
<i>Helianthemum coulteri</i> S. Watson		197	2532	BP	HE
Clethraceae					
<i>Clethra mexicana</i> DC.		300	2450	BEP, BMM	AR
Convolvulaceae					
* <i>Cuscuta corymbosa</i> Ruiz & Pav. var. <i>grandiflora</i> Engelm.		4, 161	2444- 2694	BPE, BMM	HT/P
* <i>Ipomoea orizabensis</i> (G. Pelletan) Ledeb. ex Steud.		289, 295	2190	BPE	HT
Cucurbitaceae					
<i>Cyclanthera tamnoides</i> (Willd.) Cogn.	**	121	2414	BPE	HT
Ericaceae					
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth		174	2171	BP	HT
€ <i>Comarostaphylis discolor</i> (Hook.) Diggs		HDB- 5221 (MEXU)	2600	BP	AR

FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
<i>Monotropa hypopitys</i> L.		207	2688	BPE, BP, BMM	AR
Euphorbiaceae					
<i>Acalypha mollis</i> Kunth		281	2080	BP	HE
<i>Euphorbia schiedeana</i> (Klotzsch & Garcke) Mayfield ex C. Nelson		249	2761	BPE	HE
<i>Euphorbia xalapensis</i> Kunth		50	2472	BPE, BMM, BP, BE	HE
Fabaceae					
* <i>Astragalus strigosus</i> Kunth	**	12	2420	BPE	HE
* <i>Calliandra grandiflora</i> (L'Hér.) Benth.		202, 271	2207- 2199	BPE, ARV	HE
<i>Cologania biloba</i> (Lindl.) G. Nicholson		141	2458	BPE, PEP	AB
* <i>Cologania broussonetii</i> (Balb.) DC.		89, 104	2281- 2375	BEP, BPE	HT
* <i>Crotalaria pumila</i> Ortega		171	2636	BPE, ARV	HT
* <i>Crotalaria rotundifolia</i> J. F. Gmel.		60	2415	BPE	HE
<i>Dalea leucostachya</i> A. Gray	**	87	2689	BPE	HE
<i>Desmodium alamanii</i> DC.	**	172	2359	BPE	HE
<i>Desmodium intortum</i> (Mill.) Urb.		179, 247	2556	ARV	HT
<i>Desmodium orbiculare</i> Schldl.		169	2363	BPE, ARV	HR
<i>Lupinus montanus</i> Kunth		107	2765	BPE	HE
°* <i>Medicago lupulina</i> L.		194	2684	BP	AB
<i>Mimosa albida</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.		291	2130	BPE	AB
* <i>Phaseolus coccineus</i> L.		13, 100, 189,	2386- 2430	BPE, BEP	HD
* <i>Trifolium amabile</i> Kunth		51	2384	BPE	HT
* <i>Vicia humilis</i> Kunth		119	2414	BPE	HT
Fagaceae					
<i>Quercus candicans</i> Née		296	2558	BPE, BE	HT
€ <i>Quercus obtusata</i> Bonpl.		JABG- 645	2300	BPE	AR
<i>Quercus laurina</i> Bonpl.		26, 211, 297	2558- 2562	BPE, BE	AR
<i>Quercus martinezii</i> C. H. Mull.	**	126	2364	BPE, BE	AR
Gentianaceae					
<i>Halenia brevicornis</i> (Kunth) G. Don		178	2414	BPE, BE	AR
Geraniaceae					
* <i>Geranium seemanii</i> Peyr.		52, 71, 183	2384- 2530	BPE	HE
Heliotropiaceae					
* <i>Tournefortia densiflora</i> M. Martens & Galeotti		236	2147	BPE	HE



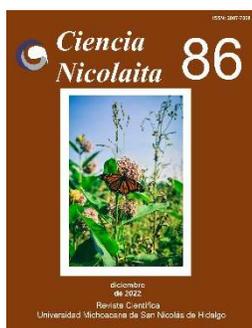
FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
Hydrangeaceae					
<i>Philadelphus mexicanus</i> Schltldl.		225	2402	BEP	ABT
Hydrophyllaceae					
* <i>Phacelia platycarpa</i> (Cav.) Spreng.		31, 200	2408- 2472	BPE, BP, ARV	HE
Hypericaceae					
<i>Hypericum philonotis</i> Schltldl. & Cham.		108, 252	2476- 2485	BPE, BP	HE
Lamiaceae					
<i>Agastache mexicana</i> Linton & Epling		278	2429	BPE	HE
* <i>Lepechinia caulescens</i> (Ortega) Epling		68	2365	BPE	HE
* <i>Prunella vulgaris</i> L.		7	2408	BPE, ARV	HE
* <i>Salvia clinopodioides</i> Kunth	**	122	2016	BPE	HE
<i>Salvia elegans</i> Vahl	**	155	2608	BPE	HE
* <i>Salvia gesneriiflora</i> Lindl. & Paxton	**	158	2724	BMM, BPE	HE
<i>Salvia iodantha</i> Fernald	**	130, 140	2239- 2406	BEP	HE
* <i>Salvia lavanduloides</i> Kunth		170	2700	BPE, BP	HE
<i>Salvia mexicana</i> L.	**	124	2551	BPE	HE
<i>Salvia plurispicata</i> Epling	**	131, 152	2702	BPE, BP	HE
* <i>Salvia polystachia</i> Cav.		292	2415	BPE	HE
<i>Scutellaria dumetorum</i> Schltldl.		49, 65, 111	2457- 2472	BPE, BMM	HE
* <i>Stachys coccinea</i> Ortega		105	2318	BPE	HE
Malvaceae					
* <i>Hibiscus spiralis</i> Cav.	**	85	2366	BEP, BMM, BP, ARV	HE
* <i>Kearnemalvastrum lacteum</i> (Aiton) D. M. Bates		81, 142	2425- 2468	BPE	AB
* <i>Neobrittonia acerifolia</i> (G. Don) Hochr.		137	2442	BPE, BMM, BP	HE
<i>Phymosia rosea</i> (DC.) Kearney		165	2667	BMM, ARV	HE
* <i>Sida rhombifolia</i> L.		15, 167	2175- 2415	BPE, ARV	HE
€ <i>Tilia americana</i> L.		JABG- 644	2300	BMM	AR
Myrtaceae					
<i>Myrcianthes fragrans</i> (Sw.) McVaugh		221-222	2329- 2402	BEP-BPE	AR
Onagraceae					
<i>Fuchsia microphylla</i> Kunth		147	2425	BPE, BP	HE
<i>Fuchsia thymifolia</i> Kunth		43, 149	1540- 2425	BPE, BP	AB

FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
<i>*Lopezia racemosa</i> Cav.		77	2641- 2715	ARV, BPE	HE
<i>*Oenothera pubescens</i> Willd. ex Spreng.		78, 117	2646	BPE	HE
<i>*Oenothera rosea</i> L'Hér. ex Aiton		238	2151	BPE	HE
<i>*Oenothera suffrutescens</i> (Ser.) W. L. Wagner & Hoch		246	2655	ARV	HE
Orobanchaceae					
<i>Castilleja lithospermoides</i> Kunth	**	159	2742	BPE	HE
<i>Castilleja tenuiflora</i> Benth.		164	2742	BMM	HE
<i>Conopholis alpina</i> Liebm.		153, 217	2442	BPE, BP, BMM	HEP
<i>Lamourouxia xalapensis</i> Kunth		135, 293	2457	BPE	HE
Oxalidaceae					
<i>Oxalis alpina</i> (Rose) Rose ex R. Kunth		270	2690	ARV, BPE	HE
<i>*Oxalis hernandezii</i> DC.	**	53	2386	BPE	HE
Passifloraceae					
<i>Passiflora biflora</i> Lam.		263	2114	ARV, BPE	HE
<i>*Passiflora subpeltata</i> Ortega		273	2159	BPE	HT
Phytolaccaceae					
<i>*Phytolacca icosandra</i> L.		40, 134	2399- 2404	BPE, BMM	HT
Plantaginaceae					
<i>Penstemon campanulatus</i> (Cav.) Willd.		276	2429	BPE	HE
<i>*Plantago australis</i> Lam.		17	2416	BPE, ARV	HE
<i>Sibthorpia repens</i> (L.) Kuntze		242	2666	BPE	HE
Polemoniaceae					
<i>*Loeselia glandulosa</i> (Cav.) G. Don		166	2179	BPE	HD
Polygalaceae					
<i>Monnina ciliolata</i> Sessé & Moc. ex DC.	**	69, 160, 163	2179- 2742	BPE, BMM	HR
<i>Polygala mexicana</i> Moc. ex Cav.	**	261	2532	BP	AB
Polygonaceae					
<i>Rumex mexicanus</i> Meisn.		256	2322	BPE, ARV	HE
Primulaceae					
<i>*Lysimachia arvensis</i> (L.) U. Manns & An- derb.		283	2738	ARV	HE
Rhamnaceae					
<i>Ceanothus caeruleus</i> Lag.		187, 260	2425	BEP/ BEP	HR
<i>Frangula hintonii</i> (M. C. Johnst. & L. A. Johnst.) A. Pool	**	218	2532	BPE	AB
Rosaceae					



FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
<i>*Acaena elongata</i> L.		102	2457	BPE	HE
<i>Alchemilla aphanoides</i> Mutis ex L. f.		35	2583	BPE	HE
<i>Alchemilla sibbaldiifolia</i> Kunth		57	2415	BPE	HE
<i>Crataegus mexicana</i> DC.		2	2438	BPE, BP, ARV	HE
<i>Duchesnea indica</i> (Andrews) Teschem.		254	2281	BPE	ABT
<i>Rubus liebmannii</i> Focke	**	138	2355	BPE, ARV	ABT
<i>Rubus pringlei</i> Rydb.		96	2581	BPE, ARV	AB
Rubiaceae					
<i>*Bouvardia ternifolia</i> (Cav.) Schltld.		274	2044	BPE	HE
<i>Crusea coccinea</i> DC.		3	2437	BPE, BMM, BP	HE
<i>*Didymaea alsinoides</i> (Schltld. & Cham.) Standl.		285	2620	BPE	HR
<i>Galium texense</i> A. Gray		112	2441	BPE	HR
<i>Spermacoce laevis</i> Lam.		54, 58	2415	BPE	HT
<i>*Spermacoce suaveolens</i> (G. Mey.) Kuntze		290	2191	BPE	HE
Sabiaceae					
<i>Meliosma dentata</i> (Liebm.) Urb.		1	2408	BPE	HE
<i>Smilax mollis</i> Humb. & Bonpl. ex Willd.		36, 253	2224- 2583	BPE	ABT
Scrophulariaceae					
€ <i>Buddleja parviflora</i> Kunth	**	HDB- 5206 (MEXU)	2700	BEP	AB
Solanaceae					
<i>Cestrum thyrsoideum</i> Kunth		28, 123, 146	2101	BPE, BP, BMM, BEP	HT
<i>Lycianthes pringlei</i> (B. L. Rob. & Greenm.) Bit- ter	**	232	2270	BPE, BP	HE
<i>Physalis volubilis</i> Waterf.	**	275	2481	BP	HE
<i>Solanum</i> L.		90	2336	BEP	HR
<i>Solanum appendiculatum</i> Dunal		99, 251	2382- 2652	BPE	HE
<i>Solanum pubigerum</i> Dunal		190	2337	BEP	HE
<i>*Solanum lanceolatum</i> Cav.	**	182	2641	BP	AB
<i>*Solanum nigrescens</i> M. Martens & Galeotti		38	2442	BPE	HE
€ <i>Solanum nigricans</i> M. Martens & Galeotti		CyP-120 (IEB)	2400	BMM	AB
<i>Solanum verrucosum</i> Schltld.	**	41	2433	BPE	HE
Styracaceae					
<i>Styrax argenteus</i> C. Presl		62	1899	BMM	HE
€ <i>Styrax ramirezii</i> Greenm. var. <i>ramirezii</i>	**	CyP - 108; SZR-	2250- 2350	BMM	AR

FAMILIA / NOMBRE CIENTIFICO/AUTOR	Endémica	No. colecta	Altitud (msnm)	Tipo (s) de vegetación	Forma Biológica
		9334 (MEXU)			
Theaceae					
€ <i>Ternstroemia lineata</i> DC. subsp. <i>lineata</i>		CyP-93 (IEB y MEXU)	2400	BMM	AR
Urticaceae					
* <i>Phenax hirtus</i> (Sw.) Wedd.		16, 97	2419	BPE	AB
Verbenaceae					
<i>Lippia mexicana</i> G. L. Nesom	**	214	2627	BPE	HE
<i>Priva aspera</i> Kunth		265	2033	ARV	HE
* <i>Verbena bipinnatifida</i> Nutt.		61, 72	2417- 2530	BPE, BP	AB
* <i>Verbena recta</i> Kunth	**	39	2442	BPE, BP	HE
Viburnaceae					
<i>Viburnum acutifolium</i> Benth. var. <i>microphyllum</i> (Oerst.) Villarreal & A. E. Estrada		204	2308	BPE, BE	HE
Vitaceae					
<i>Vitis tiliifolia</i> Humb. & Bonpl. ex Schult.		226	2427	BPE, BEP	HE



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Vislumbrando la diversidad de clinostomidos (Platyhelminthes: Digenea), parásitos asociados a peces y aves acuáticas en México y Centroamérica mediante información obtenida de la biología molecular

Looking at the diversity of clinostomids (Platyhelminthes: Digenea), parasites associated with fish and water birds in Mexico and Central America by molecular and biological information

Ana Lucia Sereno-Uribe, Alejandra López-Jiménez, Mirza Patricia Ortega-Olivares, Leopoldo Andrade-Gómez, Marcelo Tonatiuh González-García y Martín García-Varela

Para citar este artículo: Ana Lucia Sereno-Uribe, Alejandra López-Jiménez, Mirza Patricia Ortega-Olivares, Leopoldo Andrade-Gómez, Marcelo Tonatiuh González-García y Martín García-Varela, 2022. Vislumbrando la diversidad de clinostomidos (Platyhelminthes: Digenea), parásitos asociados a peces y aves acuáticas en México y Centroamérica mediante información obtenida de la biología molecular. Ciencia Nicolaita no. 86, 33-44. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.661>

Historial del artículo:



Recibido: 23 de mayo de 2022

Aceptado: 28 de septiembre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: garciav@ib.unam.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Vislumbrando la diversidad de clinostomidos (Platyhelminthes: Digenea), parásitos asociados a peces y aves acuáticas en México y Centroamérica mediante información obtenida de la biología molecular

Looking at the diversity of clinostomids (Platyhelminthes: Digenea), parasites associated with fish and water birds in Mexico and Central America by molecular and biological information

Ana Lucia Sereno-Uribe,¹ Alejandra López-Jiménez,^{1, 2} Mirza Patricia Ortega-Olivares,¹ Leopoldo Andrade-Gómez,¹ Marcelo Tonatiuh González-García^{1, 2} y Martín García-Varela^{1*}

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Biología, Departamento de Zoología;

²Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado en Ciencias Biológicas.

Resumen

Los miembros del género *Clinostomum*, son un grupo de parásitos que en estadio adulto residen en la cavidad bucal de aves, mientras que en la fase larval o metacercaria, se encuentran en diferentes órganos de los peces. En la presente investigación, recopilamos secuencias de COI del GenBank del género *Clinostomum* distribuidos en distintas regiones biogeográficas. La base de datos se formó con 394 secuencias de las cuales, 269 fueron obtenidas de México y de dos países de Centroamérica. Los análisis filogenéticos inferidos con dos métodos probabilísticos (Máxima Verosimilitud e Inferencia Bayesiana), reconocieron ocho clados que corresponden a seis especies, más dos especies candidatas en esta región. Las seis especies de *Clinostomum* distribuidas en México y Centroamérica, se encuentran asociadas a cinco especies de aves de la familia Ardeidae, mientras que las metacercarias presentan un patrón de especificidad con peces pertenecientes a nueve familias. Aparentemente, estas asociaciones ecológicas han sido clave para la distribución de las especies de *Clinostomum* en México y Centroamérica.

Palabras clave: taxonomía, parásitos, biodiversidad, sistemática



Abstract

Members of the genus *Clinostomum* are parasites that in adult stage reside in the oral cavity of fish-eating birds, whereas that the larval stage (known as metacercaria) reside in fish. In the current study, we compiled COI sequences from the GenBank database from *Clinostomum* spp., distributed in different biogeographic regions. The database included 394 sequences, 269 of which were from the Mexican Nearctic and Neotropical regions, as well as from two countries in Middle-America. Phylogenetic analyses inferred with two probabilistic methods (maximum likelihood and bayesian inference), recognized eight clades, corresponding to six described species and two additional candidate species. All *Clinostomum* species from Mexico and Middle-America, are associated to five bird species from the family Ardeidae, whereas the metacercariae showed a host specificity pattern to fishes classified in nine families. Apparently, these ecological associations have been key on the distribution of the species of *Clinostomum* in Mexico and Middle-America.

Keywords: taxonomy, parasites, biodiversity, systematic

Introducción

El parasitismo es uno de los estilos de vida más exitoso y común en la naturaleza, el cual ha surgido de manera independiente en diversos phyla a través de la evolución de los seres vivos; se estima que aproximadamente el 10 % de la diversidad a nivel mundial son parásitos (Poulin y Morand, 2000). La asociación huésped-parásito es el resultado de adaptaciones recíprocas que permiten a los parásitos explotar características biológicas de sus huéspedes para asegurar su transmisión y supervivencia (Timi y Poulin, 2020). Como resultado, los parásitos pueden afectar la fisiología, la morfología, la reproducción y el comportamiento del huésped. Además, se ha documentado que los parásitos tienen impactos significativos en los individuos, las poblaciones, las comunidades, e incluso en los ecosistemas, ya que pueden estabilizar las redes tróficas (Poulin, 1997; Poulin y Morand, 2000; Timi y Poulin, 2020). Cabe señalar que algunos parásitos tienen ciclos de vida complejos que les permite interactuar a diferentes niveles tróficos con sus huéspedes intermediarios (invertebrados o vertebrados) o definitivos (vertebrados) en los ecosistemas, por esta razón, son considerados bioindicadores de la calidad de los ecosistemas (Poulin, 1997; Poulin y Morand, 2000).

Los digéneos están clasificados en el phylum Platyhelminthes, comúnmente conocidos como gusanos planos, los cuales son considerados como uno de los grupos más diversos de parásitos con aproximadamente 18 000 especies (Cribb *et al.*, 2001), a la vez que

son organismos de gran relevancia debido a que algunas especies causan daño a poblaciones de animales silvestres y domésticos, e incluso al ser humano (Pérez-Ponce de León *et al.*, 2007). Particularmente en México, los digéneos son el grupo mejor documentado con aproximadamente 503 especies clasificadas en 316 géneros (Pérez-Ponce de León *et al.*, 2007); sin embargo, este número podría estar subestimado, ya que la mayoría de los estudios helmintológicos están enfocados en un grupo específico de vertebrados, puntualmente en peces. Con base en esta aproximación, se estima que en México solo se ha reportado el 10 % de la biodiversidad de este grupo de parásitos. Pese a ello, el territorio mexicano es considerado como uno de los sitios con mayor biodiversidad de digéneos en el planeta junto con Australia (Poulin y Morand, 2000; Pérez-Ponce de León *et al.*, 2007).

Clinostomum Leidy, 1856 es un género de digéneos clasificados en la familia Clinostomidae Lühe, 1901 junto con otros seis géneros, de acuerdo con Kanev *et al.* (2002). Los parásitos pertenecientes a la familia Clinostomidae tienen un ciclo de vida complejo donde participan dos huéspedes intermediarios y un huésped definitivo. Los parásitos adultos habitan en la cavidad bucal, faringe o esófago de aves, reptiles y raramente en mamíferos, incluyendo el humano (Wang *et al.*, 2017) (Figura 1). El primer huésped intermediario son gasterópodos dulceacuícolas, mientras que el segundo huésped intermediario son peces o anfibios en

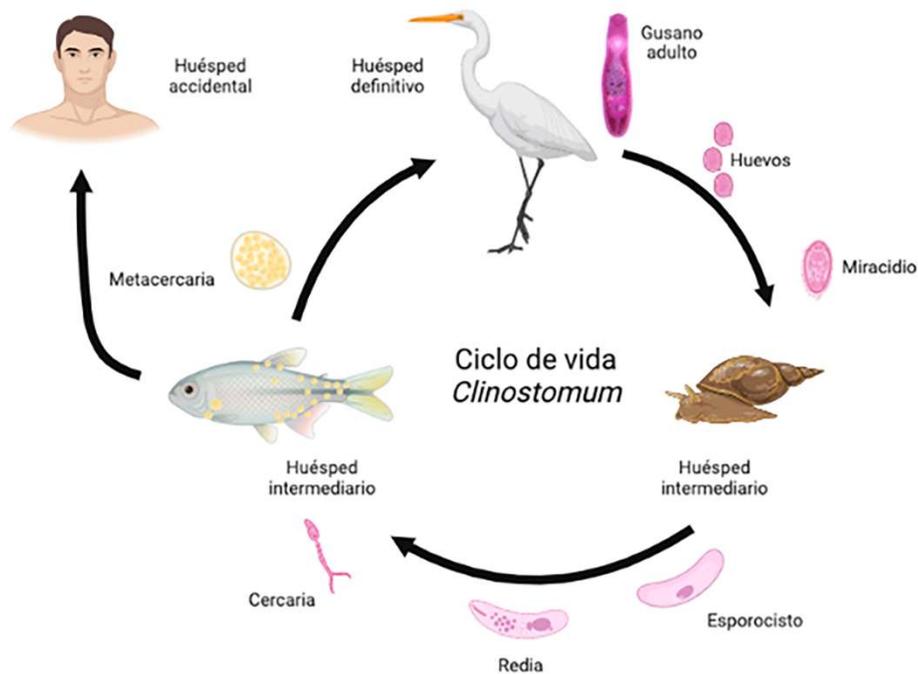


Figura 1. Ciclo de vida de *Clinostomum* spp. Primer huésped intermediario (caracoles), segundo huésped intermediario (peces) y huésped definitivo (aves).

donde reside en la etapa larval denominada metacercaria, la cual se encuentra enquistada, causando manchas de color amarillo en diferentes órganos como músculo, cavidad oral, ojos, branquias, tejido subcutáneo, gónadas, intestino, hígado, entre otros órganos. Las infecciones masivas de estos parásitos pueden causar deformaciones en la piel, provocando la pérdida de vigor, apetito, inmovilidad y nado errático (Figura 2) (Lo *et al.*, 1985; Pérez-Ponce de León *et al.*, 2007, 2016; Sereno-Uribe *et al.*, 2018; Caffara *et al.*, 2020).

Algunas especies del género *Clinostomum* pueden parasitar al humano y son responsables del síndrome de Halzoun, un raro padecimiento transmitido por consumir pescado crudo infectado con metacercarias (Lee *et al.*, 2017), causando laringofaringitis; se han reportado casos en países como Corea y Japón donde se consume pescado crudo (Hara *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2018) (Figura 2). En México no se han reportado casos de clinostomiasis humana; no obstante, Garrido-Olvera *et al.* (2022) han señalado que la clinostomiasis en México es latente y para prevenirla se recomienda evitar el consumo de pescado crudo y fresco. Cabe señalar que en México se ha registrado la metacercaria de *Clinostomum* en 27 especies de peces de las familias Cichlidae, Eleotridae, Poeciliidae, Characidae, Ictaluridae, Pimelodidae, Centropomidae,

Goodeidae y Cyprinidae, algunas de ellas de importancia económica (Pérez-Ponce de León *et al.*, 2016). Las diferentes especies de *Clinostomum* han sido registradas globalmente y han sido sujetos a numerosos estudios relacionados con su ecología, asociación huésped-parásito, patogenicidad, taxonomía y sistemática (Caffara *et al.*, 2014; Pinto *et al.*, 2015; Pérez-Ponce de León *et al.*, 2016; Sereno-Uribe *et al.*, 2013, 2016; Briosio-Aguilar *et al.*, 2018).

Tradicionalmente, la identificación taxonómica de las especies en digéneos, incluyendo las especies del género *Clinostomum*, se ha basado principalmente en los rasgos morfológicos de los adultos. Sin embargo, la incertidumbre sobre la validez de los caracteres morfológicos, la plasticidad fenotípica definida como expresión morfológica inducida por el ambiente —en este caso por el huésped—, así como la limitación de los caracteres morfológicos que permitan asociar los distintos estadios larvarios con el estadio adulto y la similitud morfológica entre especies estrechamente relacionadas, son factores que han generado controversias y dificultan la determinación taxonómica de las especies (Nolan y Cribb, 2005).

Los problemas de diagnóstico y reconocimiento de la biodiversidad de las especies pueden abordarse con la



Figura 2. a) Metacercaria de *Clinostomum* spp., en peces (Foto modificada de <https://www.naturalista.mx>); b) Especímenes adultos de *Clinostomum* spp., parasitando la cavidad bucal de un ave ictiófaga; c) Especímenes adultos de *Clinostomum* spp., recolectados de una garza; d) Parásito adulto teñido con Paracarmin de Meyer. Flechas indican la fase larval (metacercaria) y adulto en figura 2a y 2b, respectivamente.

ayuda de herramientas alternativas como los marcadores moleculares, los cuales se definen como cualquier secuencia de ADN que presenta un polimorfismo y que puede detectarse mediante técnicas de biología molecular. Los marcadores moleculares ofrecen varias ventajas que se enumeran a continuación: 1) Diferentes regiones del genoma pueden ser usadas para identificar a las poblaciones, especies, géneros, etc.; 2) La generación de secuencias de ADN es relativamente rápida; 3) El número de sitios variables de la secuencia de ADN que se analizan es mucho mayor que el de los caracteres morfológicos; y 4) La variación en las secuencias de ADN no está influenciada por el fenotipo ni por el ambiente (Nolan y Cribb, 2005). No obstante, los datos moleculares pueden plantear retos metodológicos como el aislamiento del ADN, o el diseño de *primers* (oligonucleótidos específicos de una región del ADN) universales para la amplificación de regiones de interés (Perkins *et al.*, 2011).

Particularmente uno de los marcadores moleculares empleados para delimitar a las especies de parásitos son los del ADN mitocondrial (DNAm_t por sus siglas en inglés), el cual tiene una tasa de mutación alta, nula recombinación genética y se hereda vía materna (Avisé, 2000). En especial, el gen citocromo oxidasa subunidad I (COI) del DNAm_t, ha venido ganando

adeptos debido a que es un gen que permite diferenciar poblaciones y delimitar especies de parásitos. El aumento reciente en la generación de información molecular ha permitido combinar marcadores moleculares con el propósito de identificar, delimitar y entender la evolución de las especies de parásitos (Avisé, 2000; Moszczyńska *et al.*, 2009; Locke *et al.*, 2010; Cafara *et al.*, 2011, 2014).

En este sentido, en la presente investigación recopilamos información molecular de las especies disponibles del género *Clinostomum* con el fin de evaluar los siguientes puntos: 1) La sistemática de las especies; 2) Comprender los patrones de distribución; y 3) Reconocer las asociaciones ecológicas entre los parásitos y sus huéspedes intermediarios (peces dulcícolas) y definitivos (aves acuáticas de la familia Ardeidae), con un especial énfasis en las especies distribuidas en México. Para ello, obtuvimos secuencias del gen citocromo oxidasa subunidad I (COI) del ADN mitocondrial disponibles en la base de datos del GenBank. La base de datos del COI incluyó secuencias de 19 especies del género *Clinostomum*, más cinco linajes (grupos ancestro-descendientes) sin identificar o especies candidatas, distribuidas en varios continentes: América, Europa, Asia y África.

Dada la gran diversidad de las especies evaluadas (19 especies, más cinco linajes), esperamos recuperar 24 linajes independientes, a la vez que, con base en la filogenia derivada, también esperamos reconocer especies hermanas en la misma región biogeográfica. Finalmente, la evidencia actual sugiere que las especies de *Clinostomum* presentan una afinidad con sus huéspedes, por lo tanto, en este análisis se espera validar estas asociaciones ecológicas.

Metodología

Un total de 394 secuencias del gen citocromo oxidasa subunidad I (COI) fueron obtenidas de la base de datos del GenBank (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>) (Cuadro 1). Posteriormente, se realizó la reconstrucción filogenética con las secuencias del ADN mitocondrial (COI) de las especies de *Clinostomum* utilizando dos aproximaciones estadísticas: Máxima Verosimilitud e Inferencia Bayesiana. Para realizar dichos análisis

Cuadro 1
Especies utilizadas en la presente investigación. Huésped= Ave (A); Caracol (C); Pez (P); Rana (R).
Estadio= Adulto (A); Metacercaria (larva) (M); Cercaria (larva) (C).

Especie	Secuencias utilizadas	Familia del Huésped	Estadio	Distribución
<i>Euclinostomum</i> sp.	3	Osphronemidae (P)	M	Asia (Tailandia)
<i>Clinostomum album</i>	4	Cyprinidae (P); Planorbidae (C)	M, C	Norteamérica (EUA)
<i>C. arquus</i>	29	Ardeidae (A); Profundulidae (P); Poeciliidae (P)	A; M	Norteamérica (México)
<i>C. attenuatum</i>	2	Ranidae (R)	M	Norteamérica (EUA)
<i>C. brienii</i>	4	Clariidae (P)	M	África (Sudáfrica)
<i>C. caffarae</i>	10	Ardeidae (A); Characidae (P)	A; M	Norteamérica (México)
<i>C. cichlidorum</i>	96	Ardeidae (A); Cichlidae (P)	A; M	Norteamérica (México) Centroamérica (Costa Rica)
<i>C. cocoi</i>	1	Ardeidae (A)	A	Sudamérica (Argentina)
<i>C. complanatum</i>	8	Centrarchidae (P)	M	Europa (Italia)
<i>C. cutaneum</i>	2	Ardeidae (A); Cichlidae (P)	M	África (Kenia)
<i>C. detruncatum</i>	3	Synbranchidae (P)	M	Sudamérica (Brasil)
<i>C. fergaliarii</i>	2	Ardeidae (A)	A	Sudamérica (Argentina)
<i>C. heluans</i>	4	Ardeidae (A)	A; M	América (Argentina, Brasil y México)
<i>C. cf. marginatum</i>	1	Percidae (P)	M	Norteamérica (EUA)
<i>C. marginatum</i>	38	Ardeidae (A)	A	Norteamérica (Canadá y EUA)
<i>C. marginatum</i>	17	Goodeidae, Cyprinidae, Catostomidae (P)	M	Norteamérica (México)
<i>C. phalacrocoracis</i>	8	Cichlidae (P)	M	Asia (Israel)
<i>C. philippinense</i>	1	Osphronemidae (P)	M	Asia (Tailandia)
<i>C. poteae</i>	3	Phalacrocoracidae (A)	A	Norteamérica (EUA)
<i>C. sinensis</i>	9	Cyprinidae	M	Asia (China)
<i>C. tataxumui</i>	80	Ardeidae (A); Cichlidae (P), Eleotridae (P)	A; M	Norteamérica (México)
<i>C. ukolli</i>	5	Mochokidae (P)	M	África (Nigeria)
<i>Clinostomum</i> sp. (Linaje 1)	4	Heptapteridae (P)	M	Norteamérica (México) Centroamérica (Honduras)
<i>Clinostomum</i> sp. (Linaje 3)	47	Ardeidae (A); Cichlidae (P), Eleotridae (P)	A; M	Norteamérica (México) Centroamérica (Costa Rica)
<i>Clinostomum</i> sp. 5	3	Cichlidae (P)	M	Sudamérica (Bolivia)
<i>Clinostomum</i> sp. 4	1	Cichlidae (P)	M	Sudamérica (Perú)
<i>Clinostomum</i> sp.	6	Planorbidae (C)	C	Sudamérica (Brasil)

sis, las secuencias del COI fueron alineadas con el programa Clustal W (Kumar *et al.*, 2016), el alineamiento que se conformó con un total de 394 secuencias y 474 pares de bases (pb). El mejor modelo de evolución para la base de datos del COI fue General Time Reversible (GTR+G+I), con una distribución gamma y sitios variables, el cual fue inferido con el Criterio de Información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) (Kumar *et al.*, 2016). Los análisis filogenéticos fueron inferidos con el método de Máxima Verosimilitud (ML, por sus siglas en inglés) con el programa RAxML v7.0.4 (Silvestro y Michalak, 2011) y con el método de Inferencia Bayesiana (BI, por sus siglas en inglés) en el programa MrBayes v3.2 (Ronquist *et al.*, 2012), empleando el modelo de evolución obtenido con el criterio de AIC. Los parámetros utilizados en el análisis de Inferencia Bayesiana fueron dos corridas independientes con cuatro cadenas de cinco millones de generaciones muestreadas cada 1 000 generaciones. La probabilidad posterior de cada clado fue obtenida con el 50 % de la mayoría del árbol consenso. Mientras que, para el método de ML, los nodos de los árboles fueron soportados estadísticamente con 10 000 réplicas de bootstrap.

Resultados

En la presente investigación recopilamos información disponible en la base de datos del GenBank de las especies del género *Clinostomum*, con un especial énfasis en la biodiversidad de México y en países de Centroamérica (Serenó-Urbe *et al.*, 2013, 2018; Pérez-Ponce de León *et al.*, 2016; Briosio-Aguilar *et al.*, 2018). De la información recopilada se obtuvieron 269 secuencias del gen mitocondrial (COI) de 19 especies del género *Clinostomum* asociados a huéspedes definitivos (aves acuáticas de la familia Ardeidae) e intermediarios (peces no relacionados de las familias Catostomidae, Cyprinidae, Goodeidae, Cichlidae, Eleotriidae, Pimelodidae, Characidae, Profundulidae y Poeciliidae) de 51 localidades de la región neártica y neotropical de México y de dos países de Centroamérica (Honduras y Costa Rica) (Cuadro 1) (Figura 3).

Los análisis filogenéticos inferidos con los métodos probabilísticos de ML y BI, fueron congruentes con filogenias previamente propuestas con el gen COI (ver Pérez-Ponce de León *et al.*, 2016); se reconocieron 26 clados que corresponden con las especies analizadas globalmente. Particularmente en México, Honduras y

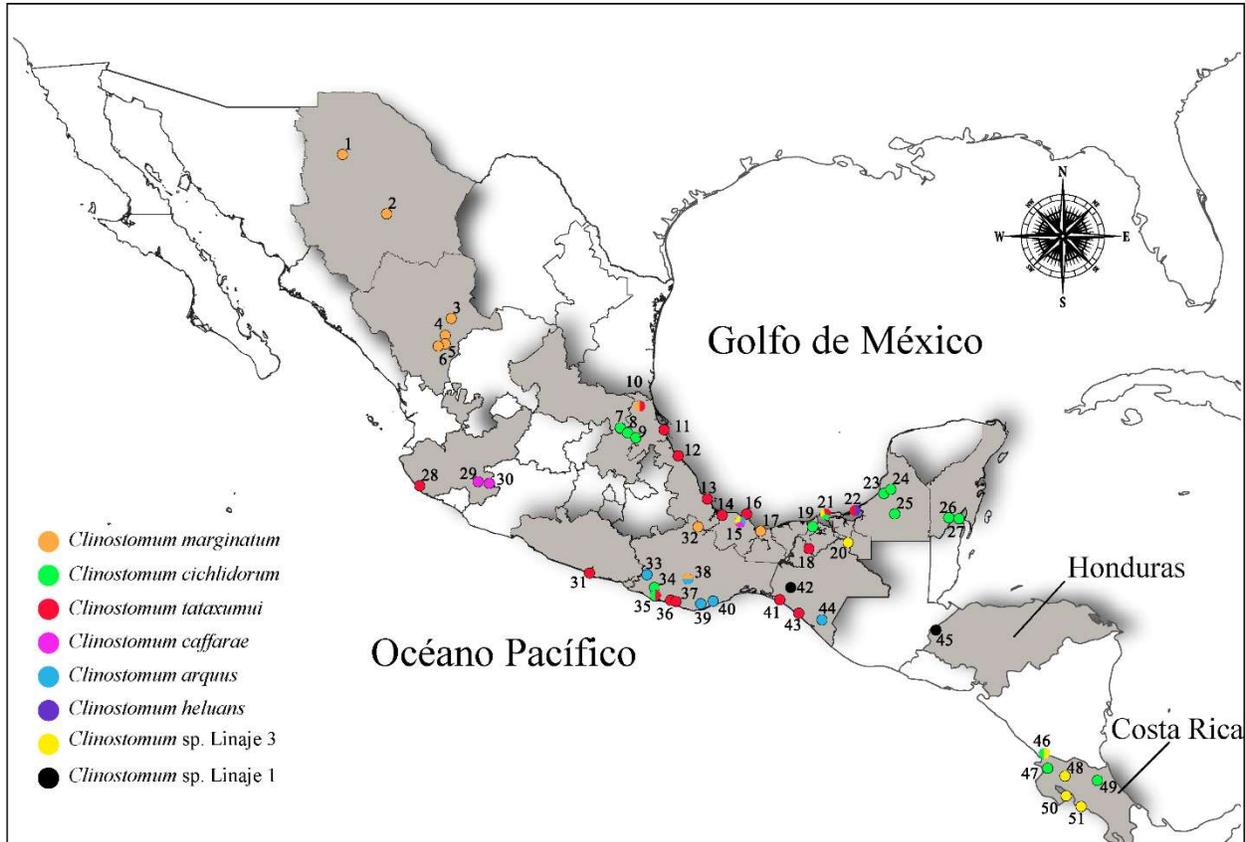


Figura 3. Mapa de la distribución de las especies y linajes de *Clinostomum* spp. en México y Centroamérica.



Figura 4. Fotos de microscopía de luz de *Clinostomum* spp.: a) *Clinostomum heluans*; b) *Clinostomum arquus*; c) *Clinostomum cichlidorum*; d) *Clinostomum intermedialis*; e) *Clinostomum tataxumui*; f) *Clinostomum caffarae*; g) *Clinostomum marginatum*; h) *Clinostomum* sp. Linaje 1; i) *Clinostomum* sp. Linaje 3. Escala, a= 2 mm, b–i = 1 mm.

Costa Rica, se reconocieron ocho clados o grupos independientes que corresponde a seis especies previamente descritas tales como: *C. tataxumui*, *C. heluans*, *C. cichlidorum*, *C. arquus*, *C. caffarae* y *C. marginatum*, más dos especies no descritas *Clinostomum* sp. (Linaje 1 y 3) (Figuras 4 y 5).

Las especies registradas en México y Centroamérica se encuentran distribuidas simpátricamente, es decir, se distribuyen en la misma región biogeográfica. La especie *C. tataxumui* cuenta con un amplio rango de distribución debido a que se ha registrado en 16 localidades (10-14, 16, 18, 21, 22, 28, 31, 35, 36, 41 y 43. Ver Figura 3) en siete estados de la República mexicana asociados a peces de la familia Cichlidae, Eleotridae y a tres especies de aves de la familia Ardeidae (*Ardea alba*, *A. herodias* y *Tigrisoma mexicanum*). Por su parte, la especie *C. marginatum* se ha registrado frecuentemente en la región neártica (Sereno-Uribe *et al.*, 2013); en este trabajo, fue registrada en seis localidades (localidades 1-6 ver Figura 3) del norte de México, en los estados de Chihuahua y Durango que corresponde a la región neártica, así como en una localidad de Veracruz y en dos presas del estado de Oaxaca pertenecientes a la región neotropical (localidades 10, 32 y 38 respectivamente en Figura 3).

Asimismo, se confirmó la especificidad entre los parásitos y sus huéspedes del género *Clinostomum*, por ejemplo, la metacercaria o fase larval de *C. cichlidorum*, es específica a peces de la familia Cichlidae, mientras que los adultos se han registrado en tres especies de aves de la familia Ardeidae (*A. alba*, *T. mexicanum* y *Cochlearius cochlearius*) en 14 localidades de

México (en los estados de San Luis Potosí, Hidalgo, Tabasco, Campeche, Quintana Roo y Oaxaca, localidades 7-9, 19, 21, 23-27, 34 y 35 en Figura 3) y en tres localidades de Costa Rica (46, 47 y 49 en Figura 3). Las especies como *C. caffarae* y *C. arquus* también muestran cierto patrón de especificidad en su fase larval o metacercaria, por ejemplo, *C. caffarae* se ha encontrado en peces de la familia Characidae en dos localidades del estado de Jalisco (localidades 29 y 30 en Figura 3), mientras que la metacercaria de la especie *C. arquus* ha sido registrada en peces de las familias Profundulidae y Poeciliidae (localidades 33, 38, 39, 40 y 44 en Figura 3). El adulto de la especie *C. heluans* fue registrado en una sola localidad del estado de Campeche en aves de la familia Ardeidae (localidad 22 en Figura 3), mientras que la metacercaria fue registrada en Brasil y Argentina asociada a peces de la familia Cichlidae.

Por otra parte, las dos especies candidatas o linajes 1 y 3, no se han reconocido debido a la falta de especímenes adultos para su caracterización morfológica. Por ejemplo, el linaje 3, se ha registrado en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, en México, mientras que en Costa Rica (localidades 15, 20, 23, 46, 48, 50 y 51 en Figura 3) las metacercarias se han registrado en peces de la familia Eleotridae y Heptapteridae, en tanto que los adultos se han registrado en dos especies de aves de la familia Ardeidae (*A. herodias* y *T. mexicanum*, localidad 20 en Figura 3). Finalmente, el linaje 1 fue registrado en estadio larval asociado a peces de la familia Heptapteridae en México y Honduras (localidades 42 y 45 en Figura 3).

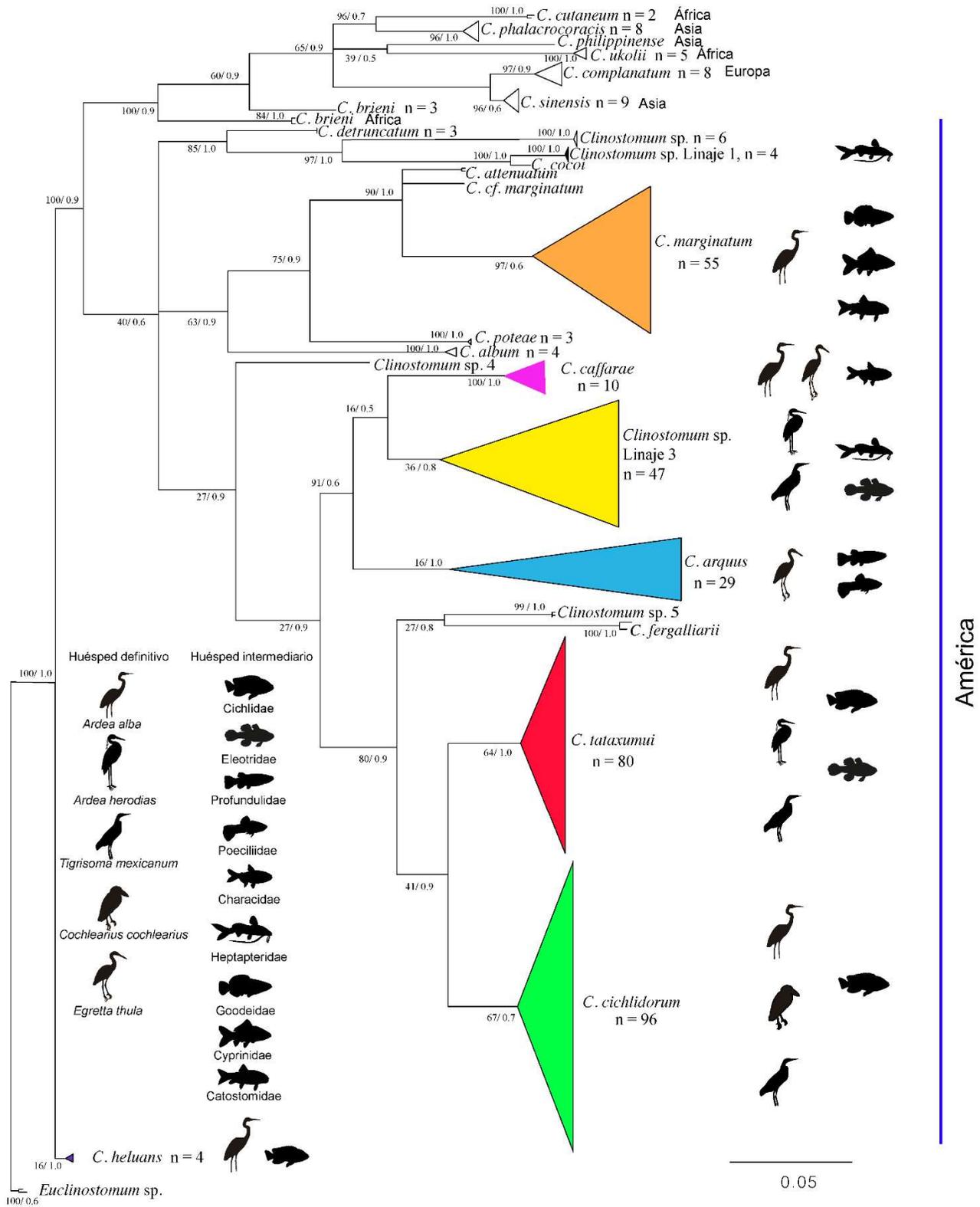


Figura 5. Árbol filogenético obtenido con el método de máxima verosimilitud, inferido a partir de la base de datos del citocromo oxidasa subunidad I de ADN mitocondrial. Números en los nodos representan los valores de bootstrap y probabilidades posteriores del análisis bayesiano.

Discusión

Los análisis filogenéticos obtenidos en este trabajo reconocieron 26 linajes, dos linajes más de los esperados, a la vez que se reconocieron a las 19 especies analizadas y las cinco especies sin describir. No obstante, algunas secuencias identificadas como *C. brienii* y *C. marginatum*, de África y Asia respectivamente, se dividieron en dos linajes cada uno, sugiriendo que estas secuencias deben ser reclasificadas (Figura 5). Uno de los resultados que se observan en la filogenia, fue la división de dos grandes clados: el primero contiene siete especies distribuidas en África, Asia y Europa, mientras que el segundo contiene 11 especies más las cinco especies sin describir distribuidas a lo largo del continente americano. Es de llamar la atención que, aunque la especie *C. heluans* se distribuye en América, en la filogenia no se agrupa con los otros 16 linajes presentes en este continente (Figura 5). La posición filogenética de esta especie sugiere que debería ser reevaluada y posiblemente reclasificada en otro género.

En México, el primer registro del adulto de *Clinostomum*, fue *C. complanatum* en la cavidad bucal de la garcita verde (*Butorides virescens*) en el estado de Chiapas, mientras que la fase larvaria fue registrada en 69 especies de peces (Caballero, 1946; Pérez-Ponce de León *et al.*, 2007, 2016). Posteriormente, Caffara *et al.* (2011) realizaron un estudio comparativo en donde concluyeron que *C. complanatum* es una especie restringida al Viejo Mundo, reasignando los registros previos de *C. complanatum* a *C. marginatum* en América (Estados Unidos y Canadá). En México, Sereno-Uribe *et al.* (2013) encontraron este mismo patrón y reasignaron varios individuos clasificados como *C. complanatum* a *C. marginatum*; además, confirmaron que *C. marginatum* se distribuye principalmente en la región neártica y en algunas localidades de la región neotropical en México y, finalmente, describieron una nueva especie nombrándola *C. tataxumui*. En el presente análisis filogenético, recuperamos estas tres especies validando los trabajos previos (Figura 5).

Recientemente, Pérez-Ponce de León *et al.* (2016) realizaron un estudio donde se incluyeron fases larvianas y adultos de *Clinostomum* colectadas en peces y aves de 26 localidades de México, Honduras y Costa Rica. El estudio reveló una gran biodiversidad dentro del género en la región neotropical, reconociendo

cinco linajes. Posteriormente, tres de ellas fueron descritas como *C. cichlidorum*, *C. arquus* y *C. caffarae*, dejando dos especies sin describir debido a la falta de especímenes adultos (Sereno-Uribe *et al.*, 2018). El árbol filogenético obtenido en el presente estudio apoya lo reportado previamente, en donde se recuperó a las tres especies y a los dos linajes sin describir (Linaje 1 y 3).

Actualmente el género *Clinostomum* está compuesto por 31 especies distribuidas en todo el mundo, en México y Centroamérica se han reconocido siete especies de *Clinostomum*, *C. tataxumui*, *C. heluans*, *C. cichlidorum*, *C. arquus*, *C. caffarae*, *C. marginatum* y *C. intermediaris* (solo con caracteres morfológicos), por lo que esta región alberga el 22 % de la biodiversidad del género (Figura 4) (Pérez-Ponce de León *et al.*, 2007, 2016; Sereno-Uribe *et al.*, 2013, 2018; Briosio-Aguilar *et al.*, 2018). Sin embargo, se reconoce que existen otros dos linajes en esta región (1 y 3), los cuales no han sido nombrados formalmente hasta que se obtengan los adultos para realizar la descripción morfológica.

La evidencia actual sugiere que las especies del género *Clinostomum* presentan una estrecha relación ecológica con aves de la familia Ardeidae, debido a que nueve especies y el linaje 3 se recolectaron de estas aves, solamente *C. potae* fue recolectada del pato buzo (Phalacrocoracidae) (Cuadro 1). Además, las metacercarias (fase larval) muestran cierto patrón de especificidad, por ejemplo, las metacercarias de *C. cichlidorum* se encuentran solamente en peces de la familia Cichlidae, mientras que las metacercarias de *C. arquus* se hallan en peces ciprinodontiformes, particularmente en poeciliidos y profundulidos (Figura 5). Este patrón de especificidad a nivel del segundo huésped intermediario ha sido encontrado en otros grupos de parásitos, por ejemplo, López-Jiménez *et al.* (2017) encontraron la presencia de tres linajes del género *Uvulifer* asociadas a peces de las familias Characidae, Cyprinidae, y Poeciliidae respectivamente, distribuidas en México y Centroamérica.

Finalmente, hay que mencionar que las metacercarias de *Clinostomum* forman quistes de color amarillo en diferentes partes del cuerpo en peces cultivados, lo que causa pérdidas económicas (Lo *et al.*, 1985; Sutili *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2018). En México, se cultivan peces para consumo humano, como lobina, tilapia, bagre, entre otros (Instituto Nacional de

Pesca, 2018). Hasta la fecha, no se han documentado epizootias severas en estos peces; sin embargo, son potenciales huéspedes del género *Clinostomum*, por lo tanto, conocer la biología, taxonomía, sistemática y ciclo de vida de estos parásitos, es preponderante para crear estrategias de prevención, erradicación, control y para poder reducir el impacto negativo que podrían ocasionar a las granjas acuícolas que cultivan peces de consumo humano.

Agradecimientos

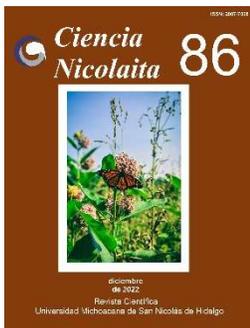
Los autores ALJ y MTGG agradecen el apoyo del Programa de Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM y CONACYT (ALJ. CVU. No. 706119; MTGG CVU No. 956064).

El actual proyecto de investigación recibió financiamiento por parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM) IN201122.

Referencias

- Awise, J.C., 2000, *Phylogeography: The history and formation of species: Harvard University Press, Cambridge, MA, USA*, p. 228.
- Briosio-Aguilar, R., Pinto, H.A., Rodríguez-Santiago, M.A., López-García, K., García-Varela, M., and Pérez Ponce de León, G., 2018, Link Between the adult and the metacercaria of *Clinostomum heluans* Braun, 1899 (Trematoda: Clinostomidae) through DNA sequences, and its phylogenetic position within the Genus *Clinostomum* Leidy, 1856: *Journal of Parasitology*, 104, 292-296. ISSN: 1937-2345. DOI: 10.1645/17-183.
- Caballero, E.C., 1946, Estudios helmintológicos de la región oncocercosa de México y de la República de Guatemala. Trematoda II. Presencia de *Paragonimus* en reservorios naturales y descripción de un nuevo género: *Anales del Instituto de Biología*, 17, 138-165.
- Caffara, M., Locke, S.A., Gustinelli, A., Marcogliese, D.J., and Fioravanti, M.L., 2011, Morphological and molecular differentiation of *Clinostomum complanatum* and *Clinostomum marginatum* (Digenea: Clinostomatidae) metacercariae and adults: *Journal of Parasitology*, 97, 884-891. ISSN: 1937-2345. DOI: 10.1645/GE-2781.1.
- Caffara, M., Davidovich, N., Falk, R., Smirnov, M., Ofek, T., Cummings, D., Gustinelli, A., and Fioravanti, M.L., 2014, Redescription of *Clinostomum phalacrocoracis* metacercariae (Digenea: Clinostomidae) in cichlids from Lake Kinneret, Israel: *Parasite*, 21, 32. ISSN: 1776-1042. DOI: 10.1051/parasite/2014034.
- Caffara, M., Locke, S.A., Echi, P.C., Halajian, A., Luus-Powell, W.J., Benini, D., Tedesco, P., and Fioravanti, M.L., 2020, A new species of *Clinostomum* Leidy, 1856 based on molecular and morphological analysis of metacercariae from African siluriform fishes: *Parasitology Research*, 119, 885-892. ISSN 0031-1820. DOI: 10.1007/s00436-019-06586-2.
- Cribb, T.H., Bray, R.A., Littlewood, D.T.J., Pichelin, S., and Herniou, E.A., 2001, "The Digenea", in *Interrelationships of the Platyhelminthes*, London, Taylor and Francis, pp. 168-185. ISBN: 9780367397852.
- Garrido-Olvera, L., García-Prieto, L., Osorio-Sarabia, D., Sánchez-Martínez, J.G., Rábago-Castro, J.L., Hernández-Mena, D.I., and Pérez-Ponce de León, G., 2022, Parasites with zoonotic potential found in commercially important fish in Tamaulipas, Northeastern Mexico: *Parasitology International*, 88. ISSN: 1383-5769. DOI: 10.1016/j.parint.2022.102550.
- Hara, H., Miyauchi, Y., Tahara, S., and Yamashita, H., 2014, Human laryngitis caused by *Clinostomum complanatum*: *Nagoya Journal of Medicine Sciences*, 76, 181-185. ISSN: 2186-3326.
- Kanev, I., Radev, V., and Fried, B., 2002, Family Clinostomidae Lühe, 1901: *Keys to the Trematoda*, vol. I, CAB International, Wallingford, United Kingdom, pp. 113-120. <https://doi.org/10.1079/9780851995472.0113>
- Kumar, S., Stecher, G., and Tamura, K., 2016, MEGA7: molecular evolutionary genetics analysis version 7.0 for bigger datasets: *Molecular Biology and Evolution*, 33, 1870-1874. ISSN: 1537-1719. DOI: 10.1093/molbev/msw054.
- Lee, G.S., Park, S.W., Kim, J., Seo, K.S., You, K.W., Chung, J.H., Moon, H.C., and Hong, G.Y., 2017, A case of endoscopically treated laryngopharyngitis resulting from *Clinostomum complanatum* infection: *Korean Journal of Gastroenterology*, 69, 177-180. ISSN: 2233-6869.
- Lo, C.F., Chen, S.C., and Wang, C.H., 1985, The study of *Clinostomum complanatum* (Rud., 1814) V. The influences of metacercaria of *Clinostomum complanatum* on fish: *Fish Pathology*, 20, 305-312. ISSN: 1881-7335.
- Locke, S.A., McLaughlin, J.D., Dayanandan, S., and Marcogliese, D.J., 2010, Diversity and specificity in *Diplostomum* spp. Metacercariae in freshwater fishes revealed by cytochrome c oxidase I and internal transcribed spacer sequences: *International Journal for Parasitology*,

- 40, 333-343. ISSN: 0020-7519. DOI: 10.1016/j.ijpara.2009.08.12.
- López-Jiménez, A., Pérez-Ponce de León, G., and García-Varela, M., 2017, Molecular data reveal high diversity of *Uvulifer* (Trematoda: Diplostomidae) in Middle America, with the description of a new species: *Journal of Helminthology*, 92, 725-739. ISSN: 0022-149X. DOI: 10.1017/S0022149X17000888.
- Moszczyńska, A., Locke, S.A., McLaughlin, J.D., Margoliese, D.J., and Crease, T.J., 2009, Development of primers for the mitochondrial cytochrome c oxidase I gene in digenetic trematodes (Platyhelminthes) illustrates the challenge of barcoding parasitic helminths: *Molecular Ecology Resource*, 9, 75-82. ISSN: 1755-0998. DOI: 10.1111/j.1755-0998.2009.02634.x.
- Nolan, M.J., and Cribb, T.H., 2005, The use and implications of ribosomal DNA sequencing for the discrimination of digenetic species: *Advances Parasitology*, 60, 101-163. ISSN: 0065308X.
- Perkins, S.L., Martinsen, E.S., and Falk, B.G., 2011, Do molecules matter more than morphology? Promises and pitfalls in parasites: *Parasitology*, 138, 1664-1674. ISSN: 1469-8161. DOI: 10.1017/S0031182011000679.
- Pérez-Ponce de León, G., García-Prieto, L., and Mendoza-Garfias, B., 2007, Trematode parasites (Platyhelminthes) of wildlife vertebrates in Mexico: *Zootaxa*, 1534, 247-260. ISSN: 1175-5326.
- Pérez-Ponce de León, G., García-Varela, M., Pinacho-Pinacho, C.D., Sereno-Uribe, A.L., and Poulin, R., 2016, Species delimitation in trematodes using DNA sequences: Middle-American *Clinostomum* as a case study: *Parasitology*, 30, 1-17. ISSN: 1469-8161. DOI: 10.1017/S0031182016001517.
- Pinto, H.A., Caffara, M., Fioravanti, M.L., and Melo, A.L., 2015, Experimental and molecular study of cercariae of *Clinostomum* sp. (Trematoda: Clinostomidae) from *Biomphalaria* spp. (Mollusca: Planorbidae) in Brazil: *Journal of Parasitology*, 101, 108-113. ISSN: 1937-2345. DOI: 10.1645/14-497.1.
- Poulin, R., 1997, *Evolutionary Ecology of Parasites*: Princeton, New Jersey, Princeton University Press. ISBN 13-978-0-691-12085-0. DOI: 10.1017/S0031182007003113.
- Poulin, R., and Morand, S., 2000, The diversity of parasites: *Quarterly Review Biology*, 75, 277-293. ISSN: 0033-5770. DOI: 10.1086/393500. PMID: 11008700.
- Ronquist, F., Teslenko, M., Van Der Mark, P., Ayres, D.L., Darling, A., Höhna, S., Larget, B., Liu, L., Suchard, M.A., and Huelsenbeck, J.P., 2012, MrBayes 3.2: Efficient Bayesian phylogenetic inference and model choice across a large model space: *Systematic Biology*, 61, 539-542. ISSN: 1063-5157. DOI: 10.1093/sysbio/sys029.
- Sereno-Uribe, A.L., Pinacho-Pinacho, C.D., García-Varela, M., and Pérez-Ponce de León, G., 2013, Using mitochondrial and ribosomal DNA sequences to test the taxonomic validity of *Clinostomum complanatum* Rudolphi, 1814 in fish-eating birds and freshwater fishes in Mexico, with the description of a new species: *Parasitology Research*, 112, 2855-2870. ISSN: 1432-1955. DOI: 10.1007/s00436-013-3457-5.
- Sereno-Uribe, A.L., García-Varela, M., Pinacho-Pinacho, C.D., and Pérez-Ponce de León, G., 2018, Three new species of *Clinostomum* Leidy, 1856 (Trematoda) from Middle American fish-eating birds: *Parasitology Research*, 177, 2171-2185. ISSN: 1432-1955. DOI: 10.1007/s00436-018-5905-8.
- Silvestro, D., and Michalak, I., 2011, RaxMLGUI: a graphical front-end for RAXML: *Organisms Diversity and Evolution*, 12, 335-337. ISSN: 1439-6092. DOI: 10.1007/s13127-011-0056-0.
- Sutili, F.F., Gressler, L.T., and Vilani de Pelegrini, L.F., 2014, *Clinostomum complanatum* (Trematoda, Digenea): a parasite of birds and fishes with zoonotic potential in southern Brazil: *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal*, 8, 99-114. ISSN: 191-2965. DOI: 10.5935/1981-2965.20140007.
- Song, H.B., Choi, M.H., and Chung, E.J., 2018, Human laryngeal infection by *Clinostomum complanatum*: *American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 98, 7-8. ISSN: 0002-9637. DOI: 10.4269/ajtmh.17-0718.
- Timi, J.T., and Poulin, R., 2020, Why ignoring parasites in fish ecology is a mistake: *International Journal for Parasitology*, 50, 755-761. ISSN: 0020-7519. DOI: 10.1016/j.ijpara.2020.04.007.
- Wang, M.L., Chen, H.Y., and Shih, H.H., 2017, Occurrence distribution of yellow grub trematodes (*Clinostomum complanatum*) infection in Taiwan: *Parasitology Research*, 116, 1761-1771. ISSN: 1432-1955. DOI: 10.1007/s00436-017-5457-3.



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Las especies crípticas: un reto para los estudios modernos de sistemática, descripción de la biodiversidad y conservación de las especies

Cryptic species: a challenge for modern studies of systematics, biodiversity description and species conservation

Gerardo Pérez Ponce de León, Brenda Solórzano García

Para citar este artículo: Gerardo Pérez Ponce de León, Brenda Solórzano García, 2022. Las especies crípticas: un reto para los estudios modernos de sistemática, descripción de la biodiversidad y conservación de las especies. Ciencia Nicolaita no. 86, 45-53. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.672>



Historial del artículo:

Recibido: 31 de mayo de 2022

Aceptado: 4 de octubre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: ppdleon@enesmerida.unam.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Las especies crípticas: un reto para los estudios modernos de sistemática, descripción de la biodiversidad y conservación de las especies

Cryptic species: a challenge for modern studies of systematics, biodiversity description and species conservation

Gerardo Pérez Ponce de León^{1,2}, Brenda Solórzano García¹

¹ Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida, UNAM.

² Instituto de Biología, UNAM.

Resumen

La taxonomía se encarga de identificar, describir, nombrar y clasificar a los seres vivos; por su parte, la sistemática incorpora la información generada por los taxónomos para inferir las relaciones evolutivas entre los organismos. En conjunto, estas disciplinas proveen un marco de referencia para cualquier estudio biológico. El uso de marcadores moleculares en las últimas décadas revitalizó la sistemática, permitiendo desarrollar criterios más precisos para delimitar especies. A través de estos marcadores, se ha reconocido la existencia de las *especies crípticas*, es decir, aquellas morfológicamente indistinguibles, pero genéticamente distintas. El reconocimiento y delimitación de estas especies representa un reto para el conocimiento de la biodiversidad, para la descripción de patrones macroecológicos, biogeográficos y evolutivos, así como para los estudios sobre la conservación de las especies.

Palabras clave: sistemática, especies crípticas, taxonomía integrativa, delimitación de especies, biodiversidad

Abstract

Taxonomy is involved with the identification, description, naming and classification of organisms whereas systematics uses the information generated by taxonomists to infer the evolutionary relationships among organisms. Both represent a fundamental framework for organismal biology studies. The use of molecular markers in the last decades has revitalized the area of systematics, by allowing the development of phylogenetic hypothesis between taxa, and improving the accuracy of defining species. Furthermore, molecular markers are very useful for recognizing *cryptic species* (those morphologically indistinguishable, but genetically distinct). The recognition and delimitation of cryptic species represents a challenge for our complete understanding of biodiversity, for the description of macroecological, biogeographical, and evolutionary patterns, and for studies on species conservation.

Keywords: systematics, cryptic species, integrative taxonomy, species delimitation, biodiversity



Introducción

La sistemática comprende el estudio de los seres vivos que habitan en el planeta y sus relaciones evolutivas; mientras que la taxonomía se refiere al estudio teórico de las bases, reglas y principios que son empleados para su clasificación (Morrone, 2013). Cada grupo reconocible de organismos es ubicado dentro de un taxón, los cuales constituyen categorías determinadas de clasificación. La especie, el nivel más básico dentro de la jerarquía taxonómica, es la unidad fundamental en todos los estudios de biodiversidad y, en general, en los estudios biológicos de cualquier índole. El adecuado conocimiento de la biodiversidad requiere la implementación de métodos de investigación que incluyan estrategias de análisis de datos que no solo nos permitan reconocer a las especies como las unidades de estudio, sino también delimitarlas y lograr una descripción completa de los rasgos que sirvan para identificarlas. Desde el establecimiento de la nomenclatura binomial propuesta por el naturalista sueco Carlos Linneo en el siglo XVIII, se generó un sistema que nos permite organizar y clasificar la biota que nos rodea.

Durante varios siglos, los taxónomos han descrito la diversidad de especies utilizando principalmente caracteres o rasgos morfológicos observables en los organismos; sin embargo, los métodos basados en ADN son empleados cada vez con mayor frecuencia para delimitar a las especies, para complementar su descripción morfológica y para analizar su historia evolutiva (Blaxter, 2004). En las últimas décadas, las herramientas moleculares han ofrecido una oportunidad sin precedentes para incluir nuevos componentes en la descripción de la biodiversidad, particularmente caracterizando la diversidad genética, estableciendo la estructura genética poblacional y permitiendo inferir las relaciones filogenéticas entre taxones. En este contexto, la sistemática representa una disciplina que integra varios campos del conocimiento para describir y entender muchos de los procesos micro y macroevolutivos que han determinado el origen, la distribución y el mantenimiento de la biodiversidad en el planeta. Los métodos modernos de análisis en la sistemática, implican realizar trabajos de inventario de la biodiversidad dando un énfasis muy importante en el significado ecológico y evolutivo de las especies, sus interacciones y el ambiente en el que habitan.

En la actualidad, el proceso de reconocimiento y descripción de especies se inserta en el marco de la denominada *taxonomía integrativa*, un concepto acuñado formalmente por Dayrat (2005) que refiere el marco conceptual que utilizamos para delimitar a las especies. Esta aproximación metodológica implica utilizar diferentes fuentes de caracteres (ecológicos, genéticos, morfológicos, etc.) para lograr una delimitación más robusta de las entidades biológicas bajo estudio. Asimismo, la delimitación puede lograrse mediante el uso de enfoques variados, como aquellos derivados de la filogeografía (o estudio de la distribución de las poblaciones), la morfología comparada, la genética de poblaciones, la ecología, el comportamiento, etc. Los estudios sobre la sistemática de muchos grupos de organismos han evidenciado que los caracteres morfológicos tradicionalmente utilizados para separar especies, en ocasiones no eran suficientes, o bien no eran confiables u objetivos para lograr una clara distinción entre las entidades bajo estudio, especialmente en grupos que son altamente diversos o bien, aquellos que están sujetos a un conservadurismo morfológico. Es difícil reconocer cuando dos especies son diferentes en aquellos casos donde ciertos caracteres morfológicos son muy variables, de tal manera que se manifiestan como caracteres polimórficos. Para la sistemática, y más concretamente para la taxonomía, es fundamental poder distinguir cuando esos polimorfismos son el resultado de plasticidad fenotípica asociada al ambiente, y cuando esos caracteres indican que se trata de más de una especie. Por ello, la utilización de caracteres moleculares en la descripción de la diversidad biológica, ha conducido al descubrimiento de las denominadas *especies crípticas*, aquellas morfológicamente indistinguibles, pero genéticamente diferentes (Bickford *et al.*, 2007). Cuando se utilizan datos moleculares en el análisis de la diversidad genética entre los individuos de una población (o poblaciones) que se asume pertenecen a una misma especie, existe la posibilidad de encontrar diferencias genéticas, aunque morfológicamente los individuos no puedan ser separados en correspondencia con los grupos formados genéticamente (grupos monofiléticos) (Figura 1.3). Reconocer diferencias genéticas entre los individuos de una población, ha llevado a los taxónomos a realizar observaciones más detalladas para lograr identificar los caracteres morfológicos diagnósticos; en estos casos, se considera a

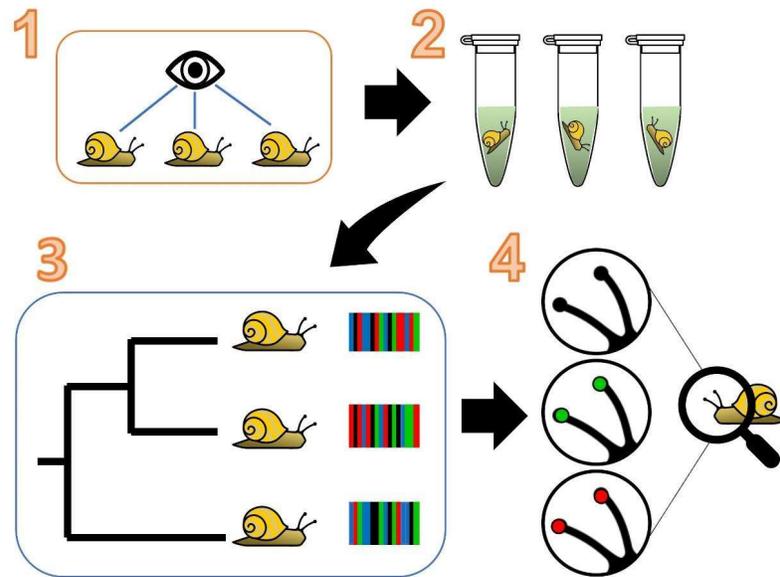


Figura 1. Diagrama que representa el reconocimiento de especies crípticas. 1) Al observar los ejemplares no se detectan diferencias morfológicas. 2) Los ejemplares son procesados para obtener datos moleculares. 3) Al realizar el análisis filogenético empleando los datos moleculares, se detectan diferencias genéticas en las secuencias de ADN entre individuos y se calculan valores de divergencia genética. Esto lleva a repetir el examen morfológico de una forma más minuciosa. Si a pesar de esta revisión no se encuentran diferencias morfológicas, se consideraría un caso de especies crípticas. Por el contrario, si en esta revisión se llegan a encontrar pequeñas diferencias (4), entonces sería un caso de especies pseudocrípticas.

estas especies como ‘*pseudocrípticas*’ (Sáez *et al.*, 2005) (Figura 1.4). En otras ocasiones, a pesar de realizarse un estudio detallado, no se encuentran los caracteres diagnósticos entre los ejemplares y es entonces cuando se analizan fuentes de caracteres alternas que ayuden a corroborar que se trata de dos o más especies distintas (Schlick-Sateiner *et al.*, 2007).

Chenuil *et al.* (2019) proponen dos categorías para distinguir a las especies crípticas: las especies crípticas *sensu lato* (s.l.), que son aquellas que se reportan cuando los datos moleculares muestran de manera inesperada alta divergencia genética, aunque los datos morfológicos no han sido verificados, es decir, estas pueden ser el resultado de la ‘prospección molecular’. Por otro lado, estos autores refirieron a las especies crípticas *sensu stricto* (s.s.), como aquellas en donde se ha verificado la ausencia de caracteres morfológicos diagnósticos que distinguen a las especies independientemente de su nivel de divergencia genética.

En la literatura científica se han reportado muchos estudios en donde las especies crípticas son reconocidas, pero no son descritas ni nombradas, por lo que terminan siendo referidas como Unidades Taxonómicas Operacionales (OTU’s), linajes genéticos, especies

candidatas, etc. El proceso de describirlas formalmente, una vez delimitadas, constituye otra problemática que requiere una base metodológica para resolver la falta aparente de caracteres morfológicos que permitan al taxónomo establecer su diagnóstico. Por lo anterior, se ha sugerido que para describir especies crípticas deben modificarse las líneas de evidencia y considerar a los caracteres moleculares como la columna vertebral de la descripción (Jörger *et al.*, 2013).

El número de especies crípticas en la naturaleza se ha incrementado en las últimas dos décadas. Pérez-Ponce de León *et al.* (2016) realizaron una búsqueda exhaustiva en las bases de datos del ISI Web of Knowledge y en Zoological Records, considerando todos aquellos trabajos que utilizaron el término ‘cryptic species’ para el periodo de 1975 a 2015. Además, hicieron una separación entre aquellos trabajos que refirieron a las especies crípticas en el título, resumen o palabras clave, de aquellos que representaban un estudio explícito de reconocimiento molecular de especies crípticas. Estos autores utilizaron tres medidas de la tasa de descubrimiento de especies crípticas: 1) El número de trabajos que refieren a estas especies, 2) El número de especies crípticas encontradas, y 3) El

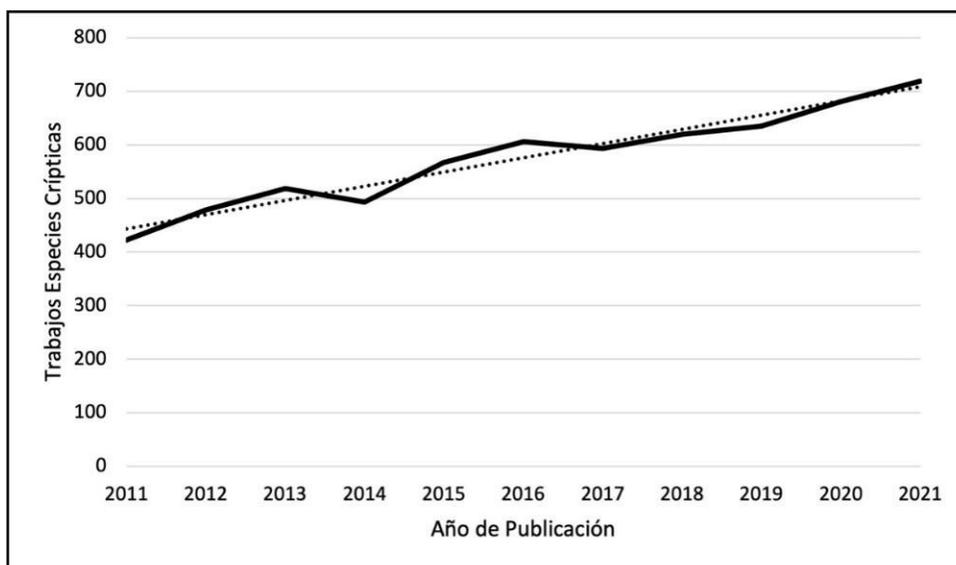


Figura 2. Número de trabajos publicados en ISI Web of Knowledge en donde se refiere el término ‘especies crípticas’ en el periodo comprendido entre 2011 y 2021, observándose una tendencia ascendente.

número promedio de especies crípticas por trabajo publicado. Se encontró que, al menos entre los metazoarios, las especies crípticas se encuentran distribuidas de forma heterogénea en los diferentes phyla. Incluso, algunos grupos como los anfibios, reptiles, crustáceos y platelmintos, son más propensos a tener especies crípticas que otros como los gastrotrícos, colémbolos y acantocéfalos (Pérez-Ponce de León *et al.*, 2016).

Para demostrar el hecho de que las especies crípticas continúan siendo comúnmente referidas en la literatura científica, realizamos una búsqueda del número de trabajos publicados que aparecieron en el ISI Web of Knowledge bajo el mismo término (‘cryptic species’) durante el año 2021, encontrando un total de 719 resultados. Es interesante destacar que el número de estudios que refieren a las especies crípticas en la literatura, continúa con una tendencia a incrementarse, aumentando un 59 % el número de trabajos publicados en los últimos diez años, pasando de 422 en 2011 a 719 en 2021 (Figura 2).

¿Cómo se reconocen las especies crípticas?

El proceso de descubrimiento de especies crípticas fue descrito por Sáez *et al.* (2005) y consta de dos pasos. Primero, se obtienen secuencias de ADN de distintos genes de aquellos individuos que pertenecen a una especie reconocida morfológicamente. Segundo,

de manera inesperada, los individuos se agrupan en dos o más clados recíprocamente monofiléticos al conducir un análisis filogenético, diferenciados genéticamente (Figura 1.3). El elemento clave en dicho reconocimiento, es precisamente la utilización de caracteres moleculares, por lo cual se ha enfatizado que la descripción moderna de la biodiversidad debe estar acompañada necesariamente de esta herramienta y que debe hacerse de manera rutinaria en los estudios de taxonomía descriptiva (alfa). Claramente, el reconocimiento de linajes evolutivos distintos a través de secuencias de ADN, conlleva al concepto de ‘iluminación recíproca’ (Hennig, 1966), donde el examen de los ejemplares, a la luz de esta nueva evidencia, permite la identificación de características que nos ayudan a distinguirlas, es decir, los datos moleculares proveen un marco de referencia para analizar la variabilidad morfológica en otro contexto para lograr así una identificación más precisa de las especies bajo estudio.

Para algunos autores (Pérez-Ponce de León *et al.*, 2010), en un sentido estricto, las especies crípticas mantienen este estado de manera provisional, dada la posibilidad teórica de que una revisión minuciosa adicional revele características diagnósticas que permitan una distinción morfológica entre las especies, resultando en la descripción formal de estas. Sin embargo, existe la posibilidad de que el reconocimiento de especies crípticas basado en secuencias de ADN, no esté acompañado del descubrimiento de caracteres

morfológicos diagnósticos, pues a pesar de las observaciones que los especialistas realizan, estos no se encuentran. En estos casos, existe un problema práctico en términos de la descripción de estas especies, ya que no se cuenta con los caracteres morfológicos requeridos para ello.

En este contexto, es el trabajo de los taxónomos y el de los sistématas el que va a unificar los problemas conceptuales y metodológicos derivados del reconocimiento de estas especies morfológicamente indistinguibles, y serán ellos también quienes determinarán los pasos necesarios a seguir para diferenciar las verdaderas especies crípticas de aquellas que simplemente no han sido adecuadamente estudiadas. Por ello, se necesita contar con métodos apropiados que ayuden a realizar inferencias más robustas sobre los mecanismos responsables del surgimiento de las especies crípticas y, por ende, a una mejor estimación de la biodiversidad en el planeta.

¿Cómo delimitamos a las especies crípticas?

Existe una diferencia entre *reconocer* y *delimitar* especies crípticas, puesto que son dos procesos distintos. El término ‘prospección molecular’ se usa para describir el método para analizar la variabilidad genética entre individuos que pertenecen a una supuesta especie (Blouin, 2002). Al estudiar esta variación en nemátodos parásitos, el autor encontró que era común observar evidencia de diferenciación genética en organismos que podrían parecer morfológicamente idénticos, pero que tenían una amplia distribución geográfica, o bien parasitaban a distintas especies de hospederos. Las especies que son reconocidas de esta manera son referidas entonces como ‘especies candidatas’, pero una vez reconocidas, estas especies deben ser delimitadas. Para ello, se requiere de un estudio morfológico más detallado, así como el análisis de otras fuentes de caracteres como son los fisiológicos, ecológicos o conductuales, que permitan establecer con mayor certeza los límites entre estas (Padial *et al.*, 2010). Esta delimitación se realiza dentro del contexto de dos métodos: aquellos que se fundamentan en una aproximación evolutiva y filogenética (denominados métodos basados en árboles) y aquellos apoyados propiamente en caracteres moleculares, donde se uti-

lizan estimadores de divergencia genética para la caracterización de individuos en una población, y que pueden utilizarse para estimar flujo genético entre dos o más poblaciones e inferir si estas representan entidades reproductivamente aisladas (ver Pérez-Ponce de León, 2017 y referencias ahí citadas).

Por ejemplo, la iniciativa del ‘código de barras de la vida’ (o DNA barcoding) impulsada por la Universidad de Guelph en Canadá y que posteriormente se convirtió en un proyecto mundial, emplea una aproximación basada en caracteres moleculares para identificar y descubrir especies (ibol.org). Se fundamenta en la secuenciación de un fragmento de un gen mitocondrial (usualmente 650 pares de bases del gen citocromo oxidasa, subunidad I, COI) y la utiliza como una medida estándar de comparación entre distintos organismos para su identificación a partir de la cantidad de diferencias genéticas encontradas entre organismos (divergencia genética). Este fragmento se ha utilizado principalmente en animales, ya que en plantas y hongos se utilizan otros genes que son apropiados para esos grupos de estudio.

Para algunos autores (DeSalle *et al.*, 2005), es más conveniente considerar que los procedimientos de descubrimiento de especies a través del código de barras sean considerados como una ‘prospección molecular’, más que un proceso de delimitación de especies, para lo cual se requieren generar otros datos y realizar otros procedimientos analíticos. Tal y como lo concluye Pérez-Ponce de León (2017), cualquier estudio de biodiversidad que utilice secuencias de ADN debe considerar, en principio, métodos basados en caracteres que permitirán reconocer la existencia de especies distintas, incluidas las especies crípticas, con base en un nivel de divergencia genética, esto partiendo del hecho de que la morfología de los individuos en estudio muestre que no hay caracteres que los distingan; sin embargo, este primer paso debe de ser sujeto a una prueba de hipótesis que permita realizar una delimitación robusta de las especies. Aquí es donde los métodos basados en árboles representan la mejor alternativa para definir la independencia de los linajes genéticos, y así demostrar que los individuos analizados representan especies distintas.

¿Por qué son importantes las especies crípticas en la sistemática?

Dado que las especies son las unidades básicas en estudios de biodiversidad, es fundamental descubrirlas, delimitarlas y describirlas formalmente, incluyendo por supuesto aquellas especies que en principio son reconocidas como especies crípticas. El reconocimiento de especies crípticas tiene implicaciones muy importantes para nuestro conocimiento de la biodiversidad. El conocimiento debe ser preciso para responder a la pregunta de cuántas entidades evolutivas conforman la biota actual, lo cual es resultado de miles de millones de años de evolución. Muchas de las especies que componen esta biodiversidad, son utilizadas por el ser humano para su bienestar y supervivencia. Mientras más especies conozcamos, mejor uso podremos hacer de ellas. Pero también está implícita la importancia de reconocer a las especies para entender su historia evolutiva y biogeográfica y cómo la historia geológica del planeta ha determinado no solo los patrones de distribución que observamos, sino también los procesos que generan la diversificación de las especies en el tiempo y en el espacio.

Si la existencia de las especies crípticas no es definida con base en un riguroso método de delimitación (estén formalmente descritas o solo reconocidas como linajes evolutivos independientes), los estudios de ecología, biología evolutiva, biogeografía, e incluso de biología de la conservación, podrían llegar a conclusiones equivocadas. Por ejemplo, las relaciones filogenéticas entre especies hermanas y la interpretación de los procesos evolutivos (especiación, adaptación) que dieron origen a estas relaciones, pueden cambiar drásticamente si lo que se considera que es una especie resulta ser en realidad dos o más (Logo *et al.*, 2022; Newmaster *et al.*, 2009). Por su parte, la descripción de patrones biogeográficos y macroecológicos robustos depende, en primera instancia, de registros de distribución geográfica confiables (basados en estudios taxonómicos realizados por especialistas) y de la certeza de que cada punto de distribución de una especie corresponda a una especie en particular y no a un conjunto de especies que no habían sido reconocidas como diferentes.

Independientemente de los patrones observados, algunos autores han discutido los factores que determinan el surgimiento de las especies crípticas en la

evolución. Para saber más sobre esto, sugerimos al lector referirse a los trabajos de Struck *et al.* (2018, 2019), donde se discuten los procesos de divergencia reciente, paralelismos, convergencia y estasis evolutiva, los cuales pueden explicar el origen de las especies crípticas y sus implicaciones ecológicas. Estos autores han descrito un marco conceptual unificado para el reconocimiento de las especies crípticas en la naturaleza.

Finalmente, muchos trabajos han enfatizado la importancia de considerar a las especies crípticas en nuestras interpretaciones de la biodiversidad en el planeta (v. gr. Bickford *et al.*, 2007; Beheregaray *et al.*, 2007; Pfenninger *et al.*, 2007; Nadler *et al.*, 2011; Chenuil *et al.*, 2019). Dentro de este contexto, el diseño de estrategias de conservación de las especies requiere definir si las entidades biológicas que se pretende conservar representan una o más especies. Un ejemplo emblemático es el caso de las jirafas (*Jiraffa camelopardalis*), consideradas tradicionalmente una sola especie en África; no obstante, después de un estudio en donde se analizaron genes mitocondriales y nucleares (microsatélites), se demostró que en realidad eran seis linajes evolutivos distintos (Brown *et al.*, 2007). Otro ejemplo que también atañe a especies amenazadas es el descrito por Russello *et al.* (2005), quienes encontraron tres linajes genéticos distintos en lo que se consideraba una sola especie de tortuga gigante de las Islas Galápagos. Esto tiene implicaciones importantes al momento de diseñar estrategias de conservación, asignar presupuesto y decidir sitios de aplicación, lo cual estará en función del número de especies a considerar. Utilizando datos moleculares, los autores analizaron la diagnosibilidad, nivel de divergencia genética y posición filogenética para reconocer al menos un nuevo taxón críptico entre las poblaciones de tortugas.

Asimismo, debemos considerar que para cada grupo de organismos en el planeta, las especies crípticas tienen un significado y una importancia específica. Tan solo como ejemplo, en el campo de la parasitología, descubrir especies crípticas es de gran relevancia no solo para comprender la frecuencia relativa del parasitismo como una forma de vida muy exitosa, sino también para abordar aspectos prácticos relacionados con la epidemiología, control biológico y desarrollo de fármacos para enfrentar infecciones parasitarias en la especie humana (ver Nadler *et al.*, 2011).

En conclusión, las especies crípticas representan todo un reto para entender la biodiversidad en el planeta, pero existen ahora las herramientas metodológicas y analíticas para abordar su estudio de manera integral y de esta forma poder reconocerlas, delimitarlas, describirlas y nombrarlas, lo que seguramente redundará en estudios más completos y precisos en distintas áreas del conocimiento biológico.

Agradecimientos

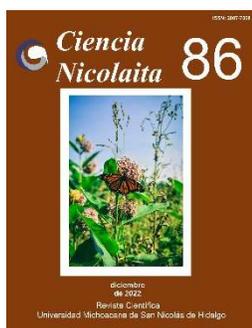
Las ideas expresadas en este trabajo son el resultado de investigaciones que los autores hemos realizado sobre la diversidad genética de parásitos de fauna silvestre. En particular, deseamos agradecer a los programas que financian nuestro trabajo de investigación, en este momento, el programa PAPIIT - UNAM (IN212621) y el Proyecto de Ciencia Básica del CONACYT (No. A1-S-21649). Al Dr. Leopoldo Andrade Gómez por la lectura crítica del manuscrito.

Referencias

- Beheregaray, L.B., and Caccone, A, 2007, Cryptic biodiversity in a changing world: *Journal of Biology*, 6, 9. <https://doi.org/10.1186/jbiol60>
- Bickford, D., Lohman, D.J., Sodhi, N.S., Ng, P.K., Meier, R., Winker, K., Ingram, K., and Das, I., 2007, Cryptic diversity as a window on diversity and conservation: *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.11.004>
- Blaxter, M.L., 2004, The promise of a DNA taxonomy: *Philosophical transactions of the royal society of London*, 359, 669-679.
- Blouin, M.S., 2002, Molecular prospecting for cryptic species of nematodes: mitochondrial DNA versus internal transcribed spacer: *International Journal for Parasitology*, 32, 527-531. [https://DOI:10.1016/s0020-7519\(01\)00357-5](https://DOI:10.1016/s0020-7519(01)00357-5)
- Brown, D.M., Breneman, R.A., Koepfli, K.P., Pollinger, J.P., Milá, B., Georgiadis, N.J., Louis Jr, E.E., Grether, G.F., Jacobs, D.K., and Wayne R.K., 2007, Extensive population genetic structure in the giraffe: *BMC Evolutionary Biology*, 5, 57. <https://doi.org/10.1186/1741-7007-5-57>
- Chenuil, A., Cahill, A.E., Délémontey, N., Du Salliant du Luc, E., and Fanton, H., 2019, "Problems and Questions Posed by Cryptic Species. A Framework to Guide Future Studies" en E. Casetta, J. Marques da Silva, and D. Vecchi, eds., From Assessing to Conserving Biodiversity. History, Philosophy and Theory of the Life Sciences, vol 24. https://doi.org/10.1007/978-3-030-10991-2_4
- Dayrat, B., 2005, Towards integrative taxonomy: *Biological Journal of the Linnean Society*, 85, 407-415. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2005.00503.x>
- DeSalle, R., Egan, M.G., and Siddal, M., 2005, The unholy trinity: taxonomy, species delimitation and DNA barcoding: *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 360, 1905-1926. <https://doi:10.1098/rstb.2005.1722>
- Hennig, W., 1966, Phylogenetic systematics: *University of Illinois Press*, Urbana, IL.
- Jörger, K.M., and Schrödl, M., 2013, How to describe a cryptic species? Practical challenges of molecular taxonomy: *Frontiers in Zoology*, 10, 59. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-10-59>
- Logo, G.C., Harms, J., Hydem J.R., Craig, M.T., Ramón-Laca, A., and Nichols, K.M., 2022, Genome-wide markers reveal differentiation between and within the cryptic sister species, sunset and vermilion rockfish: *Conservation genetics*, 23, 75-89. <https://doi.org/10.1007/s10592-021-01397-4>
- Morrone, J., 2013. Sistemática. Fundamentos, métodos, aplicaciones: *México, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias*, p. 508.
- Nadler, S.A., and Pérez-Ponce de León, G., 2011, Integrating molecular and morphological approaches for characterizing parasite cryptic species: implications for parasitology: *Parasitology*, 138, 1688-1709. <https://doi:10.1017/S003118201000168X>
- Newmaster, S.G., and Ragupathy, S., 2009, Testing plant barcoding in sister species complex of pantropical *Acacia* (Mimosoideae, Fabaceae): *Molecular Ecology Resources*, 9 (suppl. 1), 172-180.
- Padial, J.S., Miralles, A., De la Riva, I., and Vences, M., 2010, The integrative future of taxonomy: *Frontiers in Zoology*, 7, 16. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-7-16>
- Pérez-Ponce de León, G., and Nadler, S.A., 2010, What we don't recognize can hurt us: a plea for awareness about cryptic species: *Journal of Parasitology*, 96, 453-464. <https://doi:10.1645/GE-2260.1>
- Pérez-Ponce de León, G., 2017, "Reconocimiento y delimitación de especies crípticas", in R. Mata-López, A.N. Castañeda Sortibán, E.A. García Trejo, M.B. Honety Escandón, M.B. Mendoza Garfias, and P. Cervantes Agui-



- lar, eds., *Manual de Sistemática Molecular y Bioinformática*, Las Prensas de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, pp. 200-214.
- Pérez-Ponce de León, and Poulin, R., 2016, Taxonomic distribution of cryptic diversity among metazoans: not so homogeneous after all: *Biological Letters*, 12, 20160371. <https://doi:10.1098/rsbl.2016.0371>
- Pfenninger, M., and Schenk, K., 2007, Cryptic animal species are homogeneously distributed among taxa and biogeographical regions: *BMC Evolutionary Biology*, 7, 121. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-7-121>
- Russello, M.A., Glaberman, S., Gibbs, J.P., Márquez, C., Powell, J.R., and Caccone, A., 2005, A cryptic taxon of Galápagos tortoise in conservation peril: *Biological Letters*, 1, 287-290. <https://doi:10.1098/rsbl.2005.0317>
- Sáez, A.G., and Lozano, E., 2005, Body doubles: *Nature*, 13, 433. doi: 10.1038/433111a.
- Schlick-Sateiner, B.C., Seifert, B., Stauffer, C., Christian, E. Crozier, R.H., and Steiner, F.M., 2007, Without morphology, cryptic species stay in taxonomic crypsis following Discovery: *Trends in Ecology and Evolution*, 22, 391-392. <https://doi:10.1016/j.tree.2007.05.004>
- Struck, T.H., and Cerca, J., 2019, Cryptic species and their evolutionary significance: *Encyclopedia of Life of Science*. <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0028292>
- Struck, T.H., Feder, J.L., Bendiksbj, M., Birkeland, S., Cerca, J., Gusarov, V.I., Kistenich, S., Larsson, K.H., Liow, L.H., Nowak, M.D. et al., 2018, Finding evolutionary processes hidden in cryptic species: *Trends in Ecology and Evolution*, 33, 153-163. <https://doi:10.1016/j.tree.2017.11.007>



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

La relevancia emergente de una visión pluralista de la biología sistemática

The emerging relevance of a pluralistic view of systematic biology

Efraín De Luna*, Dolores González

Para citar este artículo: Efraín De Luna*, Dolores González, 2022. La relevancia emergente de una visión pluralista de la biología sistemática. Ciencia Nicolaita no. 86, 54-68. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.676>



Historial del artículo:

Recibido: 6 de julio de 2022

Aceptado: 28 de septiembre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: efrain.deluna@inecol.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



La relevancia emergente de una visión pluralista de la biología sistemática

The emerging relevance of a pluralistic view of systematic biology

Efraín De Luna*, Dolores González

Biodiversidad y Sistemática, Instituto de Ecología, A. C., Xalapa, Ver. México.

Resumen

El impacto de los datos moleculares y la aplicación de métodos analíticos para la inferencia de filogenias, han promovido la división epistemológica y separación gremial entre los taxónomos. Un diagnóstico de esta disociación son las filogenias moleculares sin referencia a los caracteres taxonómicos, homología, sinapomorfias, ni a las conclusiones taxonómicas inferidas mediante los grupos monofiléticos. Se argumenta la relevancia de la biología sistemática como ciencia epistemológicamente pluralista, con al menos tres componentes: la perspectiva histórica, la exploración de la biodiversidad y el manejo de la información taxonómica. La pluralidad epistemológica lleva a integración, no a antagonismos, ni competencia interna. Bajo esta visión, cada una de las tres áreas tiene la misma importancia, aunque diferentes requerimientos empíricos, analíticos y tecnológicos.

Palabras clave: epistemología, educación, secuencias del DNA, morfología, inventarios

Abstract

The impact of molecular data and the application of analytical methods for the inference of phylogenies have promoted an epistemological division and separation among taxonomists. A diagnosis of this dissociation are the molecular phylogenies without reference to taxonomic characters, homology, synapomorphy, nor to the taxonomic conclusions inferred by monophyletic groups. We argue the relevance of systematic biology as an epistemologically pluralist science with at least three components: the historical perspective, the exploration of biodiversity, and the management of taxonomic information. Epistemological plurality leads to integration, not antagonisms, or internal competition. Under this vision, each of the three areas has the same importance, although different empirical, analytical, and technological requirements.

Keywords: epistemology, education, DNA sequences, morphology, inventories

Introducción

La sistemática se ha convertido en un área de gran importancia para la biología moderna. El conocimiento generado por los taxónomos en todo el mundo ha sido fundamental para el descubrimiento de nuevas medicinas, compuestos químicos industriales, recursos genéticos para el desarrollo agrícola, forestal y pesquero, diagnosis de patógenos y control de pestes. También la sistemática es central en el esfuerzo de conservación de grupos taxonómicos o ambientes prioritarios. Además, si se sostiene que la mejor manera de entender los procesos biológicos es analizarlos en un contexto comparativo, resulta necesario que las unidades de estudio y que la clasificación sean el reflejo de la historia filogenética de los organismos para tener una base robusta de comparación. Evidentemente, la sistemática provee los fundamentos que permiten la organización de todo el conocimiento biológico (Systematics Agenda 2000, 1991; Cracraft, 2002; Daly *et al.*, 2012; Hinchliff *et al.*, 2014). Uno de esos fundamentos es el marco de trabajo conceptual histórico, el cual no puede ser generado por ningún otro segmento de la comunidad biológica (Chernoff *et al.*, 1989).

La relevancia de las hipótesis de relaciones filogenéticas, radica en que proveen un enfoque científico para el estudio de la trayectoria histórica de los procesos, las unidades y la distribución en el tiempo y el espacio de la diversidad biológica (Schuh, 2000; Wheeler, 2012). Tal perspectiva histórica se modela en forma de hipótesis filogenéticas explícitas, sean moleculares (secuencias de nucleótidos en porciones del ADN, genomas, transcriptomas) o combinadas con otros tipos de datos (por ejemplo, datos morfológicos, morfométricos, conductuales, etc.). Las filogenias inferidas tienen aplicaciones siempre que se lleven a cabo comparaciones entre organismos. Las filogenias se consideran como la base para las inferencias sobre la historia del cambio de los caracteres y la secuencia temporal del origen y distribución geográfica de los grupos, patrones y procesos a la escala micro y macroevolutiva, así como las interacciones ecológicas. Por esta razón, los desarrollos teóricos de la sistemática, los métodos filogenéticos y las filogenias publicadas no solo son de interés para los taxónomos, sino también para una audiencia científica más amplia que incluye todos los estudiosos de las ciencias biológicas,

particularmente ecólogos, etólogos, biólogos de la conservación y aun algunas disciplinas comparativas fuera de la biología (Platnick y Cameron, 1977; Wiley, 1981; Myers y Giller, 1988; Smith y Donoghue, 2010; Nunn, 2011; Wheeler y Whiteley, 2015).

Dos factores han ayudado a percibir la importancia de la investigación sistemática, por un lado, el impacto del uso de datos moleculares y por otro, la aplicación de métodos cuantitativos (parsimonia, verosimilitud y probabilidades Bayesianas) para la agrupación de la variación de esos datos y la conformación de grupos taxonómicos. Mucho del dinamismo de la investigación taxonómica en las décadas recientes, es de hecho el producto de la disponibilidad cada vez más amplia de tecnologías de generación de datos mediante secuenciación automatizada del ADN (Meier, 2008; Heather y Chain, 2016). Tal dinamismo ha llevado a algunos al extremo de anticipar el tiempo en el que la taxonomía consista fundamentalmente en obtener secuencias de nucleótidos y confrontar esos datos para solucionar la siempre difícil tarea de identificación de especímenes (Tautz *et al.*, 2003; Taylor y Harris, 2012). Esta idea comercializada como “DNA barcoding”, se promovió considerando que el número de taxónomos en el mundo ha declinado al grado de poner en peligro la propia existencia de la taxonomía; este enfoque reduccionista fue duramente refutado (Prendini, 2005; Wheeler, 2005; Will *et al.*, 2005). La reacción generada en la comunidad de taxónomos solo resaltó la importancia de los objetivos científicos de la sistemática y de la necesidad de un universo amplio y heterogéneo de datos para un enfoque integrativo (Dayrat, 2005), tanto en las decisiones de identificación como en la clasificación (Will *et al.*, 2005, Meier, 2008).

Aunque probablemente algunas actividades de la taxonomía están en crisis (Agnarsson y Matjaž, 2007; Wheeler, 2013; Villaseñor, 2015), una tesis de esta revisión es que la amenaza más peligrosa es la división epistemológica y consecuente separación gremial entre los propios taxónomos. Unos especializándose en el uso de datos moleculares para propósitos de estudios filogenéticos (sistemática molecular), y otros dedicándose únicamente a la descripción de especies, exploraciones de la diversidad y la identificación de especímenes para inventarios por áreas geográficas. Uno de los diagnósticos de esta tendencia es la disociación epistemológica entre los análisis filogenéticos

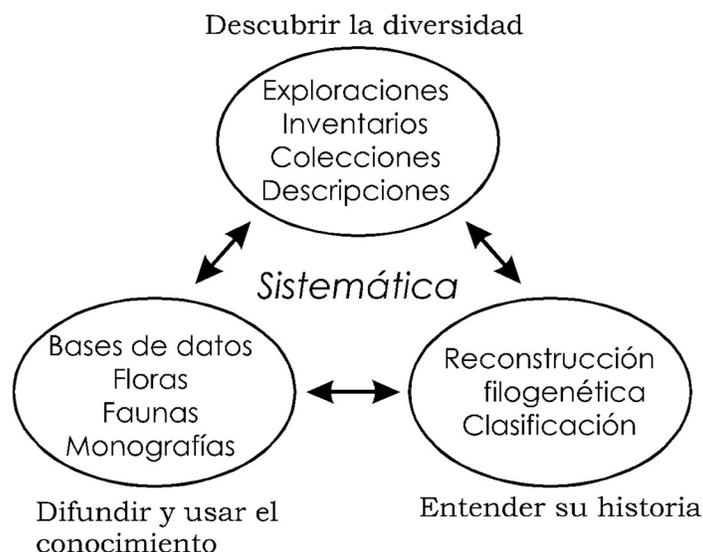


Figura 1. Una visión de la estructura pluralista de la sistemática con al menos tres componentes.

y la clasificación taxonómica (Wheeler, 2004; Franz, 2005; Figura 1). Tal divergencia ha estado asociada a la proposición de que el interés central de la sistemática son las propiedades estadísticas de las filogenias “and it is nearly irrelevant how they are used in taxonomy” (Felsenstein, 2001, p. 467), por lo que bajo este enfoque epistemológico de la sistemática, “the delimitation of higher taxa is no longer a major task of systematics” (Felsenstein, 2004, p. 145). Para muchos, ahora la sistemática solo consiste metodológicamente en los análisis filogenéticos con datos moleculares y la descripción estadística (*sensu* Felsenstein, 2004) de las propiedades de las hipótesis filogenéticas mismas. Este tipo de análisis procede aplicando métodos probabilísticos para estimar los valores de las verosimilitudes máximas y probabilidades Bayesianas de las hipótesis filogenéticas (De Luna *et al.*, 2005). Al usar estos métodos, se está normalizando cada vez más inferir filogenias moleculares sin luego hacer referencia a los caracteres taxonómicos (ni morfológicos, ni moleculares), ni a las homologías, las sinapomorfias y los grupos monofiléticos (Wheeler, 2008, 2016; Assis, 2017). Tal disociación indica un olvido fundamental del contenido pluralista, tanto intelectual como empírico de la biología sistemática. El futuro de la sistemática se basa en una visión pluralista sin tanto énfasis en las diferencias por los dominios de estudio (por grupos taxonómicos o por áreas geográficas) o en la tecnología de los tipos de datos (moleculares o morfológicos).

Otro diagnóstico de la disociación epistemológica es la segregación curricular de la sistemática en los planes educativos. Las nuevas generaciones comienzan con la bifurcación entre filogenias y taxonomía ante el énfasis en los cursos de sistemática solo para la reconstrucción de filogenias y los escasos cursos para la identificación y exploración de la diversidad taxonómica. Décadas atrás, la misma separación entre los análisis filogenéticos y la taxonomía, se debía justamente a la circunstancia educativa opuesta. Ciertamente, varios factores históricos podrían ayudar a entender la actual circunstancia (Michán y Llorente, 2003; Llorente-Bousquets, *et al.*, 2008). Taxónomos aún activos se formaron en la etapa de la concepción de la taxonomía como ciencia exploratoria y descriptiva. Otros, no incorporaron las filogenias en su investigación por la resistencia sociológica ante el desarrollo de los nuevos métodos de inferencia de los grupos taxonómicos. Sin duda, un factor histórico que ha contribuido también a la actual separación entre filogenias y taxonomía, es la carencia de un conocimiento taxonómico básico de muchos grupos de organismos, tanto de plantas como de animales. Aún ahora esto sigue siendo un impedimento para emprender estudios filogenéticos con organismos de los que no se sabe casi nada o que hay enormes huecos en su taxonomía por su enorme diversidad. El reto que tiene el sistema educativo, es el de brindar las opciones para la oportunidad de formarse con los conceptos, métodos analíticos y herramientas tecnológicas digitales bajo una visión pluralista.

En este marco, el propósito de esta contribución es destacar la relevancia de la educación y la investigación en la biología sistemática entendiéndola como una actividad epistemológicamente pluralista que integra al menos tres componentes: la perspectiva histórica, la exploración de la diversidad biológica y el manejo de la información sobre las especies del planeta. Al describir la estructura epistemológica de estos tres componentes de la sistemática, se señalan algunos de los avances y retos en cada área. En el contexto de los taxónomos, el objetivo de promover tal visión pluralista es transformar la manera como vemos la estatura científica de nuestra propia disciplina. Resulta imperativo que entendamos cómo ha madurado la sistemática epistemológicamente en esas tres áreas, expandiendo la base empírica con nuevos datos y fortaleciendo las capacidades analíticas y predictivas con nuevos métodos inferenciales. En el contexto general de la comunidad científica, se espera que esta contribución ayude a resaltar la importancia emergente de la sistemática, argumentando su estado actual como ciencia madura en los tres principales componentes de la sistemática biológica.

La estructura pluralista de la Biología Sistemática

Nuestra habilidad de convivir satisfactoriamente con las más de ocho millones de especies que habitan el planeta (Mora *et al.*, 2011), depende del discernimiento que tenemos de ellas. Este comienza con nuestro conocimiento de cuántas especies existen y dónde se distribuyen. Un mejor entendimiento se logra cuando investigamos cuáles son sus características morfológicas, bioquímicas o genéticas y cómo su existencia particular se relaciona histórica y ecológicamente con otras especies, inclusive la nuestra. La generación y comunicación de este conocimiento básico para documentar, entender y conservar la biodiversidad, son las tareas de la biología sistemática (Systematics Agenda 2000, 1991; Daly *et al.*, 2012). El campo de acción de los taxónomos es vasto y consta por lo menos de tres áreas complementarias (Figura 1).

Un área primaria de la sistemática la constituyen los estudios de exploración de la biosfera e inventariado de la biodiversidad, tanto actual (neontología) como del pasado (paleontología). Dada la inmensidad de la diversidad orgánica, la tarea de exploración es

tan enorme que fácilmente consume el trabajo entero del taxónomo. Otra parte básica e indispensable, consiste en el estudio de los patrones históricos y la elaboración de hipótesis sobre la filogenia para la clasificación de la vida. Además de la reconstrucción filogenética, el tercer componente comprende la difusión y el uso del conocimiento que la sistemática genera. Esta información se transmite principalmente a través de floras, faunas y monografías.

La argumentación de una perspectiva pluralista del estudio científico de la diversidad biológica, se ha organizado aquí en tres temas fundamentales: 1) Exploración de la diversidad; 2) Reconstrucción histórica; y 3) Difusión y uso del conocimiento (Figura 1). En cada tema se describen los objetivos y tareas particulares. La investigación en cada una de las tres tareas seguirá requiriendo de diferentes habilidades educativas y recursos tecnológicos de vanguardia. En esta exposición se resaltan los avances y retos vigentes que apuntan hacia nuevos desarrollos empíricos, metodológicos o conceptuales. Evidentemente, esto también señala la educación y colaboración transdisciplinaria cada vez más exigente en cuanto al entrenamiento necesario en filosofía de la ciencia, estadística, biología molecular, etc., para los estudiantes de sistemática biológica.

Los avances y retos en el área de exploración

La dimensión de la tarea exploratoria de los biólogos sistemáticos ha ilustrado cómo el esfuerzo requerido para leer millones de libros en medio de una biblioteca incendiándose. Considerando la estimación de que existen al menos ocho millones de especies en la Tierra (Mora *et al.*, 2011) y que se extinguen unas 27 000 especies por año (Wilson, 1992), la situación equivale a que en los últimos trescientos años se hubieran alcanzado a “leer” solo un poco más del 15 % de los libros, mientras que se ha perdido el 1 % del total cada cuatro años. No es difícil visualizar que a ese ritmo de exploraciones, el catálogo completo de la vida en el planeta está en el futuro muy lejano, al tiempo que la tasa de extinción se acelera. Ante este escenario, la conservación de la diversidad biológica ha sido el primer objetivo de la “Convención sobre Diversidad Biológica” de la ONU (CBD, 1993). No obstante, la expansión de poblaciones humanas, el incre-

mento de la pobreza, los conflictos militares y políticos y la sobreexplotación de los recursos naturales, continúan con el deterioro de la calidad ambiental y el consecuente exterminio irreversible de la diversidad de especies conocidas y no conocidas. La tarea del biólogo sistemático de identificar, catalogar y documentar la vida en la Tierra es entonces inmensa, imprescindible y urgente.

Los retos en el área exploratoria de la sistemática en Latinoamérica son enormes y, aunque ha habido avances (Forero, 1994), el ritmo de investigación todavía es muy lento. En México, CONACYT ha financiado buena parte de la investigación taxonómica y, además, existe un programa gubernamental (CONA-BIO) dirigido especialmente a atender esta necesidad (Llorente-Bousquets, 2008). La tendencia en las últimas décadas ha sido que los recursos se destinen a “ciencia aplicada” y los trabajos taxonómicos no son considerados como tales. Indudablemente, cualquier plan de desarrollo científico debe promover la continuidad y expansión de los esfuerzos gubernamentales para investigación sobre exploración e inventarios de la biodiversidad. No obstante, nuestro ritmo de trabajo no solo depende de mayores recursos financieros, sino también de una mejor capacitación curricular. Los taxónomos tenemos la obligación de educarnos mejor para lograr competitividad al concursar por los recursos. Central a ese propósito, es urgente que nuestros programas de posgrado formen investigadores científicos con las habilidades teóricas y metodológicas de la sistemática pluralista de nuestro tiempo. Se requiere una educación de la biología sistemática pluralista diseñada para que abarque los tres componentes y que proporcione las capacidades para la tarea de explorar, documentar, entender e interpretar la historia de la diversidad y la consecuente difusión del conocimiento.

Los avances y retos en el área de la reconstrucción histórica.

La clasificación consiste en agrupar organismos en especies y estas a su vez en grupos taxonómicos mayores. Tal tarea requiere inferir la historia de esos grupos y cómo se relacionan entre sí (filogenia). Estas deducciones científicas de eventos en el pasado derivan del examen minucioso de la variación de características en muchos organismos fósiles o actuales, por

ejemplo, se estudia la variación en la anatomía, los cromosomas y las estructuras morfológicas. Un desarrollo constante ha sido la disponibilidad para los taxónomos de equipo de laboratorio necesario para estudiar la variación en las secuencias del ADN, frecuentemente todavía por sectores o genes particulares (González, 1998), pero ahora también genomas completos y transcriptomas (Pyron, 2015; Bowman *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2019; Kapli *et al.*, 2020). Cualquiera que sea la naturaleza de los datos, las observaciones sobre la variación entre organismos siempre se interpreta para deducir la jerarquía de grupos mediante la detección de la relación de ascendencia-descendencia entre las especies e inferir cómo clasificarlas. Tal valoración inferencial de los datos (sean morfológicos o moleculares) se efectúa mediante métodos numéricos (parsimonia, verosimilitudes, probabilidades Bayesianas) para el análisis de similitudes conocidos como “filogenéticos” (De Luna *et al.*, 2005). El resultado de estos análisis es la formación de grupos a varios niveles taxonómicos y constituye lo que técnicamente conocemos por “clasificar”. La construcción del sistema de clasificación consiste en dos componentes metodológicamente distintos: a) el reconocimiento de los grupos o linajes (agrupación), y b) la organización de esos grupos en un sistema de rangos (categorías taxonómicas).

Agrupación. Entre los distintos criterios, se ha intentado formar grupos por cuestión de su similitud total (clasificación fenética) o por la interpretación de su presunta derivación evolutiva (c. evolutiva). Alternativamente, en los sistemas de clasificación filogenéticos se agrupan los organismos por compartir la ancestría o linaje (filogenia), la cual se deduce de un cladograma. Por lo tanto, la pregunta del sistemático filogenético ya no es: ¿cuál especie “deriva” de otra?, sino: ¿cuál especie es “hermana” de otra? Las especies hermanas se clasifican en el mismo género (o linaje) y así sucesivamente se forman los demás grupos taxonómicos. Los biólogos sistemáticos elaboran estas decisiones con la formalidad característica de las hipótesis científicas sujetas a refutación (De Luna, 1995).

La formalización de la sistemática como ciencia, ha sido posible gracias al desarrollo de los análisis filogenéticos de las similitudes (morfológicas, moleculares, etc.) como mecanismo de inferencia para producir o

refutar hipótesis sobre homología y grupos monofiléticos (De Luna, 1996; De Luna y Mishler, 1996). La disponibilidad de nuevas fuentes de datos, sin duda ha vigorizado a la sistemática por el fortalecimiento de su base empírica; no obstante, esta ciencia se ha formalizado y ha avanzado aceleradamente por los cambios en los conceptos y sus métodos de análisis de caracteres y los métodos para la inferencia de filogenias (De Luna *et al.*, 2005). El desarrollo de los métodos cladísticos ha provisto un contenido teórico robusto a la parte de la sistemática que se encarga de construir el marco histórico para la biología. Lo anterior se ha visto reflejado en el impacto conceptual y metodológico en otras áreas de investigación, especialmente la biogeografía y la ecología comparada (Brooks y McLennan, 1991; Harvey y Pagel, 1991; Weber y Agrawal, 2012).

Categorías taxonómicas. La comunidad taxonómica ha convenido que ordenar y nombrar la diversidad de formas de vida requiere de un sistema limitado y estable de siete categorías básicas (o rangos) para colocar subgrupos de organismos dentro de otros grupos principales. La primera vez que se aplicaron consistentemente estas categorías taxonómicas, fue en la obra *Systema Naturae* de Carlos Linneo desde 1758. Su sistema de categorías consistía en solo cuatro rangos: “especies” agrupadas en “géneros”, “órdenes” y “clases”. El sistema de rangos actual se ha modificado sustancialmente, pero las categorías taxonómicas lineanas siguen en uso. En muchos casos, la estructura de categorías taxonómicas se ha expandido para acomodar niveles intermedios designados con los prefijos “sub” o “super” dependiendo del nivel. Por ejemplo, podemos encontrar subfamilias, superórdenes y subreinos, entre otros.

La categoría taxonómica más elemental es para ciertos grupos reconocidos como especies. En una secuencia de grupos dentro de grupos, el problema ha sido a cuál nivel se le asigna a un grupo el rango de especie. Desde Linneo, se entendía que los grupos de organismos morfológicamente distintos debían ser reconocidos a este rango, pero solo si las diferencias persistían en la descendencia. A partir de la tercera década del siglo XX, tal concepto de la “relación reproductiva” como método para reconocer especies se perpetuó con elementos del desarrollo de la genética de poblaciones y heredabilidad de características en ambientes controlados. El concepto “biológico” de especie entonces se integró como la unidad funcional en

la teoría sintética de la evolución y el neodarwinismo. Simpson (1961) y Mayr (1963) promovieron el concepto “biológico” de especie como el grupo de organismos que poseen características semejantes, capaces de fecundarse entre sí y que tienen descendencia fértil. En medio de otro cambio conceptual (teoría filogenética o cladismo) en la sistemática biológica iniciado por Hennig (1966), la especie ha pasado actualmente a concebirse como un grupo o “linaje” de organismos conectados por su ancestría o filogenia común (concepto filogenético de especie, ver referencias en Wilson, 1999). La “relación reproductiva” se sustituye con el concepto de la “relación de ancestría filogenética”. Un resumen recomendable de los distintos conceptos y definiciones de “especie” lo podemos encontrar en el libro de texto de Wheeler (2012). La idea principal es que, bajo un enfoque filogenético, los linajes se descubren con métodos numéricos de agrupación, los cuales seleccionan hipótesis óptimas bajo criterios alternativos de parsimonia, verosimilitudes y probabilidades Bayesianas (De Luna *et al.*, 2005). Algunos de los grupos monofiléticos descubiertos cuantitativamente pueden nombrarse al rango de especies (Mishler, 2009). Pero ante varios grupos anidados en una filogenia, queda aún la decisión sobre cuáles grupos monofiléticos se les puede asignar o no cierto rango.

Si bien las decisiones de agrupación dependen de métodos cuantitativos de inferencia sobre el valor informativo de las similitudes, sean morfológicas o moleculares, las decisiones sobre la asignación de rango han sido mayormente arbitrarias. En el caso del rango de especie, una idea es que las diferencias entre especies deben ser características cuya variación es heredada y transmitida a los descendientes (apomorfias). Bajo esta idea, el aislamiento reproductivo no agrupa, sino que se considera uno de los criterios para asignar el rango de especie solo a grupos que mantienen la cohesión y separación reproductiva. A cualquier nivel, el grupo como linaje se reconoce por las características poseídas solo por organismos filogenéticamente conectados (sinapomorfias, Mishler y De Luna, 1997), pero no hay métodos cuantitativos para la asignación de cada rango, como el de género, el de familia, o el de clase, el cual sigue siendo por convención.

Los rangos proveen el contexto para la aplicación de los nombres científicos de los grupos taxonómicos. En vista de la arbitrariedad en la asignación de rangos,



se ha argumentado en dos direcciones. Por un lado, se ha propuesto que los rangos no deberían influir en las reglas de aplicación de los nombres científicos de los grupos. Actualmente, la sintaxis de los nombres en latín incluye sufijos correspondientes a ciertas categorías taxonómicas. Por ejemplo, el sufijo “ceae” implica un grupo de plantas al nivel de familia, como en *Rosaceae*. Unas propuestas sugieren modificar o eliminar este tipo de sufijos y abandonar por completo el sistema de rangos (Hennig, 1975; Hull, 1966; Wiley, 1979, 1981). Como alternativa se han considerado diversos criterios y sintaxis para los nombres (Serenó, 2005), incluso el uso de códigos de números para indicar la posición filogenética de cada grupo (Queiroz y Gauthier, 1990, 1992). La idea de un sistema sin rangos argumenta que se puede nombrar un linaje o grupo relevante, pero sin la connotación nomenclatural de un rango en particular usando “nombres con terminaciones estándar” (Naomi, 2014). Por otro lado, tanto la propuesta de un sistema sin rangos, como la nomenclatura alternativa, han encontrado resistencia en la comunidad taxonómica. Hay quienes consideran que los rangos y la nomenclatura asociada han sido útiles, pues contienen información taxonómica, facilitan la comunicación y sirven como representantes para la organización del árbol de la vida (Nixon *et al.*, 2003; Giribet *et al.*, 2016).

Los avances y retos en el área de difusión del conocimiento taxonómico

Los sistemas de clasificación tradicionalmente se han publicado en forma de monografías, revisiones y sinopsis de grupos taxonómicos particulares. El énfasis de estas obras es sobre un taxón y varían en la cobertura de las descripciones de las especies, los nombres científicos en sinonimia, la distribución ecológica y geográfica, las observaciones acumuladas de varios sistemas de caracteres (citológicos, químicos, anatómicos, etc.) y otros datos suplementarios. Cuando el énfasis no es sobre un taxón, sino sobre la diversidad en una región particular, entonces ese conocimiento se ha publicado en tratados (por ejemplo, *Flora Neotrópica*) que incluyen claves de identificación e ilustraciones de las especies. El gran número de especies del taxón o lo extenso de la región, llevan a que muchos de los trabajos sean un compromiso entre estos dos

enfoques y entonces se publica el tratamiento de un taxón para un área geográfica particular (por ejemplo, la serie *Flora de Veracruz*). Cualquiera que sea la extensión de la obra, se ha establecido la nomenclatura taxonómica, las claves de identificación y las bases de datos como los elementos universales en la comunicación del conocimiento taxonómico. El reto ahora es transitar hacia el uso de las nuevas vías de comunicación con la tecnología digital e internet (Gostel *et al.*, 2013).

Un elemento importante en la comunicación y difusión del conocimiento, es la nomenclatura científica asociada a la clasificación biológica. La comunidad taxonómica mundial ha convenido que los nombres de todos los grupos de organismos, desde el rango de especie hasta el de Reino, se comuniquen en latín; en algunos grupos taxonómicos se ha usado el griego para los nombres de las categorías supraespecíficas (por ejemplo, *Arthropoda*, R. Novelo com. pers., 2022). La convención se originó cuando Carlos Linneo, en 1758, enlistó y describió en latín un compendio mundial en dos volúmenes (*Systema Naturae*) de las especies de plantas y animales conocidas en ese tiempo. Desde entonces, el establecimiento de nuevos nombres para los grupos o especies recién descubiertas se regula por este sistema. Los procedimientos detallados de validación y prioridad de nombres científicos se publican en códigos internacionales de nomenclatura. Una iniciativa favorable fue la de agregar el inglés como “idioma oficial” en la publicación de las descripciones originales de las plantas, en el código de Melbourne (McNeill, 2012; Art 39.2). Al hacer al inglés un idioma alternativo para las diagnósticas, se ha favorecido la participación de taxónomos jóvenes en la descripción de especies, pues el latín no se enseña en ningún programa de la carrera de biología ni en los posgrados. Evidentemente, se continuará usando el sistema Linneano de rangos, la nomenclatura de los grupos y el latín en las diagnósticas originales, al tiempo que las alternativas siguen provocando discusiones y generando soluciones (Nixon *et al.*, 2003).

La elaboración de catálogos y monografías fueron el elemento principal en la sistemática de los 1700 y 1800. Muchas de esas obras contienen descripciones y dibujos que siguen siendo la fuente principal o única del conocimiento taxonómico para varios grupos. Por esta razón, se han canalizado esfuerzos para la impre-

sión moderna de facsímiles y varias de esas obras clásicas ahora están disponibles nuevamente en formato digital (BHL, 2022).

Después de 300 años, la difusión del conocimiento taxonómico de las exploraciones y de las clasificaciones se sigue canalizando en los medios convencionales como monografías, floras y artículos científicos con descripciones detalladas de los organismos, mapas de su localización, ilustraciones y fotografías. A pesar de la urgencia, el trabajo monográfico ya no es el elemento más dinámico entre los taxónomos actuales, en parte debido a que los sistemas de evaluación científica no han calificado apropiadamente las publicaciones de este tipo de trabajo taxonómico (Krell, 2002; Wägele *et al.*, 2011; Steiner *et al.*, 2015). El papel de la reconstrucción filogenética resulta muy relevante en vista de la relación conceptual entre la filogenia como método para formar grupos y las clasificaciones necesarias para elaborar las monografías de esos grupos. El reto es estimular y capacitar la investigación monográfica ligada metodológicamente a la investigación filogenética, integrando también los medios digitales (Gostel *et al.*, 2013) para la mayor difusión y uso del conocimiento taxonómico.

La estatura científica de la sistemática de nuestro tiempo

Hemos argumentado que las tareas de investigación en la biología sistemática incluyen tres objetivos científicos complementarios: descubrir la biodiversidad, entender su historia y difundir y usar ese conocimiento. En las décadas recientes, estas tres áreas se han beneficiado de la disponibilidad de tecnología (microscopios, secuenciadores, computadoras, programas, etc.) para obtener caracteres morfológicos y secuencias del ADN, genomas completos, transcriptomas, así como de infraestructura digital para el manejo de información florística y taxonómica. Además, varios métodos robustos para análisis de patrones de similitud y reconstrucción filogenética, han revitalizado la investigación sobre la clasificación de la biodiversidad. Pero también esta dinámica ha catalizado las controversias y ha polarizado las actitudes dentro de la comunidad de los taxónomos segregados en cada una de las tres áreas. Tal división puede constituirse en la mayor amenaza a la sobrevivencia de la

sistemática como ciencia integradora y multidisciplinaria. Un reto importante para todos los taxónomos es cambiar nuestra percepción y visualizar que cada una de las tres áreas de la sistemática tiene su importancia, sus requerimientos educativos y metodológicos especiales y sus propias dificultades teóricas y prácticas. Como ejemplos de la necesidad de este cambio de percepción, se señalan al menos tres mitos que han dividido a los taxónomos: i) la visión de la taxonomía como un arte, ii) la idea de progresión a partir de una taxonomía alfa, y iii) la calificación de “tradicional” a ciertos estilos de hacer taxonomía. Precisamente, el entendimiento pluralista de la sistemática permite analizar, corregir, abandonar o reubicar en su debido contexto las controversias filosóficas, metodológicas, los desarrollos empíricos, los retos y avances.

Ciencia vs arte. Un primer tópico de controversia mal ubicado ha sido el supuesto debate sobre si la sistemática califica como ciencia o si es un arte. En términos generales, el arte se ha considerado una actividad intuitiva, subjetiva y sin restricciones por reglas o principios (Cusmariu, 2016). En el contexto de la sistemática evolutiva (*sensu* Simpson, 1961; Mayr, 1963), la dicotomía inicialmente fue usada para resaltar la objetividad de los nuevos métodos numéricos en la sistemática progresando hacia una ciencia. Por ejemplo, Sokal y Sneath (1963) argumentaron que “the practice of taxonomy has remained intuitive and commonly inarticulate, an art rather than a science”. También Hennig (1966) resaltó que “systematics is science and not art” para justificar epistemológicamente los métodos filogenéticos en la formación de grupos taxonómicos. En el contexto actual, esta dicotomía se ha trasladado al contraste entre las actividades de exploración e identificación, y a las de la clasificación filogenética. Cuando la sistemática se visualiza parcialmente como una actividad proveedora de servicios de identificación y curación de especímenes, no es difícil entender por qué algunos taxónomos y no taxónomos todavía describen la sistemática como un arte. Ciertamente las habilidades de identificación requieren entrenamiento bajo la tutela de un especialista y esa experiencia taxonómica se adquiere con años de práctica; sin embargo, eso tampoco significa que el área exploratoria de la sistemática no sea científica y que solo la filogenética sí lo sea. Las tres áreas de la sistemática funcionan como un todo, aunque en la práctica muchos taxónomos nos especializamos en una o dos

de las áreas. La ubicación adecuada de esta controversia evita la posición antagonista que ha dividido la educación y la investigación de los taxónomos especializados en la reconstrucción filogenética, con los especializados en la exploración por grupos taxonómicos y por regiones geográficas o en la difusión del conocimiento taxonómico.

Taxonomía alfa vs omega. Un segundo escollo que la visión de una estructura pluralista permite eliminar, es la visión filosófica positivista de la sistemática como una serie de etapas sucesivas iniciando con la “taxonomía alfa”, luego la “beta”, llegando a otra fase comúnmente llamada “biosistemática” y avanzando progresivamente hacia la “omega” (Valentine y Löve, 1958; Davis y Heywood, 1963; Stace, 1989). Tal posición epistemológica prescribe que la investigación taxonómica en una fase depende o se justifica solo en virtud del suficiente avance de la fase anterior. Algunos taxónomos lógicamente han razonado que por esto deberían hacerse primero los trabajos de exploración e inventarios y solo después se justificarían o podrían realizar los trabajos de filogenias. Bajo esta perspectiva positivista, los taxónomos estaríamos obligados a solo ejecutar investigaciones de inventarios (Forero, 1994). A juzgar por la tendencia reciente, esta línea de argumentación no ha detenido la elaboración de trabajos taxonómicos basados en filogenias. Evidentemente la comunidad taxonómica, ha percibido que la relación entre las tres áreas no es una secuencia operativa hacia un objetivo distante, sino de iteración complementaria y simultánea.

Taxonomía tradicional vs moderna. Un tercer aspecto que el contexto de la sistemática pluralista permite eliminar, es la pretendida calificación de cierto trabajo taxonómico como “tradicional” y otro como “moderno”. Estos términos todavía se usan en tres contextos equivocadamente. Para algunos taxónomos, lo “tradicional” designa el trabajo de exploración y de inventarios, mientras que lo “moderno” alude al de filogenia y clasificación. Este primer uso implica un contraste entre áreas y niveles de investigación no equivalentes. Dentro de cada área de la sistemática es posible detectar procesos diferentes de trabajo para la exploración, la filogenia y el manejo de información. Por ejemplo, la investigación en el área de inventarios puede ser “tradicional” o “moderna” dependiendo de los diferentes métodos y tecnologías de exploración para producir un inventario.

Un segundo contraste inapropiado hace referencia a la naturaleza de los “datos” taxonómicos. En este contexto empírico, lo “tradicional” consiste en observar datos morfológicos y lo “moderno” es coleccionar datos moleculares (Hillis, 1987; Maddison, 1996). Este segundo uso desinformado deriva de la idea de que la taxonomía basada en morfología ya ha sido superada en favor de los estudios con datos moleculares (Scotland *et al.*, 2003). El argumento de una supuesta diferencia en la calidad informativa de los datos, un carácter a la vez, en la reconstrucción filogenética, ya se ha superado con base en comparaciones del contenido de homoplasia tanto en los datos moleculares, como en los datos morfológicos, tasas de cambio heterogéneas, niveles de soporte, complementariedad, etc. (Wiens, 2004; Giribet, 2015). Una ventaja innegable de los datos moleculares es que son muchos más que los que se pueden extraer de la morfología, pero en la comparación uno a uno, los caracteres morfológicos y moleculares contienen niveles equivalentes de información filogenética (homología) y también de homoplasia, aunque a distintos niveles jerárquicos de agrupación (Sanderson y Donoghue, 1989; Radcliff *et al.*, 2013; Speed y Arbuckle, 2017; Crispell *et al.*, 2019).

Tanto conceptualmente como empíricamente, es ventajoso siempre combinar los tipos de datos disponibles y lógicamente el soporte de las hipótesis filogenéticas aumenta entre más caracteres se usan (Nixon y Carpenter, 1996; Sereno, 2007; Assis, 2009; Laing *et al.*, 2017). En la relación epistemológica confirmatoria, las filogenias derivadas de datos morfológicos pueden robustecerse al complementarlas con la filogenia derivada del análisis de muchos más datos moleculares (Fernández *et al.*, 2018). En la relación epistemológica iterativa (Yeates *et al.*, 2011), las filogenias moleculares han permitido reanalizar la variación morfológica para mejorar la taxonomía de los grupos. También existen muchos ejemplos de análisis combinados que ilustran la complementariedad de las tasas de cambio de los datos morfológicos y moleculares en la resolución de filogenias a varios niveles taxonómicos (Larson, 1998; Hernández-Lara *et al.*, 2018; Solis-Zurita *et al.*, 2019). Indudablemente, el tipo de datos no son un índice de la calidad de un trabajo taxonómico, sino los métodos de análisis numéricos de las similitudes (sean morfológicas o moleculares) para las

decisiones de agrupación (parsimonia, verosimilitudes, probabilidades posteriores).

La tercera área donde se ha promovido acreditar lo “moderno” para descalificar lo “tradicional”, es respecto a la utilidad de los métodos hipotético-deductivos (parsimonia) y los probabilísticos (verosimilitudes y probabilidades posteriores) para la inferencia de las filogenias (De Luna *et al.*, 2005). Para muchos, el uso de caracteres morfológicos evoca de manera inmediata a la inferencia por los métodos “tradicionales” con parsimonia, mientras que lo “moderno” consiste en el uso de marcadores moleculares para la inferencia de filogenias con métodos de máxima verosimilitud o probabilidades posteriores (Holder y Lewis, 2003). Esta es una disyuntiva sociológica, pues los tipos de datos no prescriben los tipos de análisis (Sidall y Kluge, 1997; Sober, 2004). En tal desacreditación se enfatizan las versiones de los métodos probabilísticos más recientes con las versiones más ancestrales de los métodos de parsimonia. Tal contraste temporal es absurdo, especialmente considerando que como científicos deberíamos discernir la diferencia relevante, no en los métodos, sino en el campo epistemológico (de Queiroz y Poe, 2001; Goloboff, 2003; De Luna *et al.*, 2005; Assis, 2015, 2017). Evidentemente en el desarrollo futuro de ambas epistemologías, siempre habrá alguna funcionalidad metodológica más reciente o eficiente. En estos tres contextos, los tipos de actividades, los tipos de datos y los tipos de análisis, se pretenden acreditar los méritos simplemente por ser lo moderno. Obviamente, el desafío es de naturaleza educativa. La educación del taxónomo debe incluir una visión pluralista de los métodos de exploración de la biodiversidad, de los métodos filogenéticos en la sistemática moderna y del uso de la infraestructura digital para comunicar el conocimiento taxonómico.

Conclusiones

La investigación científica en la biología sistemática involucra tanto la perspectiva histórica como la exploración de la diversidad biológica y el manejo de la información sobre las especies del planeta. ¿Qué ventajas tiene esta visión pluralista? Primero, permite argumentar que cada una de las tres áreas tiene la misma importancia. Esto a su vez, permite ubicar y valorar los avances y retos de cada área. Por ejemplo, la urgencia de las exploraciones e inventarios no necesariamente

nos limita a este tipo de trabajo, ni es razón para postergar los estudios en el área de reconstrucción filogenética. Del mismo modo, el formalismo de las filogenias y lo exuberante de los datos moleculares, no necesariamente debe continuar drenando los recursos económicos ni diluyendo el esfuerzo educativo para la exploración y la comunicación. Cada área de la sistemática tiene sus prioridades y aspectos de investigación relevantes. Hemos argumentado en esta revisión que la sistemática es una disciplina científica madura entre el resto de la biología y se caracteriza por el dinamismo teórico, metodológico y empírico en al menos esas tres áreas. El entendimiento de la estructura pluralista de la sistemática es importante para valorar apropiadamente los debates teóricos, los avances metodológicos y los problemas persistentes desplegados en la literatura de los últimos años.

La percepción adecuada de las características de cada área de la sistemática, también permite ubicar y conciliar actividades aparentemente en competencia. Los antagonismos inapropiados entre “inventarios o filogenias”, “filogenias o taxonomía alfa” o entre sistemática “morfológica” y “molecular”, sobreviven en parte debido a una visión parcial de la sistemática. La sistemática es una ciencia donde la diversidad de objetivos y tareas justifica el pluralismo de métodos científicos para realizarlas, si consideramos la combinación de metodologías disponibles para la exploración e inventarios, la clasificación y la difusión del conocimiento taxonómico.

Esta visión pluralista es particularmente necesaria en vista de la imagen pobre auto impuesta por un sector de la comunidad de taxónomos y la percepción por parte de la comunidad científica en general, cuando peligrosamente se enfatiza o visualiza solo la actividad exploratoria y de inventarios. La pluralidad epistemológica lleva a integración, no al aislamiento, ni antagonismos, ni competencia interna. Hasta que los taxónomos valoremos la relevancia y la estatura de nuestra propia disciplina, no podremos cambiar la percepción que la comunidad científica en general tiene de la sistemática. Esta percepción es importante en la competencia por fondos y por los espacios de publicación. Un reto es balancear el pragmatismo y la urgencia de inventariar la biodiversidad con el entrenamiento teórico y metodológico para la investigación filogenética. La visión pluralista de la sistemática permite ubicar las necesidades educativas básicas de los taxónomos en



las tareas de exploración, reconstrucción filogenética y comunicación del conocimiento. Evidentemente, el desarrollo futuro de la educación e investigación sistemática debe continuar promoviendo tanto la investigación exploratoria, como la filogenética y la de difusión.

Agradecimientos

Apreciamos mucho las reacciones, correcciones y sugerencias a una versión ancestral a este texto de (alfabéticamente por apellidos): Dra. Itzi Fragoso Martínez (INECOL), Dr. Ricardo García Sandoval (UNAM), Dr. Rodolfo Novelo Gutiérrez (INECOL), Dr. Andrés Ramírez Ponce (INECOL) y Biól. Nut Suárez Pérez (Posgrado, INECOL). Igualmente damos las gracias por las sugerencias y correcciones al texto en las revisiones de la Dra. Sabina Lara Cabrera y el Dr. Omar Chassin Noria. Finalmente, apreciamos la ayuda del equipo de "Ciencia Nicolaita" por la revisión editorial.

Referencias

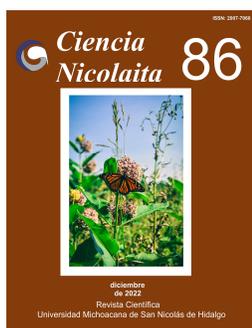
- Agnarsson, I., and Matjaž, K., 2007, Taxonomy in a Changing World: Seeking Solutions for a Science in Crisis: *Systematic Biology*, 56, 3, 531-539.
- Assis, L.C., 2015, Homology assessment in parsimony and model-based analyses: two sides of the same coin: *Cladistics*, 31, 3, 315-320.
- Assis, L.C., 2009, Coherence, correspondence, and the renaissance of morphology in phylogenetic systematics: *Cladistics*, 25, 5, 528-544.
- Assis, L.C., 2017, The jazz of cladistics: *Systematics and Biodiversity*, 15, 5, 1-6.
- BHL, "About the Biodiversity Heritage Library", <https://about.biodiversitylibrary.org>
- Bowman, J.L. et al. [110 autores], 2017, Insights into land plant evolution garnered from the *Marchantia polymorpha* genome: *Cell*, 171, 2, 287-304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.09.030>
- Brooks, D.R., and McLennan, D., 1991, Phylogeny, ecology, and behavior: *Chicago, University of Chicago Press*, p. 434.
- CBD, "Introduction", Convention on Biological Diversity, <https://www.cbd.int/intro/>
- Chernoff, B., Duncan, T., Elias, T., Mishler, B., Novacek, E., Theriot, E., Wheeler, Q.D., and Wood, D.S., 1989, Commentary on the place of systematics: *ASC Newsletter*, 17, 1, 1-2.
- Cracraft, J., 2002, The seven great questions of systematic biology: An essential foundation for conservation and the sustainable use of diversity: *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 89, 127-144.
- Crispell, J., Balaz, D., and Gordon, S.V., 2019, HomoplasyFinder: a simple tool to identify homoplasies on a phylogeny: *Microbial Genomics*, 5, 1, e000245. DOI: <https://doi.org/10.1099/mgen.0.000245>
- Cusumariu, A., 2016, Toward an Epistemology of Art: *Symposium*, 3, 1, 37-64.
- Daly, M., Herendeen, P.S., Guralnick, R.P., Westneat, M.W., and McDade, L., 2012, Systematics Agenda 2020: the mission evolves: *Systematic Biology*, 61, 4, 549-552.
- Davis, P.H., and Heywood, V.H., 1965, Principles of angiosperm taxonomy: *Princeton, P. Van Nostrand Co. Inc.*, p. 556.
- Dayrat, B., 2005, Towards integrative taxonomy: *Biological Journal of the Linnean Society*, 85, 3, 407-417.
- De Luna, E., 1995, Bases filosóficas de los análisis cladísticos para la investigación taxonómica: *Acta Botánica Mexicana*, 33, 63-79.
- De Luna, E., 1996, Epistemología de la investigación taxonómica: Inferencias filogenéticas y su evaluación: *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 58, 43-53.
- De Luna, E., and Mishler, B., 1996, El concepto de homología filogenética y la selección de caracteres taxonómicos: *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 59, 1-16.
- De Luna, E., Guerrero, J.A., and Chew-Taracena, T., 2005, Sistemática Biológica: avances y direcciones en la teoría y los métodos de la reconstrucción filogenética: *Hidrobiológica*, 15, 3, 351-370.
- Felsenstein, J., 2001, The troubled growth of statistical phylogenetics: *Systematic Biology*, 50, 465-467.
- Felsenstein, J., 2004, "A digression on history and philosophy", in J. Felsenstein, ed., *Inferring Phylogenies*, Sunderland, Sinauer Associates, pp. 123-146.
- Fernández, R., Edgecombe, G.D., and Giribet, G., 2018, Phylogenomics illuminates the backbone of the Myriapoda Tree of Life and reconciles morphological and molecular phylogenies: *Scientific Reports*, 8, 1-7.
- Forero, E., 1994, El futuro de la botánica en América Latina. Acuerdos y realidades: *Ciencias*, 34, 35-41.
- Franz, N.M., 2005, On the lack of good scientific reasons for the growing phylogeny/classification gap.: *Cladistics*, 21, 5, 495-500.

- Giribet, G., 2015, Morphology should not be forgotten in the era of genomics—a phylogenetic perspective: *Zoologischer Anzeiger - A Journal of Comparative Zoology*, 256: 96-103.
- Giribet, G., Hormiga, G., and Edgecombe, G.D., 2016, The meaning of categorical ranks in evolutionary biology: *Organisms, Diversity and Evolution*, 16, 427-430. <https://doi.org/10.1007/s13127-016-0263-9>
- Goloboff, P.A., 2003, Parsimony, likelihood, and simplicity: *Cladistics*, 19, 91-103.
- González, D., 1998, Marcadores moleculares para los estudios comparativos de la variación en ecología y sistemática: *Revista Mexicana de Micología*, 14, 1-21.
- Gostel, M.R., Dal Forno, M., and Weeks, A., 2013, A navigation guide to cyberinfrastructure tools for botanical and lichenological systematics research: *Plant Science Bulletin*, 59, 3, 111-130.
- Harvey, P.H., and Pagel, M.D., 1991, The comparative method in evolutionary biology: *London, Oxford University Press*, p. 239.
- Heather, J.M., and Chain, B., 2016, The sequence of sequencers: The history of sequencing DNA: *Genomics*, 107: 1-8.
- Hennig, W., 1966, Phylogenetic systematics: *University of Illinois Press*, p. 261.
- Hennig, W., 1975, "Cladistic Analysis or Cladistic Classification?": A Reply to Ernst Mayr: *Systematic Zoology*, 24, 2, 244-256.
- Hernández-Lara C., Espinosa de Los Monteros, A., Ibarra-Cerdeña, C.N., García-Feria, L., and Santiago-Alarcón, D., 2018, Combining morphological and molecular data to reconstruct the phylogeny of avian Haemosporida: *International Journal of Parasitology*, 48, 14, 1137-1148.
- Hillis, D.M., 1987, Molecular versus morphological approaches to systematics: *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18, 23-42.
- Hinchliff, C.E., Smith, S.A., Allman, J.F., Burleigh, J.G., Chaudhary, R., Coghill, L.M., Crandall, K.A., Deng, J., Drew, B.T., Gazis, R., Gude, K., Hibbett, D.S., Katz, L.A., Laughinghouse IV, H.D., McTavish, E.J., Midford, P.E., Owen, C.L., Ree, R.H., Rees, J.A., Soltis, D.E., Williams, T., and Cranston, K.A., 2014, Synthesis of phylogeny and taxonomy into a comprehensive tree of life: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112, 41, 12764-12769.
- Holder, M., and Lewis, P.O., 2003, Phylogeny estimation: traditional and Bayesian approaches: *Nature Reviews, Genetics*, 4, 275-284.
- Hull, D.L., 1966, Phylogenetic nomenclature: *Systematic Zoology*, 15, 14-17.
- Kapli, P., Yang, Z., and Telford, M.J., 2020, Phylogenetic tree building in the genomic age: *Nature Review, Genetics*, 21, 428-444. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41576-020-0233-0>
- Krell, F.T., 2002, Why impact factors don't work for taxonomy: *Nature*, 415, 957. <https://doi.org/10.1038/415957a>
- Laing, A.M., Doyle, S., Gold, M.E.L., Nesbitt, S.J., O'Leary, M.A., Turner, A.H., Wilberg, E.W., and Poole, K.E., 2017, Giant taxon-character matrices: the future of morphological systematics: *Cladistics*, 34, 3, 333-335.
- Larson, A., 1998, "The comparison of morphological and molecular data in phylogenetic systematics", in R. DeSalle, and B. Schierwater, eds., *Molecular Approaches to Ecology and Evolution*, Basel, Birkhäuser, pp. 275-298.
- Llorente-Bousquets, J., Michán, L., González, J., and Sosa, V., 2008, "Desarrollo y situación del conocimiento de las especies", in *Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad*, México, CONABIO. pp. 193-214.
- Maddison, W.P., 1996, "Molecular approaches and the growth of phylogenetic biology", in D. Ferraris, and S.R. Palumbi, eds., *Molecular zoology: Advances, strategies, and protocols*, New York, Wiley Liss Inc., pp. 47-63.
- Mayr, E., 1963, Animal species and evolution: *Cambridge, Harvard University Press*, p. 783.
- McNeill, J., Barrie, F.R., Buck, W.R., Demoulin, V., Greuter, W., Hawksworth, D.L., Herendeen, P.S., Knapp, S., Marchal, K., Prado, J., Prud'homme Van Reine, W.F., Smith, G.F., Wiersema, J.H., and Turland, N.J., eds., 2012, International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Melbourne Code) adopted by the Eighteenth International Botanical Congress Melbourne, Australia, July 2011. Regnum Vegetabile 154. Glashütten: Koeltz Scientific Books. <https://www.iapt-taxon.org/melbourne/main.php>
- Meier, R., 2008, "DNA sequences and taxonomy: Opportunities and challenges", in Q.D. Wheeler, ed., *The new taxonomy*, Boca Raton, CRC Press, pp. 95-127.
- Michán, L., and Llorente, J., 2003, La taxonomía en México durante el siglo XX: *Publicaciones Especiales del Museo de Zoología*, 13, 1-250.



- Mishler, B.D., 2009, Three centuries of paradigm changes in biological classification: is the end in sight?: *Taxon*, 58, 61-67.
- Mishler, B.D., and De Luna, E., 1997, Sistemática filogenética y el concepto de Especie: *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 60, 45-57.
- Mora, C., Tittensor, D.P., Adl, S., Simpson, A.G.B., and Worm, B., 2011, How many species are there on earth and in the ocean?: *PLoS Biol*, 9, 8, e1001127.
- Myers A.A., and Giller, P.S., eds., 1988, Analytical Biogeography. An integrated approach to the study of animal and plant distributions: *London, Chapman and Hall*, p. 578.
- Nixon, K., and Carpenter, J.M., 1996, On simultaneous analysis: *Cladistics*, 12, 3, 221-241.
- Nixon, K., Carpenter, J.M., and Stevenson, D.W., 2003, The Phylocode is fatally flawed, and the "Linnaean" system can easily be fixed: *The Botanical Review*, 69, 1, 111-120.
- Nunn, C.L., 2011, The comparative approach in evolutionary anthropology and biology: *Chicago, The University of Chicago Press*, p. 380.
- Platnick, N.I., and Cameron, H.D., 1977, Cladistic Methods in Textual, Linguistic, and Phylogenetic Analysis: *Systematic Biology*, 26, 4, 380-385.
- Prendini, L., 2005, Comments on "identifying spiders through DNA barcodes": *Canadian Journal of Zoology*, 83, 498-504.
- Pyron, R.A., 2015, Post-molecular systematics and the future of phylogenetics: *Trends in Ecology and Evolution*, 30, 384-389.
- Queiroz, K. de, and Gauthier, J., 1990, Phylogeny as a Central Principle in Taxonomy: Phylogenetic Definitions of Taxon Names: *Systematic Zoology*, 39, 4, 307-322.
- Queiroz, K. de, and Gauthier, J., 1992, Phylogenetic Taxonomy: *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23, 449-480.
- Queiroz, K. de, and Poe, S., 2001, Philosophy and phylogenetic inference: a comparison of likelihood and parsimony methods in the context of Karl Popper's writings on corroboration: *Systematic Biology*, 50, 305-321.
- Radel, D., Sand, A., and Steel, M., 2013, Hide and seek: placing and finding an optimal tree for thousands of homoplasy-rich sequences: *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 69, 1186-1189.
- Sanderson, M.J., and Donoghue, M.J., 1989, Patterns of variation in levels of homoplasy: *Evolution*, 43, 8, 1781-1795.
- Schuh, R.T., 2000, Biological Systematics: Principles and Applications (Comstock Books): *Cornell, Cornell University Press*, p. 236.
- Scotland, R.W., Olmstead, R.G., and Bennett, J.R., 2003, Phylogeny reconstruction: the role of morphology: *Systematic Biology*, 52, 539-548.
- Sereno, P.C., 2005, The Logical Basis of Phylogenetic Taxonomy: *Systematic Biology*, 54, 4, 595-619.
- Sereno, P.C., 2007, Logical basis for morphological characters in phylogenetics: *Cladistics*, 23, 565-587.
- Siddall, M., and Kluge, A., 1997, Probabilism and phylogenetic inference. *Cladistics*, 13, 313-336.
- Simpson, G.G., 1961, Principles of animal taxonomy: *New York, Columbia University Press*, p. 247.
- Smith, S.A., and Donoghue, M.J., 2010, Combining historical biogeography with niche modeling in the Caprifoliium clade of Lonicera (Caprifoliaceae, Dipsacales): *Systematic Biology*, 59, 322-341.
- Sober, E., 2004, The contest between Parsimony and Likelihood: *Systematic Biology*, 53, 4, 644-653.
- Sokal, R.R., and Sneath, P.H.A., 1963, Principles of numerical taxonomy: *San Francisco, W. H. Freeman and Co.*, p. 359.
- Solis-Zurita C., De Luna, E., and González, D., 2019, Phylogenetic relationships in the *Sceloporus variabilis* (Squamata: Phrynosomatidae) complex based on three molecular markers, continuous characters, and geometric morphometric data: *Zoologica Scripta*, 48, 419-439.
- Speed, M.P., and Arbuckle, K., 2017, Quantification provides a conceptual basis for convergent evolution: *Biological Review*, 92, 815-829.
- Stace, C.A., 1989, Plant taxonomy and Biosystematics: *London, Edward Arnold*, p. 264.
- Steiner, F.M., Pautasso, M., Zettel, H., Moder, K., Arthofer, W., and Schlick-Steiner, B.C., 2015, A Falsification of the citation impediment in the taxonomic literature: *Systematic Biology*, 64, 5, 860-868.
- Systematics Agenda 2000, 1991, Integrating biological diversity and societal needs: *Systematic Biology*, 40, 4, 520-523.
- Tautz, D., Arctander, P., Minelli, A., Thomas, R.H., and Vogler, A.P., 2003, A plea for DNA taxonomy: *Trends in Ecology and Evolution*, 18, 2, 70-74.
- Taylor, H.R., and Harris, W.E., 2012, An emergent science on the brink of irrelevance: a review of the past 8 years of DNA barcoding: *Molecular Ecology, Resources*, 12, 3, 377-388.

- Valentine, D.H., and Löve, A., 1958, Taxonomic and biosystematics categories: *Brittonia*, 10, 153-166.
- Villaseñor, J.L., 2015, ¿La crisis de la biodiversidad es la crisis de la taxonomía?: *Botanical Sciences*, 93, 1, 03-14.
- Wägele, H., Klussmann-Kolb, A., Kuhlmann, M., Haszprunar, G., Lindberg, D., Koch, A., and Wägele, J.W., 2011, The taxonomist - an endangered race. A practical proposal for its survival: *Frontiers in Zoology*, 8, 25. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-8-25>
- Weber, M.G., and Agrawal, A.A., 2012, Phylogeny, ecology, and the coupling of comparative and experimental approaches: *Trends in Ecology and Evolution*, 27, 7, 394-403.
- Wheeler, Q.D., 2004, Taxonomic triage and the poverty of phylogeny: *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B. 359, 571-583.
- Wheeler, Q.D., 2005, Losing the plot: DNA barcodes and taxonomy: *Cladistics*, 21, 405-407.
- Wheeler, Q.D., 2008, Undisciplined thinking: morphology and Hennig's unfinished revolution: *Systematic Entomology*, 33, 1, 2-7.
- Wheeler, Q.D., 2013, Are reports of the death of taxonomy an exaggeration? Commentary: *New Phytologist*, 201, 370-371.
- Wheeler, Q.D., 2016, "This struggle for survival: Systematic biology and institutional leadership", in D. Williams, M. Schmitt, and Q. Wheeler, eds., *The Future of Phylogenetic Systematics: The Legacy of Willi Hennig (Systematics Association Special Volume Series*, Cambridge, Cambridge University Press, pp. 469-478.
- Wheeler, W.C., 2012, Systematics: a course of lectures: *London, Wiley-Blackwell Publishing Ltd.*, p. 448.
- Wheeler, W.C., and Whiteley, P.M., 2015, Historical Linguistics as a Sequence Optimization Problem: Uto-Aztecan Language Evolution and Biogeography: *Cladistics*, 31, 113-125.
- Wiens, J.J., 2004, The role of morphological data in phylogeny reconstruction: *Systematic Biology*, 53, 4, 653-661.
- Wiley, E.O., 1979, An annotated Linnaean hierarchy, with comments on natural taxa and competing systems: *Systematic Biology*, 28, 3, 308-337.
- Wiley, E.O., 1981, Phylogenetics. The theory and practice of phylogenetic systematics: *New York, John Wiley and Sons*, p. 439.
- Will, K.W., Mishler, B., and Wheeler, Q.D., 2005, The perils of DNA barcoding and the need for integrative taxonomy: *Systematic Biology*, 54, 5, 844-851.
- Wilson, E.O., ed., 1992, The Diversity of Life: *Cambridge, Belknap Press*. p. 464.
- Wilson, R.A., 1999, Species. New interdisciplinary essays: *Cambridge, The MIT Press*, p. 235.
- Yeates, D.K., Seago, A., Nelson, L., Cameron, S.L., Joseph, L., and Trueman, J.W.H., 2011, Integrative taxonomy, or iterative taxonomy?: *Systematic Entomology*, 36, 209-217.
- Zhao, Y.J., Liu, X.Y., Guo, R., Hu, K.R., Cao, Y., and Dai, F., 2019, Comparative genomics and transcriptomics analysis reveals evolution patterns of selection in the *Salix* phylogeny: *BMC Genomics*, 20, 253. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-019-5627-z>



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Evaluación bioinformática de datos Hyb-Seq para tres especies de *Salvia* subgénero *Calosphace* (Lamiaceae)

Bioinformatic evaluation of Hyb-Seq data for three species of *Salvia* subgenus *Calosphace* (Lamiaceae)

Daniel Simbrón Romero, Carlos Alonso Maya Lastra y Sabina I. Lara Cabrera.*

Para citar este artículo: Daniel Simbrón Romero, Carlos Alonso Maya Lastra y Sabina I. Lara Cabrera*, 2022. Evaluación bioinformática de datos Hyb-Seq para tres especies de *Salvia* subgénero *Calosphace* (Lamiaceae). Ciencia Nicolaita no. 86, 69-83. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.689>



Historial del artículo:

Recibido: 30 de agosto de 2022

Aceptado: 5 de noviembre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: sabina.lara@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Evaluación bioinformática de datos Hyb-Seq para tres especies de *Salvia* subgénero *Calosphace* (Lamiaceae)

Bioinformatic evaluation of Hyb-Seq data for three species of *Salvia* subgenus *Calosphace* (Lamiaceae)

Daniel Simbrón Romero,¹ Carlos Alonso Maya Lastra² y Sabina I. Lara Cabrera.^{1*}

¹Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.

²Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology, Columbia University, 1200 Amsterdam Ave., New York, USA.

Resumen

El subgénero *Calosphace* es el más diverso del género *Salvia*; su distribución abarca el continente americano, siendo México y Centroamérica las regiones de mayor diversidad. Estudios filogenéticos del grupo con secuenciación Sanger para marcadores de núcleo y cloroplasto, han resuelto las relaciones profundas para *Salvia*; sin embargo, en las relaciones superficiales, frecuentemente se observan politomías. Con los avances tecnológicos e informáticos, se han desarrollado técnicas de secuenciación masiva (NGS del inglés Next Generation Sequencing) que, al aplicarlas para inferencias filogenéticas, han resultado en filogenias más robustas a niveles superficiales. En este estudio se analizaron 30 especies del subgénero *Calosphace* con el protocolo NGS Hyb-Seq para poner a prueba la monofilia de tres especies representadas por dos muestras cada una de distinta procedencia y determinar su posición filogenética. Se amplificaron 98 genes nucleares y con el pipeline HybPhylo-Maker se generó el mapeo, alineamiento y filtrado de los genes amplificados. Finalmente, se construyeron árboles de genes y árboles de especies con FastTree y ASTRAL, respectivamente. La inferencia filogenética resuelve cinco clados principales, dos de los cuales son coincidentes a secciones *sensu* Epling. De las tres especies en las que se evalúa su monofilia, *S. hispanica* y *S. purpurea* se recuperan como monofiléticas, con altos valores de probabilidad posterior local; sin embargo, *S. polystachia* muestra no ser monofilética. Adicionalmente, se muestran dos alineamientos MAUVE con pocos reordenamientos en los pares de muestras de *S. hispanica* y *S. purpurea* y reacomodos importantes para el par de *S. polystachia*. Datos obtenidos con Hyb-seq, pueden ayudar a resolver relaciones filogenéticas en niveles superficiales de la filogenia de *Salvia* y, a su vez, nos permite identificar qué especies requieren de otros estudios complementarios para esclarecer sus relaciones evolutivas.

Palabras clave: filogenia, secuenciación masiva, ASTRAL, *Calosphace*



Abstract

Salvia subgenus *Calosphace* is the most diverse of the five subgenera. Of wide distribution in America, being Mexico and Central America the most diverse areas. Phylogenetic studies utilizing Sanger sequencing for both nuclear and chloroplast markers, have solved the deep relationships but shallow relationships generally remain unsolved with polytomies. Recent technological and bioinformatic advances resulted in Next Generation Sequencing (NGS) which when applied to phylogenetic inferences result in robust hypotheses at shallow levels. Here we evaluate 30 species in *Calosphace* through next gen Hyb-Seq to assess monophyly of three species' with two samples each from distinct provenances and define their phylogenetic position. 98 nuclear genes were amplified, mapping, alignment and gene filtering were performed in HybPhyloMaker pipeline. Gene trees and species trees were built in FastTree y ASTRAL respectively. Five main clades are resolved, two of which agree to sections *sensu* Epling. *Salvia hispanica* y *S. purpurea* are both monophyletic species with high local posterior probability, however *S. polystachia* is not. Additionally, two MAUVE analyses were performed, few rearrangements are shown between *S. hispanica* and *S. purpurea* paired samples, non the less important rearrangements are shown for *S. polystachia*. Hyb-seq data aid in solving phylogenetic relationships at shallow level in *Salvia* phylogeny, and allows us to identify species which need to be subjected to additional and more thorough analyses to better clarify species relationships.

Key words: Phylogeny, High throughput sequencing, ASTRAL, *Calosphace*

Introducción

El género *Salvia* L. es uno de los más diversos en el mundo (Mabberly, 1997), contando con cerca de 1,000 especies y una distribución casi global (Drew *et al.*, 2017). *Salvia* pertenece a la familia Lamiaceae y se clasifica en cinco subgéneros: *Audibertia* (Benth.) Epling ex. Walker, *Calosphace* (Benth.) Epling, *Leonia* Benth, *Salvia* y *Sclarea* Benth. (Will y Classen-Bockhoff, 2017). *Calosphace* es el subgénero más diverso de *Salvia* (Epling, 1939) con aproximadamente 600 especies distribuidas en América, siendo México la zona de mayor diversidad con 295 especies (González-Gallegos *et al.*, 2020).

La sistemática y clasificación de los seres vivos, ha ido cambiando a lo largo del tiempo, habiendo dominado por muchas décadas el estudio de la morfología, anatomía, química y distribución (Montero-Castro *et al.*, 2016). Para *Calosphace*, la revisión taxonómica más completa es la de Epling (1939) y subsecuentes contribuciones (Epling 1939, 1940, 1941, 1944, 1947, 1951; Epling y Mathias 1957; Epling y Játiva 1963, 1966), resultando en 102 secciones, clasificadas con base en caracteres morfológicos del cuerpo vegetativo, reproductivo y la distribución geográfica.

Las últimas cuatro décadas han visto un cambio significativo en cómo se hace sistemática y qué fuentes de evidencia se emplean para proponer relaciones filogenéticas. La secuenciación Sanger (Sanger *et al.*,

1977) fue el método predominante hasta mediados de los años 2000 (Barrett *et al.*, 2016), con este método se obtienen secuencias de 500 a 3 000 pares de bases (pb) y han permitido resolver relaciones filogenéticas profundas, principalmente en niveles superiores en la jerarquía clasificatoria, como orden, familia, géneros, e incluso a nivel de especies; sin embargo, en muchos casos, no resuelve y provee baja resolución para niveles superficiales, particularmente en grupos de radiación evolutiva reciente (Saarela *et al.*, 2015).

Este ha sido el caso del subgénero *Calosphace*, donde se resolvieron muchas relaciones filogenéticas profundas; sin embargo, las relaciones superficiales no fueron totalmente resueltas (Fragoso-Martínez *et al.*, 2018; Jenks *et al.*, 2013; Walker, 2006), particularmente en el llamado "núcleo *Calosphace*" (Walker, 2006) donde se encuentra la mayoría de las especies del subgénero y las de mayor plasticidad fenotípica.

El avance tecnológico y bioinformático ha permitido el desarrollo de nuevos métodos y protocolos que revolucionan las ciencias biológicas (Barrett *et al.*, 2016) mediante una serie de técnicas de secuenciación de nueva generación, permitiendo obtener lecturas de secuencias, abarcando gran parte de genomas, e incluso genomas completos (Barrett *et al.*, 2016). Conforme se van optimizando los protocolos en grupos modelo como *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh, se

empiezan a emplear en organismos no-modelo, permitiendo abordar preguntas evolutivas complejas como eventos de poliploidía, hibridación, introgresión y coalescencia estocástica (Brassac y Blattner, 2015; Eriksson *et al.*, 2018; Uribe-Convers *et al.*, 2016).

A la fecha, se han reportado cinco estudios de NGS en *Calosphace*, dos con el protocolo de Enriquecimiento Híbrido Anclado o AHE, por sus siglas en inglés (Lemmon *et al.*, 2012), donde obtuvieron propuestas filogenéticas robustas con altos valores de soporte (Fragoso-Martínez *et al.*, 2017; Kriebel *et al.*, 2019). También se reporta el protocolo Hyb-Seq (Weitemier *et al.*, 2014), con muestreo del genoma de cloroplasto y cistrones ribosomales para tres secciones *sensu* Epling cercanas filogenéticamente (Olvera-Mendoza *et al.*, 2020) y para 98 genes nucleares en 75 especies (Lara-Cabrera *et al.*, 2021; Pérez-García, 2019).

Hyb-Seq es un protocolo que amplifica selectivamente regiones exónicas con base en el diseño de sondas específicas. En este estudio, se evalúan los productos de Hyb-Seq para 33 muestras de *Calosphace* pertenecientes a un clado monofilético (Lara-Cabrera *et al.*, 2021; Pérez-García, 2019), con el propósito de evaluar la monofilia de tres especies interesantes y útiles.

De las tres especies, la más famosa es *Salvia hispanica* L., la chía que tiene cerca de 5 000 años de haberse domesticado, llegando a tener gran importancia para las culturas precolombinas que la utilizaban como pseudocereal, para extracción de aceite y en herbolaria (Sosa-Baldivia *et al.*, 2018). *Salvia polystachia* Ort. es una especie con extensa distribución en

Mesoamérica y de alta plasticidad fenotípica, lo que ocasionalmente hace difícil su identificación, posee compuestos químicos útiles con potencial médico (Maldonado y Ortega 2000; Calzada *et al.*, 2010), además, en propuestas filogenéticas (Walker, 2006) se ha observado que no es monofilética. Finalmente, *Salvia purpurea* Cav. es una especie muy llamativa que comienza a utilizarse en horticultura que, además, como *S. polystachia*, posee elementos químicos valiosos con potencial médico (Cuevas-Morales *et al.*, 2022; Velazco-Lezama *et al.*, 2021) (Figura 1).

Metodología

Se muestrearon 30 especies de *Salvia* subgénero *Calosphace* en un clado monofilético (Lara-Cabrera *et al.*, 2021; Pérez-García, 2019) con *Salvia leucantha* Cav. como grupo externo con base en ambas filogenias y tres especies representadas por dos muestras provenientes de localidades distintas, *S. hispanica* [85] de Oaxaca (Tenorio, P & Dieringer, D. 10685. México, Oaxaca, Teotitlán de Flores Magón, Cerro Verde, 23 Km al NE de Teotitlán, carr. Teotitlán-Huautla. 12/10/1985) y *S. hispanica* [19] de Guerrero (González, s.n. México. Guerrero. Mpio. Leonardo Bravo. La Laguna, 6 km adelante del poblado. 17°43' 54"N, 99°44'40"W, 1997), *S. polystachia* [163] de Morelos (Lara-Cabrera, S. 163. México. Morelos, 5 km al S de Tetela del Volcán camino a Temoac. 18° 50' 55"N, 98° 44' 16"W, 2030m. 11/15/2009), y *S. polystachia* [065] de Michoacán (Bedolla-García, B. 65. México. Michoa-



Figura 1. De izquierda a derecha. *Salvia hispanica* (Foto: Yocupitzia Ramírez), *Salvia polystachia* (Foto: S.I. Lara-Cabrera) y *Salvia purpurea* (Foto: S.I. Lara-Cabrera).

cán. En los alrededores de Tlalpujahua. Mpio. Tlalpujahua. 19° 48' 05" N 100° 11' 40" W, 2633m. 11/14/2009) y *S. purpurea* [103] de Chiapas (*Bedolla-García, B. 103*. México. Chiapas. A las afueras de Siltepec. Mpio. Siltepec. 15° 26' 57"N, 92° 15' 58"W. 2874m. 12/28/2009) y *S. purpurea* [156] de Morelos (*Lara-Cabrera, S. 156*. México. Morelos. Carretera Tepoztlán San Juan Tlacotenco, 19°.00.08N; 99°.06.99W. 10/31/2009). Las condiciones de extracción, diseño de sondas, amplificación y procesamiento de Hyb-seq, se pueden consultar en Lara-Cabrera y colaboradores (2021).

El procesamiento y análisis de las secuencias se realizó usando distintos programas incluidos en el pipeline HybPhyloMaker v.1.6.4 (Fér y Schmickl, 2018), como se menciona a continuación. Con base en los 98 genes amplificados con las sondas, se generó la pseudoreferencia (alineamiento de secuencias de las sondas diseñadas para amplificar los genes deseados), contra la que se mapearon las lecturas (Lara-Cabrera *et al.*, 2021) y se eliminaron los duplicados en las secuencias usando BWA (Li y Durbin, 2009). Las secuencias se separaron con base en la pseudoreferencia en genes nucleares independientes y se utilizó MAFFT v.7.429 (Katoh y Standley, 2013) para alinearlos. Para la reconstrucción filogenética de los árboles de genes se utilizó FastTree-2.1.11 (Price *et al.*, 2010). Estos árboles de genes fueron usados para reconstruir el árbol de especies en ASTRAL 5.6.3 (Mirarab *et al.*, 2014). Los nodos con valores de soporte inferior al 70 % de probabilidad posterior local, fueron colapsados. Finalmente, el árbol fue editado en TreeGraph (Stöver y Müller, 2010) y Photoshop (Adobe Inc. 2019).

Con base en el árbol de especies, se seleccionaron dos clados para realizar análisis de MAUVE (Darling *et al.*, 2004) y evaluar si hay reacomodos genómicos entre las tres especies representadas por dos muestras usando la opción Progressive MAUVE con los valores predeterminados del programa. Los alineamientos genómicos MAUVE se han utilizado para alinear genomas completos de mitocondria (Lee *et al.*, 2019), cloroplasto (Wang *et al.*, 2016) y núcleo (ADN ribosomal) (Olvera-Mendoza *et al.*, 2019; Hegarthy *et al.*, 2019) por mencionar algunos, para comparar las anotaciones a nivel genes y determinar si hay homología y reacomodos, ya sean en orden u orientación de genes entre varios genomas (Armstrong *et al.*, 2018).

Resultados

El mapeo en BWA presentó promedio de lecturas de 1,614,216 pares de bases (pb), en un rango de 300,000 a 3,000,000 pb; este amplio intervalo de longitud de las lecturas apunta a baja homogeneidad en el mapeo y/o captura de las sondas (Tabla. 1). En el caso de especies con dos muestras, se obtuvieron diferencias en longitud de lecturas pareadas de 841,172 pb en el par *S. hispanica*; 1,123,299 pb en el par *S. polystachia*; y 1,826,728 pb en el par *S. purpurea*.

Se alinearon 96 genes en MAFFT (Apéndice A), con promedio de longitud de secuencia de 1,237.21 pb e intervalo de 154 pb - 3,322 pb. De los 98 genes amplificados, se tuvieron que quitar dos de análisis subsiguientes al no presentarse en *S. leucantha*.

El árbol filogenético de especies (Figura 2) presenta 5 clados bien definidos, con altos valores de probabilidad posterior local, incluyendo a las secciones *Curtiflorae* y *Lavanduloideae sensu Epling* y otros 3 clados con especies clasificadas en distintas secciones. Las muestras pareadas de *S. hispanica* y *S. purpurea*, se observan como monofiléticas y con altos valores de probabilidad posterior local, pero *S. polystachia* no se recupera como especie monofilética.

El primer análisis de MAUVE incluye parte del clado D, con probabilidad posterior local de 0.97 con *Salvia rhyacophila* (Fernald) Epling como especie hermana de *S. hispanica*, este alineamiento presenta un solo reordenamiento y diferencia en longitud del alineamiento de ca. 30,000 pb. (Figura 3). El segundo análisis MAUVE incluye los clados E2.2.1. y E2.2.2; presenta importantes diferencias en longitud y reordenamientos, particularmente en los primeros 50,000 pb, sobre todo en *S. polystachia* [065]; menos reordenamientos entre *S. polystachia* [163] y *S. purpurea* [156] y más entre *S. polystachia* [065] y *S. tiliifolia* (Figura 4)

Tabla 1

Resultado del mapeo con BWA para las 33 muestras analizadas, indicando el porcentaje de lecturas pareadas, número de lecturas y lecturas pareadas. Se resaltan las muestras con mayor y menor cantidad de lecturas.

Especies	Porcentaje de lecturas mapeadas	Número de lecturas mapeadas	Número de lecturas pareadas
<i>Salvia areolata</i> Epling	40.333	1,762,389	2,104,618
<i>Salvia brachyodonta</i> Briq.	36.357	1,551,950	2,031,227
<i>Salvia chiapensis</i> Fernald	31.296	648,248	983,441
<i>Salvia connivens</i> Epling	40.962	1,588,767	1,687,323
<i>Salvia curtiflora</i> Epling	40.846	1,956,676	2,097,640
<i>Salvia curviflora</i> Benth	29.565	436,539	572,554
<i>Salvia decora</i> Epling	33.85	737,425	861,407
<i>Salvia farinacea</i> Benth.	34.679	1,510,414	1,923,431
<i>Salvia filipes</i> Benth.	38.018	2,066,606	2,384,762
<i>Salvia greggii</i> A. Gray	36.604	1,715,118	2,060,304
<i>Salvia helianthemifolia</i> Benth.	42.39	2,241,950	2,331,029
<i>Salvia tiliifolia</i> Vahl.	33.45	1,201,132	1,687,650
<i>Salvia hispanica</i> L. [19]	35.147	889,091	1,175,011
<i>Salvia hispanica</i> L. [85]	31.226	271,532	333,839
<i>Salvia iodantha</i> Fernald	42.859	1,706,012	1,734,365
<i>Salvia lavanduloides</i> Kunth	30.813	969,661	1,359,272
<i>Salvia leucantha</i> Cav.	42.081	2,815,039	2,946,595
<i>Salvia longispicata</i> M.Martens & Galeotti	26.9	569,094	860,396
<i>Salvia longistyla</i> Benth.	38.947	2,108,733	2,383,302
<i>Salvia mexicana</i> L.	41.206	1,957,267	2,077,869
<i>Salvia nervata</i> M.Martens & Galeotti	35.551	1,100,385	1,297,246
<i>Salvia occidua</i> Epling	26.673	457,891	735,646
<i>Salvia perblanda</i> Epling	38.548	1,027,185	1,124,198
<i>Salvia plurispicata</i> Epling	42.149	1,759,249	1,785,830
<i>Salvia polystachia</i> Ort. [065]	39.443	1,488,092	1,613,417
<i>Salvia polystachia</i> Ort. [163]	42.878	2,701,015	2,736,716
<i>Salvia purepecha</i> Bedolla & Lara Cabrera	30.374	938,863	1,237,170
<i>Salvia purpurea</i> Cav. [103]	37.429	1,532,314	1,741,100
<i>Salvia purpurea</i> Cav. [156]	41.367	1,861,188	1,912,355



Especies	Porcentaje de lecturas mapeadas	Número de lecturas mapeadas	Número de lecturas pareadas
<i>Salvia rhyacophila</i> (Fernald) Epling	26.986	290,255	488,674
<i>Salvia roscida</i> Fernald	23.372	427,666	711,865
<i>Salvia tiliifolia</i> Vahl.	35.046	1,653,494	2,033,111
<i>Salvia tonaticensis</i> Ramamoorthy ex Lara Cabrera, Bedolla & Zamudio	38.012	1,972,024	2,255,818

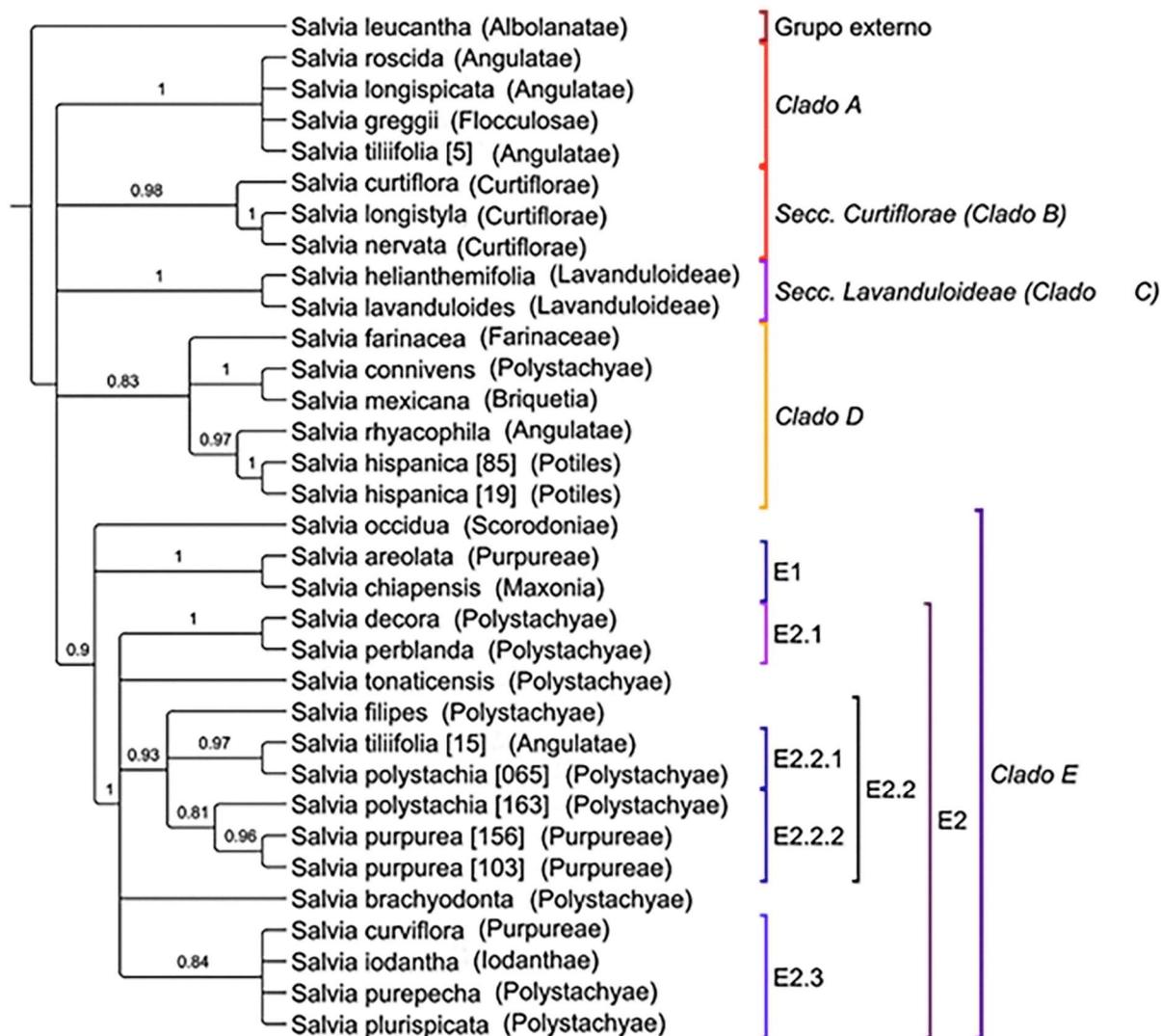


Figura 2. Árbol de especies reconstruido en ASTRAL. Los diferentes clados están indicados con corchetes de distintos colores. Los valores numéricos sobre las ramas del árbol señalan los valores de probabilidad posterior local.

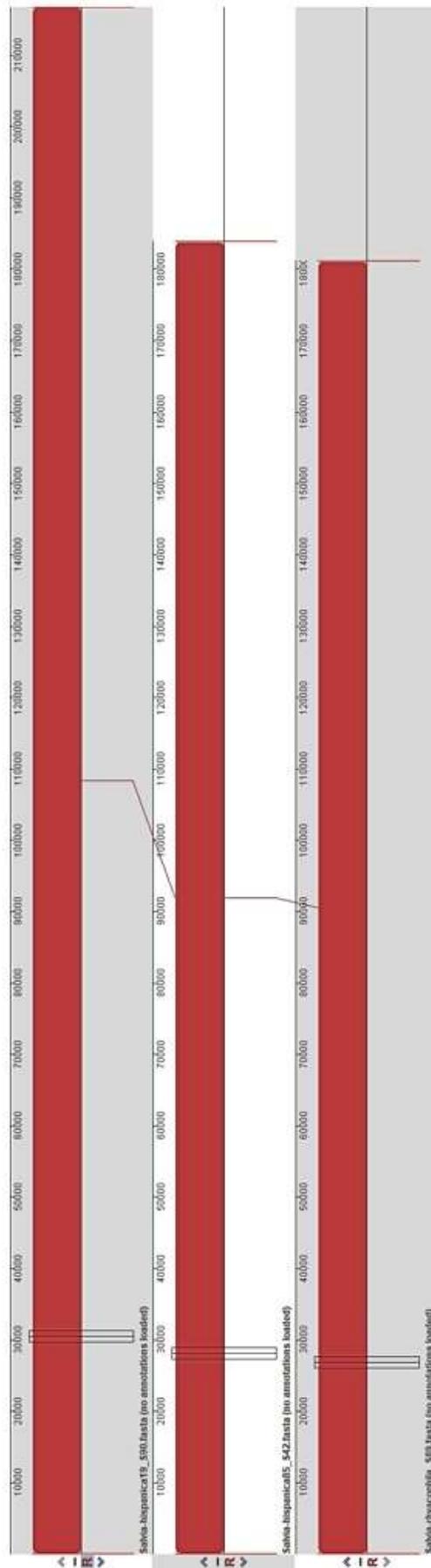


Figura 3. Análisis de reordenamiento de secuencias empleando MAUVE para el renglón inferior al superior *S. rhyacophila*, *S. hispanica* [85] y *S. hispanica* [19]. La línea negra perpendicular indica el fragmento/posición

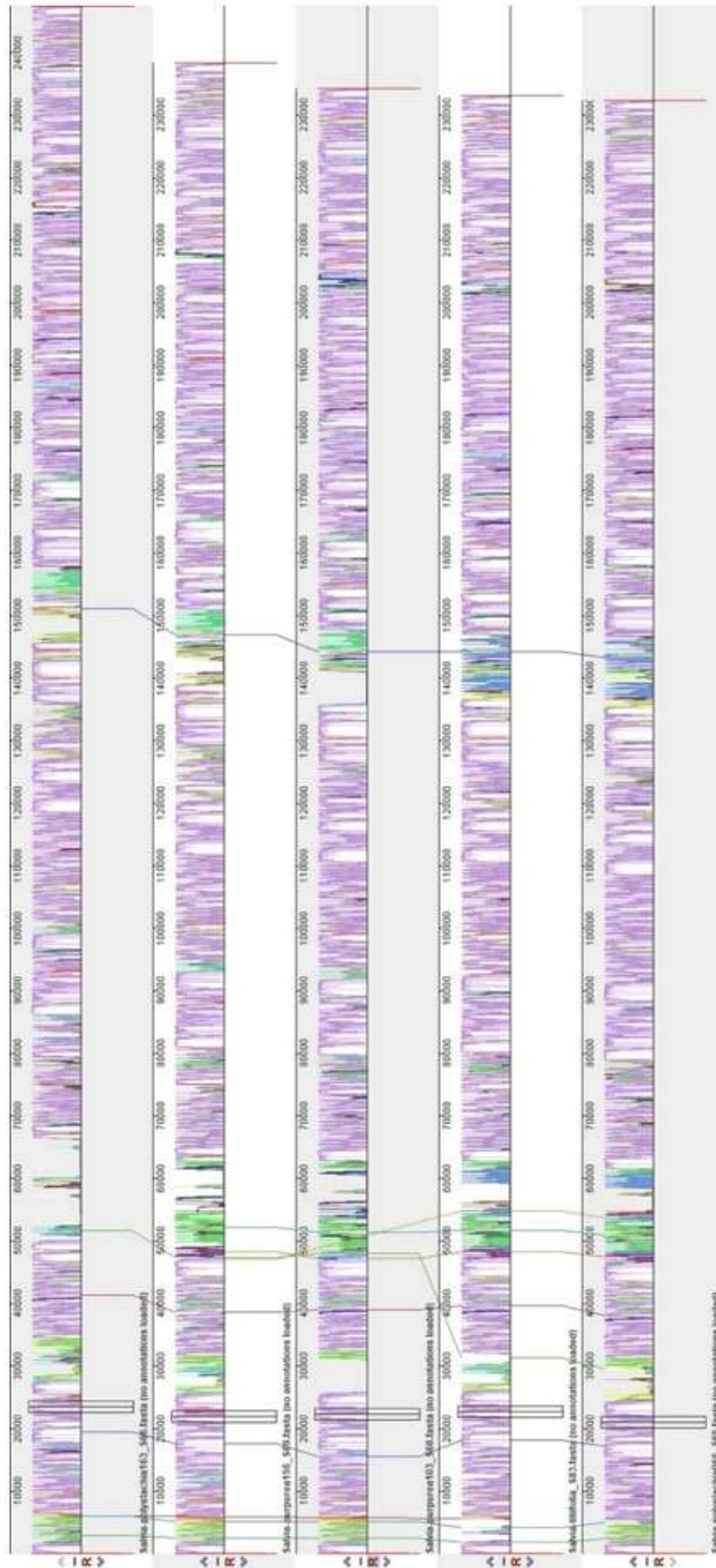


Figura 4. Análisis de reordenamiento de secuencias empleando MAUVE para cinco muestras de *Salvia* ubicadas en los cladogramas E.2.2.1 y E.2.2 del árbol ASTRAL. Los renglones, de abajo arriba, muestran a *S. polystachia* [65], *S. tiliifolia* [83], *S. purpurea* [156] y *S. polystachia* [163]. Las secciones en la secuencia en diferente color indican áreas con diferencias y reordenamientos en las secuencias.

Discusión

El árbol de especies de ASTRAL, con base en 96 genes nucleares, está bien resuelto al mantener las secciones *sensu* Epling *Curtiflorae* y *Lavaduloideae* y con clados soportados por altos valores de probabilidad posterior local y un clado con integrantes principalmente de las secciones *Polystachyae* y *Purpureae*. Sin embargo, al representar este un muestreo pequeño, comparado con la cantidad de especies ubicadas en el “núcleo *Calosphace*”, creemos que en futuros análisis será beneficioso que se incorporen otras especies a estos clados.

En este estudio, hacemos un primer acercamiento para determinar la monofilia de tres especies representadas por dos individuos procedentes de poblaciones geográficamente distantes; si bien se trata de un muestreo representativo de los rangos de distribución, es la primera vez que se hace datos NGS, mostrando que la técnica empleada es robusta y amena para utilizarse en muestreo más amplios para determinar la monofilia de especies. Confirmamos la monofilia de *S. hispanica* y *S. purpurea*, concordando con estudios previos (Lara-Cabrera *et al.*, 2021; Pérez-García, 2019). *S. hispanica*, se considera hoy en día un superalimento (Sosa-Baldivia *et al.*, 2018), por lo que determinar sus relaciones filogenéticas, monofilia y grupos hermanos, es de relevancia para futuros esfuerzos de mejoramiento genético, siendo *S. rhyacophila* de la sección Angulatae su especie hermana. La estrecha relación entre las especies *S. polystachia* y *S. purpurea*, fue observada desde el estudio de Walker (2006) y recuperada también en el estudio de Jenks y colaboradores (2013). Por su parte, en este estudio, nuevamente se presenta la cercanía filogenética entre estas dos especies, con una de las muestras de *S. polystachia* perteneciendo al grupo hermano de las *S. purpurea*. *Salvia polystachia* no se muestra como monofilética, pero *S. purpurea* es monofilética y hermana de la primera.

Las relaciones inferidas en el árbol ASTRAL de especies, adicionalmente se correlacionan con los alineamientos en MAUVE para las tres especies representadas por dos muestras. Estudios de alineamientos genómicos por MAUVE, buscan nucleótidos homólogos entre dos o más genomas, pero en el caso de especies cercanamente relacionadas, han presentado

problemas para distinguir mutaciones locales (inserción-delección) de mutaciones a mayor escala (ganancia y pérdida de segmentos genómicos grandes producto de eventos de recombinación). Aquí utilizamos progressive MAUVE que mejora las comparaciones genómicas entre muestras de especies cercanamente emparentadas, que pudieron pasar por eventos de recombinación, reacomodos, duplicación de segmentos, así como por pérdida y ganancia de regiones (Darling *et al.*, 2019). Los pocos reacomodos genómicos para las muestras de las dos especies monofiléticas y extensos reacomodos en *S. polystachia* y su cercana relación con *S. purpurea*, indican que en *S. polystachia* pueden haber ocurrido eventos de recombinación complejos, probablemente involucradas otras especies de *Salvia* y que se requerirá utilizar de otras herramientas, como estudios filogeográficos para definir una *S. polystachia* monofilética.

Los resultados aquí obtenidos, demuestran que el protocolo Hyb-Seq es una buena opción para análisis filogenéticos, al proveer resolución de clados a nivel profundo y superficial en la mayoría de los casos, dada la gran cantidad de datos obtenidos, observándose altos valores de soporte; asimismo, se recuperan *S. hispanica* y *S. purpurea* como especies monofiléticas. Sin embargo, *S. polystachia* no es monofilética, por lo que Hyb-Seq también ayuda a identificar especies de relaciones complejas dentro del “núcleo *Calosphace*” que, por lo tanto, deberán seguir siendo estudiadas.

Agradecimientos

Al Proyecto 8.16 de la Coordinación de la Investigación Científica otorgado a SILC; y a los revisores por sus comentarios.

Bibliografía

- Armstrong, J., Fiddes, I.T., Diekhans, M. y Paten, B., 2019, Whole-Genome Alignment and Comparative Annotation: *Annual Review of Animal Biosciences*, 15, 41-64. PMID: 30379572; PMCID: PMC6450745. doi: 10.1146/annurev-animal-020518-115005
- Barrett, C.F., Bacon, C.D., Antonelli, A., Cano, Á. y Hofmann, T., 2016, An introduction to plant phylogenomics with a focus on palms: *Botanical Journal of the Linnean Society*, 182(2), 234-255. ISSN: 0024-4074 (print) 1095-8339 (web), <https://doi.org/10.1111/boj.12399>



- Brassac, J. y Blattner, F.R., 2015, Species-Level Phylogeny and Polyploid Relationships in *Hordeum* (Poaceae) Inferred by Next-Generation Sequencing and In Silico Cloning of Multiple Nuclear Loci: *Systematic Biology*, 64(5), 792-808. ISSN: 1063-5157 (print) 1076-836X (web). <https://doi.org/10.1093/sysbio/syv035>
- Calzada, F., Yepez-Mulia, L., Tapia-Contreras, A., Bautista, E., Maldonado, E. y Ortega, A., 2010, Evaluation of the antiprotozoal activity of neo-clerodane type diterpenes from *Salvia polystachya* against *Entamoeba histolytica* and *Giardia lamblia*: *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 24(5), 662-665. <https://doi.org/10.1002/ptr.2938>
- Cuevas-Morales, C., Zavala-Ocampo, L.M., Miguel-Chávez, S., González-Trujano, M.E., Basurto-Pena, F.A., Muñoz-Ocotero, V. y Aguirre-Hernández, E., 2022, Pharmacological evaluation of the antinociceptive activity and phytochemical analysis of active extracts of *Salvia purpurea* Cav.: *Botanical Sciences*, 100(2), 383-396. ISSN 2007-4476 (online) ISSN 2007-4298 (print). <https://doi.org/10.17129/botsci.3013>
- Darling, A.C.E., Mau, B., Blattner, F.R. y Perna, N.T., 2004, Mauve: Multiple Alignment of Conserved Genomic Sequence with Rearrangements: *Genome Research*, 14(7), 1394-1403. ISSN: 1081-9051 (print) 1549-5469 (web). <https://doi.org/10.1101/gr.2289704>
- Drew, B.T., González-Gallegos, J.G., Xiang, C.L., Kriebel, R., Drummond, C.P., Walked, J.B. y Sytsma, K.J., 2017, *Salvia* united: The greatest good for the greatest number: *TAXON*, 66(1), 133-145. ISSN: 1196-8175 (web). <https://doi.org/https://doi.org/10.12705/661.7>
- Epling, C., 1939, A revision of *Salvia* subgenus *Calosphace*: *Repert. Spec. Nov. Regni Veg. Beih.*, 110. ISSN: 0233-187X (print).
- Epling, C., 1940, Supplementary Notes on American Labiatae: *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 67(6), 509-534. ISSN: 0040.9618 (web). <https://doi.org/10.2307/2480972>
- Epling, C., 1941, Supplementary Notes on American Labiatae-II: *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 68(8), 552-568. ISSN: 0040-9618 (web). <https://doi.org/10.2307/2481456>
- Epling, C., 1944, Supplementary Notes on American Labiatae-III: *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 71(5), 484-497. ISSN: 0040-9618 (web). <https://doi.org/10.2307/2481241>
- Epling, C., 1947, Supplementary Notes on American Labiatae-IV: *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 74(6), 512-518. ISSN: 0040-9618 (web). <https://doi.org/10.2307/2481876>
- Epling, C., 1951, Supplementary Notes on American Labiatae-V: *Brittonia*, 7(3), 129-142. ISSN: 0007-196X (print). <https://doi.org/10.2307/2804702>
- Epling, C. y Játiva, C., 1963, Supplementary notes on American Labiatae-VIII: *Brittonia* 15(4), 366-376. ISSN: 0007-196X (print). <https://doi.org/10.2307/2805381>
- Epling, C. y Játiva, C., 1966, Supplementary notes on American Labiatae-IX: *Brittonia* 18(3), 255-265. ISSN: 0007-196X (print). <https://doi.org/10.2307/2805366>
- Epling, C. y Mathias, M.E., 1957, Supplementary notes on American Labiatae-VI: *Brittonia*, 8(4), 297-313. ISSN: 0007-196X (print). <https://doi.org/10.2307/2804980>
- Eriksson, J.S., de Sousa, F., Bertrand, Y.J.K., Antonelli, A., Oxelman, B. y Pfeil, B.E., 2018, Allele phasing is critical to revealing a shared allopolyploid origin of *Medicago arborea* and *M. strasseri* (Fabaceae): *BMC Evolutionary Biology*, 18(9). ISSN: 1471-2105 (web). <https://doi.org/10.1186/s12862-018-1127-z>
- Fér, T. y Schmickl, R.E., 2018, HybPhyloMaker: Target Enrichment Data Analysis From Raw Reads to Species Trees: *Evolutionary Bioinformatics*, 14. ISSN: 1176-9343 (web). <https://doi.org/10.1177/1176934317742613>
- Fragoso-Martínez, I., Martínez-Gordillo, M., Salazar, G.A., Sazatornil, F., Jenks, A.A., García Peña, M. del R., Barrera-Aveleida, G., Benitez-Vieyra, S., Magallón, S., Cornejo-Tenorio, G. y Granados Mendoza, C., 2018, Phylogeny of the Neotropical sages (*Salvia* subg. *Calosphace*; Lamiaceae) and insights into pollinator and area shifts: *Plant Systematics and Evolution*, 304(1), 43-55. ISSN: 0378-2697 (print) 1610-6110 (web). <https://doi.org/10.1007/s00606-017-1445-4>
- Fragoso-Martínez, I., Salazar, G.A., Martínez-Gordillo, M., Magallón, S., Sánchez-Reyes, L., Moriarty Lemmon, E., Lemmon, A.R., Sazatornil, F. y Granados Mendoza, C., 2017, A pilot study applying the plant Anchored Hybrid Enrichment method to New World sages (*Salvia* subgenus *Calosphace*; Lamiaceae): *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 117, 124-134. ISSN: 1055-7903 (print). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ympev.2017.02.006>
- González-Gallegos, J.G., Bedolla-García, B.Y., Cornejo-Tenorio, G., Fernández-Alonso, J.L., Fragoso-Martínez, I.,

- García-Peña, M. del R., Harley, R.M., Klitgaard, B., Martínez-Gordillo, M.J., Wood, J.R.I., Zamudio, S., Zona, S. y Xifreda, C.C., 2020, Richness and Distribution of *Salvia* Subg. *Calosphace* (Lamiaceae): *International Journal of Plant Sciences*, 181(8), 831-856. ISSN: 1058-5893 (print) 1537-5315 (web).
<https://doi.org/10.1086/709133>
- Heraghty, S.D., Sutton, J.M., Pimsler, M.L., Fierst, J.L., Strange, J.P., y Lozier, J.D., 2020, *De novo* genome assemblies for three North American bumble bee species: *Bombus bifarius*, *Bombus vancoverensis*, and *Bombus vosnesenskii*: *G3. Genes, Genomes, Genetics*, 10(8), 2585-2592. ISSN 2160-1836 (web).
<https://doi.org/10.1534/g3.120.401437>
- Jenks, A.A., Walker, J.B. y Kim, S.C., 2013, Phylogeny of New World *Salvia* subgenus *Calosphace* (Lamiaceae) based on cpDNA (*psbA-trnH*) and nrDNA (ITS) sequence data: *Journal of Plant Research*, 126(4), 483-496. ISSN: 0918-9440 (print) 1618-0860 (web).
<https://doi.org/10.1007/s10265-012-0543-1>
- Katoh, K. y Standley, D.M., 2013, MAFFT Multiple Sequence Alignment Software Version 7: Improvements in Performance and Usability: *Molecular Biology and Evolution*, 30(4), 772-780. ISSN: 1537-1719 (web).
<https://doi.org/10.1093/molbev/mst010>
- Kriebel, R., Drew, B.T., Drummond, C.P., González-Gallegos, J.G., Celep, F., Mahdjoub, M.M., Rose, J.P., Xiang, C., Hu, G., Walker, J.B., Lemmon, E.M., Lemmon, A.R. y Sytsma, K.J., 2019, Tracking temporal shifts in area, biomes, and pollinators in the radiation of *Salvia* (sages) across continents: leveraging anchored hybrid enrichment and targeted sequence data: *American Journal of Botany*, 106(4), 573-597. ISSN: 1537-2197 (web). <https://doi.org/10.1002/ajb2.1268>
- Lara-Cabrera, S.I., Pérez-García, M. de la L., Maya-Lastra, C.A., Montero-Castro, J.C., Godden, G.T., Cibrian-Jaramillo, A., Fisher, A.E. y Porter, J.M., 2021, Phylogenomics of *Salvia* L. subgenus *Calosphace* (Lamiaceae): *Frontiers in Plant Science*, 12, 725900. ISSN: 1664-462X (web).
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.725900>
- Lee, Y., Kwak, H., Shin, J., Kim, S.C., Kim, T., y Park, J.K., 2019, A mitochondrial genome phylogeny of Mytilidae (Bivalvia: Mytilida): *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 139, 106533. ISSN 1055-7903 (web).
<https://doi.org/10.1016/j.ympev.2019.106533>
- Lemmon, A.R., Emme, S.A. y Lemmon, E.M., 2012, Anchored Hybrid Enrichment for Massively High-Throughput Phylogenomics: *Systematic Biology* 61(5), 727-744. ISSN: 1063-5157 (print) 1076-876X (web).
<https://doi.org/10.1093/sysbio/sys049>
- Li, H. y Durbin, R., 2009, Fast and accurate short read alignment with Burrows–Wheeler transform: *Bioinformatics*, 25(14), 1754-1760. ISSN: 1367-4803 (print) 1460-2059 (web). <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btp324>
- Mabberley, D.J., 1997, The plant-book. A portable dictionary of the vascular plants: *Cambridge University Press*, 2a Ed. ISBN 0-521-41421-0.
- Maldonado, E. y Ortega, A., 2000, Polystachynes A–E, five cis-neo-clerodane diterpenoids from *Salvia polystachya*: *Phytochemistry*, 53(1), pp.103-109.
[https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(99\)00466-5](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(99)00466-5)
- Mirarab, S., Reaz, R., Bayzid, M.S., Zimmermann, T., Swenson, M.S. y Warnow, T., 2014, ASTRAL: genome-scale coalescent-based species tree estimation: *Bioinformatics*, 30(17), i541-i548. ISSN: 1367-4803 (print) 1460-2059 (web). <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu462>
- Olvera-Mendoza, E.I., Godden, G.T., Montero-Castro, J.C., Porter, J.M. y Lara-Cabrera, S.I., 2020, Chloroplast and nuclear ribosomal cistron phylogenomics in a group of closely related sections in *Salvia* subg. *Calosphace*: *Brazilian Journal of Botany*, 43(1), 177-191. ISSN: 1806-9959 (web). <https://doi.org/10.1007/s40415-019-00572-9>
- Pérez-García, M. de la L., 2019, Filogenómica de *Salvia* subgénero *Calosphace* (Lamiaceae): Msc thesis, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/1808
- Price, M.N., Dehal, P.S. y Arkin, A.P., 2010, FastTree 2 – Approximately Maximum-Likelihood Trees for Large Alignments: *PLOS ONE*, 5(3), e9490. ISSN: 1932-6203 (web). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009490>
- Saarela, J., Wysocki, W., Barrett, C., Soreng, R., Davis, J., Clark, L., Kelchner, S., Pires, J., Edger, P., Mayfield-Jones, D. y Duvall, M., 2015, Plastid phylogenomics of the cool-season grass subfamily: Clarification of relationships among early-diverging tribes: *AoB PLANTS*, 7. ISSN: 2041-2851 (web).
<https://doi.org/10.1093/aobpla/plv046>



- Sanger, F., Nicklen, S. y Coulson, A.R., 1977, DNA sequencing with chain-terminating inhibitors: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 74(12), 5463-5467. ISSN: 0027-8424 (print) 1091-6490 (web).
<https://doi.org/10.1073/pnas.74.12.5463>
- Sosa-Baldivia, A., Ruiz-Ibarra, G., de la Torre, R.R.R., López, R.R., y López, A.M., 2018, The chia (*Salvia hispanica*): past, present and future of an ancient Mexican crop.: *Australian Journal of Crop Science*, 12(10), 1626-1632. ISSN: 1835-2693 (print).
- Stöver, B.C. y Müller, K.F., 2010, TreeGraph 2: Combining and visualizing evidence from different phylogenetic analyses: *BMC Bioinformatics*, 11(1), 7. ISSN: 1471-2105 (web). <https://doi.org/10.1186/1471-2105-11-7>
- Uribe-Convers, Settles, ML. y Tank, D.C., 2016, Data from: A phylogenomic approach based on PCR target enrichment and high throughput sequencing: resolving the diversity within the South American species of *Bartsia* l. (Orobanchaceae). *PLOS ONE*, Dryad Digital Repository. ISSN: 1932-6203 (web).
<https://doi.org/doi:10.5061/dryad.fh592>
- Velasco-Lezama, R., Quintero-Reyes, M. y Tapia-Aguilar, R., 2021, Evaluation of the antibacterial activity of *Salvia purpurea* Cav.: *Pharmacology on line*, 3, 413-420. ISSN: 1827-8620. <http://pharmacologyonline.silae.it>
- Walker, J.B., 2006, A preliminary molecular phylogenetic analysis of *Salvia* subgenus *Calosphace*: Ph.D thesis, *University of Wisconsin*.
<http://ci.nii.ac.jp/naid/10029563726/en/>
- Wang, L., Wuyun, T.N., Du, H., Wang, D. y Cao, D., 2016, Complete chloroplast genome sequences of *Eucommia ulmoides*: genome structure and evolution: *Tree Genetics & Genomes*, 12(1), 1-15. ISSN 1614-2950 (web).
<https://doi.org/10.1007/s11295-016-0970-6>
- Weitemier, K., Straub, S.C.K., Cronn, R.C., Fishbein, M., Schmickl, R., McDonnell, A. y Liston, A., 2014, Hyb-Seq: Combining target enrichment and genome skimming for plant phylogenomics: *Applications in Plant Sciences*, 2(9), 1400042. ISSN: 2168-0450 (web).
<https://doi.org/10.3732/apps.1400042>
- Will, M. y Claßen-Bockhoff, R., 2017, Time to split *Salvia sl* (Lamiaceae)—new insights from Old World *Salvia* phylogeny: *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 109, 33-58. ISSN: 1055-7903 (print).
<https://doi.org/10.1016/j.ympev.2016.12.041>

Apéndice A

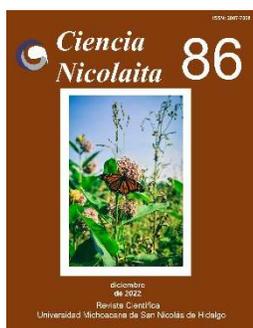
Longitud del alineamiento de 96 genes anotados en referencia a *Arabidopsis thaliana* (AT) para los cinco cromosomas de la especie, indicando el número de muestras que se amplificaron con las sondas diseñadas para el gen; longitud del alineamiento, número de sitios variables y sitios parsimoniosamente informativos, además, porcentaje de bases AT y GC. En rojo se indican los dos genes que se eliminaron de los análisis subsecuentes por carecer de *S. leucantha*.

Locus	# de taxa	Longitud alineamiento (pb)	# de sitios variables	Sitios de información parsimoniosa	% Adenina - Timina	% Guanina - Citosina
AT1G05120	33	2700	179	106	57.6	42.4
AT1G05350	33	154	9	2	61.3	38.7
AT1G07010	33	1075	60	27	54.4	45.6
AT1G14300	33	815	53	22	56.9	43.1
AT1G14810	33	651	61	45	44.9	55.1
AT1G16970	33	1935	85	34	58.1	41.9
AT1G28340	33	1538	138	85	55.2	44.8
AT1G43860	33	849	51	33	58.5	41.5
AT1G51940	33	1980	174	84	53.7	46.3
AT1G53280	33	1087	124	66	50.8	49.2
AT1G62750	33	2129	109	42	54.1	45.9
AT1G64550	33	1439	89	51	53.6	46.4
AT2G04305	25	1359	132	85	51.8	48.2

Locus	# de taxa	Longitud alineamiento (pb)	# de sitios variables	Sitios de información parsimoniosa	% Adenina - Timina	% Guanina - Citosina
AT2G15230	33	584	29	14	57	43
AT2G18710	33	1292	112	67	56.3	43.7
AT2G19940	33	357	39	19	55.2	44.8
AT2G36895	33	738	50	22	49	51
AT2G37500	33	447	43	24	55.2	44.8
AT3G01720	33	2508	175	104	55.1	44.9
AT3G04260	33	2749	183	89	56.2	43.8
AT3G04480	32	2236	94	32	59.7	40.3
AT3G05350	33	1338	109	52	58.7	41.3
AT3G09180	33	727	27	11	45.9	54.1
AT3G10230	27	1402	117	62	51.6	48.4
AT3G11830	33	1683	132	72	56.6	43.4
AT3G12290	33	908	85	43	53.2	46.8
AT3G17040	33	1860	166	78	52.7	47.3
AT3G17810	33	1149	122	85	51.3	48.7
AT3G17940	33	1090	120	68	53.1	46.9
AT3G20790	33	392	59	33	51.7	48.3
AT3G22590	33	1148	73	33	47.1	52.9
AT3G23620	33	957	78	54	56.8	43.2
AT3G25660	33	1958	124	72	53.3	46.7
AT3G25900	32	1001	67	34	51.7	48.3
AT3G27530	33	2756	167	76	55.9	44.1
AT3G29010	33	874	43	19	59	41
AT3G43540	31	1064	63	30	52.2	47.8
AT3G45300	33	951	48	24	55.4	44.6
AT3G47610	33	1093	94	47	52.8	47.2
AT3G51050	33	1655	151	102	51.8	48.2
AT3G52190	33	795	78	49	58.2	41.8
AT3G52640	33	2072	138	59	56.8	43.2
AT3G55070	33	1091	112	72	55.1	44.9
AT3G55260	33	1686	158	80	53.3	46.7
AT3G55500	27	383	36	22	34.3	65.7
AT3G56460	33	1111	134	76	49.4	50.6
AT3G57790	33	1503	106	55	51.2	48.8
AT3G58460	33	175	13	6	50.6	49.4
AT3G58690	33	1191	105	51	47.3	52.7
AT3G59040	33	1798	116	59	54.8	45.2
AT3G59380	33	1065	94	51	52.2	47.8
AT3G60830	33	1088	88	55	55.3	44.7
AT3G60850	33	1975	233	146	52.2	47.8
AT3G66658	33	1230	92	52	54.9	45.1
AT4G00090	33	645	61	27	55.4	44.6
AT4G00740	33	1324	147	94	52.1	47.9



Locus	# de taxa	Longitud alineamiento (pb)	# de sitios variables	Sitios de información parsimoniosa	% Adenina - Timina	% Guanina - Citosina
AT4G01880	28	1411	70	19	56.3	43.7
AT4G02990	33	1573	240	131	54.8	45.2
AT4G09750	33	969	64	23	47.1	52.9
AT4G19490	33	3322	234	107	53.1	46.9
AT4G19860	33	907	82	49	53.2	46.8
AT4G20130	33	1795	175	73	55.4	44.6
AT4G29490	33	590	48	26	59.3	40.7
AT4G29830	33	1037	72	22	40.5	59.5
AT4G30310	33	1077	78	38	54.8	45.2
AT4G30510	33	1161	50	24	59	41
AT4G31990	33	960	73	34	55.4	44.6
AT4G35850	33	510	45	20	55.5	44.5
AT4G35870	33	2625	244	138	52.5	47.5
AT4G37040	33	575	44	23	53.2	46.8
AT4G38460	33	1085	84	34	44.9	55.1
AT5G04420	33	606	48	24	56.7	43.3
AT5G05200	33	1079	92	39	56.3	43.7
AT5G05660	33	2581	261	129	46.1	53.9
AT5G08100	31	774	36	16	46.3	53.7
AT5G08170	33	527	54	39	55.7	44.3
AT5G09860	33	272	17	11	60.6	39.4
AT5G13030	33	1408	98	39	55.5	44.5
AT5G13520	33	2064	189	110	47.9	52.1
AT5G13650	33	1309	107	60	56.3	43.7
AT5G14250	33	832	71	35	53.8	46.2
AT5G14720	33	2025	90	37	56.3	43.7
AT5G17530	33	578	48	24	56.5	43.5
AT5G18070	33	1679	209	132	55.2	44.8
AT5G30510	33	704	53	30	53.4	46.6
AT5G42310	33	1494	138	83	50.1	49.9
AT5G42480	33	1051	136	84	53.6	46.4
AT5G43600	33	575	76	53	54	46
AT5G50390	33	1900	141	76	57.1	42.9
AT5G56580	33	1062	57	28	57.9	42.1
AT5G57030	33	855	91	51	57.2	42.8
AT5G57655	33	809	60	30	55.5	44.5
AT5G61530	33	1133	72	37	54.5	45.5
AT5G62530	32	352	47	27	56.2	43.8
AT5G63610	33	1418	89	46	54.1	45.9
AT5G63890	33	541	48	17	54.6	45.4
AT5G64370	33	1004	134	88	53.8	46.2
AT5G65720	33	1258	142	81	47.4	52.6



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Lo controversial de los cambios nomenclaturales: tres casos de estudio en plantas

The controversy of nomenclatural changes: three cases studies in plants

Sabina Irene Lara Cabrera y Yocupitzia Ramírez Amezcua*

Para citar este artículo: Sabina Irene Lara Cabrera y Yocupitzia Ramírez Amezcua, 2022. Lo controversial de los cambios nomenclaturales: tres casos de estudio en plantas. Ciencia Nicolaita no. 86, 84-96.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.691>

Historial del artículo:



Recibido: 30 de agosto de 2022

Aceptado: 7 de noviembre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: yocupitzia@yahoo.com



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Lo controversial de los cambios nomenclaturales: tres casos de estudio en plantas

The controversy of nomenclatural changes: three cases studies in plants

Sabina Irene Lara Cabrera y Yocupitzia Ramírez Amezcua*

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Biología, México.

Resumen

La sistemática moderna pretende una clasificación natural basada en grupos monofiléticos, y a medida que contamos con más evidencias sobre las relaciones evolutivas de los organismos, se presenta la oportunidad de reconsiderar la pertinencia de la clasificación, manteniendo la nomenclatura viva. Con el afán de reconocer linajes que comprendan *todos los descendientes de un ancestro común*, se presenta la disyuntiva de *dividir o unir* los que no son coherentes con la evidencia acumulada, sin menoscabo de la predictibilidad y estabilidad necesarias en la clasificación biológica. Una clasificación acorde con las teorías aceptadas, accesible y que refleje las relaciones evolutivas, es una gran responsabilidad de los taxónomos; sin embargo, paradójicamente, se encuentra con la dificultad del minucioso trabajo que implica proponer los cambios y de cierta resistencia e incertidumbre de los usuarios para adoptar el uso de los nuevos nombres científicos. En este trabajo se presentan tres casos de géneros de plantas que recientemente fueron sujetas a cambios nomenclaturales: *Acacia*, *Mimulus* y *Salvia*; todos controversiales. La respuesta de la comunidad científica ha sido variada, tal y como lo atestiguan múltiples publicaciones; sin embargo, destacamos que los retos que ello representa, son inherentes al avance científico.

Palabras clave: monofilia, clasificación genérica, circunscripción, sistemática

Abstract

Modern systematics attempts to build classifications that are natural, i.e, based on phylogenetic relationships and the recognition of monophyletic groups. As more evidence is gathered about the evolutionary relationships of organisms, new opportunities arise to reconsider their classification, thus maintaining life in a dynamic nomenclature. In order to recognize lineages that contain a *common ancestor and all of its descendants*, it is often necessary to split or lump taxa that are not coherent with the evidence accumulated. This should be done without impairing the predictability and stability necessary for biological classifications. Taxonomists have a great responsibility to provide classifications that agree with accepted theories, are accessible, and reflect evolutionary relationships. However, paradoxically, given the care and complexity of these changes, taxonomists occasionally are reluctant to propose them, and the users of scientific names to adopt them. In this publication, we present three cases studies of plant genera that have recently undergone major and controversial taxonomic changes: *Acacia*, *Mimulus* and *Salvia*. The response by the scientific community often has been inconsistent, as is shown by multiple publications with different points of view. However, we emphasize that the challenges that these changes represent are in fact inherent to scientific advances.

Keywords: monophyly, genera, circumscription, systematics

Introducción

Desde la adopción de la taxonomía jerárquica propuesta por Linneo, los científicos se han enfrentado a la disyuntiva de dos posturas respecto a la circunscripción de los grupos y su clasificación: ¿Dividir o unir? Estas posturas se han visto exacerbadas al incorporar la teoría cladista de Hennig (1966) a la sistemática (Funk, 1985) que, recientemente, ha resultado en muchos cambios nomenclaturales a diferentes niveles taxonómicos. La sistemática moderna busca generar una clasificación basada en el reconocimiento de grupos naturales, dicho de otra forma, de grupos probados como monofiléticos. Sin embargo, es particularmente difícil decidir si se divide un grupo que incluye gran cantidad de especies y se reconocen muchos grupos pequeños o, por el contrario, si se unen muchos que tradicionalmente se han reconocido como distintos, sobre todo al tratar de conciliar la predictibilidad y estabilidad necesarias en la clasificación biológica. La predictibilidad pretende prever atributos de los taxones aún no descritos, basado en los integrantes del grupo en cuestión, mientras que la estabilidad, busca incrementar la capacidad de comunicación de una clasificación, manteniendo, dentro de lo posible, el uso de los nombres ya reconocidos (Humphreys y Linder, 2009).

Esta disyuntiva es particularmente emotiva para muchos taxónomos cuando se trata de géneros, no así en categorías nomenclaturales superiores (Podani, 2009) donde el concepto cladista de *monofilia* se ajusta más naturalmente a la clasificación (Kutner y Agnarsson, 2006). Reconocer grupos monofiléticos implica que la unidad de clasificación, es decir, el taxón, incluye al ancestro y a todos los descendientes del mismo; parafraseado como, *todos los descendientes de un ancestro común* (Schrire y Lewis, 1996). Los grupos serán reconocidos por sus sinapomorfias (caracteres derivados, nuevos respecto al ancestro y compartidos por al menos dos descendientes del ancestro en cuestión), en otras palabras, reconocer todos los taxa ubicados en un cladograma arriba de una sinapomorfia (Funk, 1985), alejándose de caracteres plesiomórficos (ancestrales), analogías, homoplasias y convergencias.

La cuidadosa relatoría del concepto de género de Frodin (2004), indica que el concepto comenzó a utilizarse desde las clasificaciones *folk*, aquellas realizadas por comunidades generalmente rurales que manejan activamente su entorno biológico inmediato y reconocieron empíricamente *entidades visiblemente distintas*. A partir del dominio de los principios clasificatorios de Linneo, la *epocha systematorium*, una especie nunca pertenecerá a más de un género, es decir,



que los géneros no se sobrelapan. Además, al incorporarse la teoría cladista, se considera que los géneros son grupos monofiléticos que incluyen una o más especies y que el rango de género es, generalmente, el primero supra específico monofilético en recibir un nombre (Kornet, 1988), aunque cabe destacar que hay grupos en los que también se reconocen otros rangos monofiléticos como secciones y subgéneros.

La discusión sobre la circunscripción de los géneros, unir o dividir, no es exclusiva de este siglo ni del anterior, aunque ciertamente ha retomado popularidad. Históricamente las concepciones de los taxónomos han diferido y algunas de ellas han trascendido los años. Por ejemplo, Tournefort a finales del siglo XVII prefería reconocer muchos géneros pequeños, mientras que para el siglo XVIII, Linneo optó por unir esos géneros pequeños en géneros grandes, aunque más difíciles de reconocer morfológicamente (Humphreys y Linder, 2009). Aunque la tendencia de reconocer los géneros pequeños permaneció entre los seguidores de Tournefort hasta el siglo XIX, la influencia de Bentham (Bentham y Hooker 1862-1883) y su preferencia por géneros grandes, fue dominante en la época y se gestaron los llamados géneros gigantes, entre los que se encuentran *Carex* L. (2,000 spp., Cyperaceae), *Euphorbia* L. (2,000 spp., Euphorbiaceae), *Salvia* L. (900 spp., Lamiaceae), *Psychotria* L. (800-1,500 spp., Rubiaceae), *Croton* L. (750 spp., Euphorbiaceae), *Ficus* L. (750 spp., Moraceae), *Cassia* L. (645 spp., Fabaceae) y *Quercus* L. (400 spp., Fagaceae) (Frodin, 2004). Para 1883, año en que Bentham y Hooker publicaron la última parte de su obra *Genera Plantarum*, diez géneros contaban con 500 a 900 especies, mientras que para 1997 ya eran 57 géneros los que incluían entre 500 y 2,000 especies, entre ellos *Astragalus* L., *Carex* y *Euphorbia*.

La problemática de la circunscripción genérica también implica un componente de manejabilidad (Frodin, 2004), ya que géneros tan grandes difícilmente pueden ser abordados en una monografía, mismas que son escasas en la literatura sistemática de años recientes (Agarsoon y Kuntner, 2007). Este tipo de tratamiento taxonómico es de gran relevancia porque aborda la diversidad completa de un grupo, incluyendo el amplio espectro de su variabilidad, a la vez que provee de claves para la determinación y descripciones para todas sus especies.

Los taxónomos tenemos la encomienda de inventariar la biodiversidad y mantener el orden en su clasificación, incorporando los avances científicos, sin soslayo del impacto que tiene en los múltiples usuarios de los nombres de las especies, es decir, en todas las personas que utilizan nombres científicos sin ser taxónomos, por ejemplo, horticultores, agricultores, ecólogos, arqueólogos, médicos, entre otros. Proveer de clasificaciones acordes con las teorías aceptadas y que en efecto reflejen las relaciones evolutivas de los seres vivos (Kornet, 1988), es una responsabilidad que, paradójicamente, se encuentra con cierta reticencia de los taxónomos para proponer los cambios y de los usuarios para adoptarlos, creando un cisma conceptual entre quienes estudian los resultados de los procesos evolutivos y quienes estudian el proceso en sí mismo (Humphreys y Linder, 2009).

La crisis que enfrenta actualmente la taxonomía (Villaseñor, 2015) está dominada por la escasez de financiamiento y de profesionales dedicados a ella, lo que contribuye al desconocimiento y la desvalorización (Ebach *et al.*, 2011) de esta imprescindible labor. La naturaleza poco expedita del trabajo taxonómico reside, en parte, en la minuciosa tarea que implica conocer un grupo a detalle, de la complejidad del conjunto de principios y reglas que se aplican para la denominación inequívoca, única y distintiva de los taxa, además de las intrincadas historias taxonómicas de muchos grupos. Todo ello acentúa la discrepancia entre el avance e integración de la evidencia filogenética y la clasificación actual.

En las últimas décadas los avances científicos, conceptuales y metodológicos que se aplican en la sistemática han sido superlativos, y cada día es más costoso y expedito generar secuencias de ADN, siendo incluso posible obtener genomas completos en un solo día (Harrison y Kinder, 2018). Consecuentemente, la publicación de investigaciones basadas en amplios muestreos, aunque no exhaustivos, es abundante. Este tipo de trabajos generalmente no incluyen la totalidad de los integrantes de un grupo (Soltis *et al.*, 2004), sino pocos individuos y de uno a tres ejemplares representativos por especie. Muchos ven en estos estudios historias “incompletas”, al no considerar la totalidad de los miembros de los grupos de estudio; sin embargo, se complementan perfectamente con

otras fuentes de evidencia, incluso se ha visto que llegan a confirmar hipótesis previas basadas en filogenias morfológicas (Tamayo-Cen *et al.*, 2022).

Los cambios en circunscripción, es decir, cómo definimos los grupos, se traducen en cambios de clasificación que pueden ser adoptados o rechazados por la comunidad científica. Incluso el sistema de clasificación sexual de Linneo se enfrentó a resistencia por algunos miembros de la comunidad científica de la época. José Quer, fundador del Real Jardín Botánico de Madrid, por ejemplo, se negaba a abandonar el sistema de Tournefort y adoptar el de Linneo, considerando que “un nuevo sistema solo complicaría más el estudio de la botánica, ya que no representaba los nombres antiguos de las plantas, y que imponer un nuevo criterio equivaldría a cierto retraso” (Ramírez, 2012). Actualmente su propuesta, que consta de 24 clases según el androceo, ha quedado prácticamente en el olvido, no así la nomenclatura binomial por la que lo conocemos como el Padre de la Taxonomía.

Cuando no hay consenso en la circunscripción de un grupo, los nombres se mantienen en paralelo, es decir, los taxónomos eligen de entre los nombres válidos cuál usarán, lo que para muchos genera confusión. La discordancia entre opiniones tiene mucho que ver con que al hacer reacomodos, un nombre ampliamente conocido queda supeditado por otro(s) y solamente una pequeña porción de las especies que lo integraban siguen siendo reconocidas por ese nombre genérico. ¿Qué grupo mantiene el nombre genérico? No es un asunto trivial, puesto que tiene implicaciones profundas; no obstante, hay una regla del código ICBN (Código Internacional de Nomenclatura para algas, hongos y plantas, Turland *et al.*, 2018) que indica que los géneros deben hacer referencia a una de sus especies y que esta sirve como tipo nomenclatural. Entonces, los nuevos nombres no obedecen a una decisión arbitraria del investigador que los propone. Esta situación causa controversia, preocupación, molestia y hasta la malinterpretación del ICBN, lo que se refleja claramente en la visceralidad que puede teñir el debate (Kull y Rangan, 2012). Tradicionalmente ha habido menos aceptación de los cambios nomenclaturales en grupos de plantas muy conocidos, carismáticos y que han sido modelo de estudios evolutivos y ecológicos. Esto puede deberse a que hay más usuarios de esas especies y, por tanto, las opiniones y preferencias personales son más variadas, además de que implica

integrar nuevos nombres y las razones de los cambios no siempre son fáciles de asimilar.

A pesar de los impedimentos, la ciencia continúa avanzando y la evidencia acumulada nos permite conocer más de las relaciones evolutivas de los grupos, presentando oportunidades para reevaluar las clasificaciones a la luz del nuevo conocimiento. La toma de decisiones es constante, aun cuando la velocidad con que se proponen relaciones filogenéticas es vertiginosa y lenta en incorporarse formalmente a la clasificación. Ejemplo de ello es el reciente estudio de Tamayo-Cen *et al.* (2022), donde se reconsidera la circunscripción genérica del clado *Pithecellobium* (Leguminosae, Caesalpinioideae).

En este contexto, el presente trabajo muestra el panorama de la dinámica nomenclatural usando como ejemplos tres casos de géneros de plantas en los que se propusieron cambios para reconocer grupos monofiléticos y la respuesta de la comunidad científica, la cual varía desde distintos grados de aceptación e incorporación paulatina, hasta resistencia y rechazo.

Casos de estudio

Acacia

El género *Acacia* Miller era el segundo más grande de las Fabaceae (familia de los frijoles, lentejas y otras legumbres) con cerca de 1,450 especies y una distribución pantropical; las especies de este género se ubicaban a su vez en tres subgéneros (Rico-Arce, 2007). *Acacia* es de importancia económica por su capacidad fijadora del nitrógeno atmosférico, por ser fuente de madera para la construcción y la combustión, además de otros múltiples usos. De *Acacia senegal* (Lam.) Willd, por ejemplo, se obtiene la goma arábiga (Ashour *et al.*, 2022). Algunas de sus especies son esenciales para las abejas polinizadoras y se utilizan en esfuerzos para revertir la desertificación (Hussain y Al Joalud, 2011). Se distribuye en tierras secas, pero también en selvas de Centroamérica (Rico-Arce, 2007) donde especies de *Vachellia* Wright & Arn. (antes *Acacia* subg. *Acacia*) tienen interesantes asociaciones con las hormigas *Pseudomyrmex ferrugineus*, quienes habitan al interior de sus espinas hinchadas, mientras las protegen de la herbivoría (Ward y Branstetter, 2017).

En 1986, Pedley integró estudios de morfología, palinología y bioquímica y propuso elevar a género



Figura 1. *Senegalia macilenta* (Rose) Britton & Rose (= *Acacia macilenta* Rose) y *Racosperma farinosa* (Lindl.) Pedley (= *Acacia farinosa* Lindl.). Fotos: V.W.S.

cada uno de los tres subgéneros: el subg. *Acacia* conserva el nombre genérico de *Acacia* (con 161 especies), el subg. *Aculeiferum* como *Senegalia* Raf. (con 231 especies) y el subg. *Phyllodineae* como *Racosperma* Raf. (con 960 especies). Posteriormente, esta propuesta fue soportada con evidencias moleculares que revelaron que *Acacia* no era monofilético (Maslin *et al.*, 2003), por lo que se puso sobre la mesa el decidir si mantener un género *Acacia* polifilético o realizar los cerca de 1,200 a 1,400 cambios nomenclaturales necesarios para reconocer géneros monofiléticos.

La situación se complicó al considerar el grupo que contiene el tipo nomenclatural de *Acacia*: que corresponde a *A. scorpioides* (L.) W. Wright, especie distribuida en África. El subg. *Acacia* resulta ser el más pequeño de los tres géneros sucedáneos, y es el grupo que debía mantener el nombre *Acacia* de acuerdo al ICBN. Sin embargo, se planteó ante el Comité de Nomenclatura (órgano oficial del Código Internacional de Nomenclatura Botánica) la alternativa de cambiar la especie tipo del género *Acacia* a *Acacia penninervis* Sieber ex DC., una especie clasificada en el subg. *Phyllodineae*, para así mantener a *Acacia* como el género más grande (distribuido en Australia) y transferir las especies del subg. *Acacia* al género *Vachellia* Wight & Arn. (Orchard y Maslin, 2003).

Por su importancia ecológica, económica y el número de cambios nomenclaturales requeridos, el caso de *Acacia* y la propuesta de cambiar el tipo nomenclatural fue votado en la sesión de Nomenclatura del Congreso Internacional de Botánica de Viena en 2005, y a pesar de que la propuesta perdió por 54.9 % de los votos, el Comité de Nomenclatura decidió aprobarlo bajo el argumento de un consenso de mayoría (Moore

et al., 2011). Esto generó molestia en gran parte de la comunidad botánica respecto a la interpretación y el manejo del ICBN (Moore *et al.*, 2011), además de que, finalmente, se realizaron los cambios nomenclaturales para cinco géneros (Kyalangalilwa *et al.*, 2013): *Acacia*, *Vachellia*, *Senegalia*, *Acaciella* Britton & Rose y *Mariosousa* Seigler & Ebinger (antes subg. *Coulteri*) (Figura 1).

Algo interesante de este caso es que la problemática no se gestó entre la comunidad de usuarios, sino entre los mismos botánicos, generando discordia y desconfianza, además de que, por ahora, *Acacia s. l.* (*sensu lato*, en el sentido laxo) se sigue usando como nombre conservado, al igual que los nombres genéricos nuevos, manteniendo algo de confusión, no solo entre los biólogos, sino también en la comunidad en general.

Mimulus

El caso de *Mimulus* L. sirve como ejemplo de la respuesta de genetistas, ecólogos y fisiólogos en contra de la recircunscripción de un grupo de importancia en diversos ámbitos de la investigación biológica (Lowry *et al.*, 2019), además de ejemplificar dos tipos de cambios nomenclaturales: la reclasificación genérica para mantener taxa monofiléticos y el cambio en la circunscripción de la familia a la que pertenecía.

Los *Mimulus* conocidos en el norte de México como perritos (*Mimulus puniceus* Steud.), lama (*Mimulus guttatus* Fischer ex DC.) (Figura 2), pico de pájaro (*Mimulus verbenaceus* Greene) o flor mono (Martínez, 1994), sumaban ca. 150 especies distribuidas en el Sur de África, Asia y América (Mabberley, 1997).



Figura 2. *Erythranthe glabrata* (Kunth) G.L. Nesom (= *Mimulus glabratus* Kunth). Fotos: P.F.A.

Este género se consideraba parte de la familia Scrophulariaceae; sin embargo, los estudios filogenéticos de Olmstead y colaboradores (2001), mostraron que las familias Lamiaceae y Verbenaceae no eran monofiléticas y que algunos elementos de Scrophulariaceae se encontraban fuera del núcleo de la familia. Además de que otros siete grupos correspondientes al rango de familia, estaban anidados en Scrophulariaceae (Olmstead, 2002). Este mismo tipo de datos demostró que *Mimulus* estaba más cercanamente emparentado al género *Phryma* L., que se clasificaba en Verbenaceae o Lamiaceae (Barker *et al.*, 2012); como resultado, propusieron incluir ambos géneros en la familia Phrymaceae, que ahora consta de 188 especies distribuidas en 13 géneros, siendo los géneros *Diplacus*, *Erythranthe*, *Hemichaena*, *Leucocarpus*, *Mimat-hanthe* y *Phryma* endémicos de Norte y Centro América, mientras los demás se distribuyen en el Este de Asia y América del Sur (Nesom *et al.*, 2019) (Figuras 3 y 4).

Posteriormente, estudios moleculares basados en secuencias del cloroplasto (Beardsley y Olmstead, 2002) y nucleares (Nesom *et al.*, 2019), mostraron que

Mimulus es polifilético. El clado donde aparecían 21 especies de *Mimulus*, incluía también especies de otros géneros pequeños, por lo que se revisó su circunscripción. Baker y colaboradores (2012) optaron por dividirlo en tres géneros principales: *Mimulus*, *Erythranthe* y *Diplacus*; bajo esta perspectiva, el género *Mimulus* ahora contiene siete especies, entre las que, por supuesto, se encuentra la especie tipo para el género: *Mimulus rigens* L., un drástico cambio si recordamos que anteriormente contenía unas 150 especies.

La división de *Mimulus* ha generado acalorados debates entre taxónomos (Nesom *et al.*, 2019) y usuarios como Lowry y sus 37 colaboradores (2019), entre genetistas moleculares y ecólogos evolucionistas, cada uno defendiendo su postura. La resistencia de los “usuarios” que se oponen a la división del género se puede atribuir a que algunas especies de *Mimulus* han sido modelo para estudios de adaptación y especiación durante décadas, como es el caso de polinización de las especies parapátricas *Mimulus lewisii* y *M. cardinalis* (aceptadas como *Erythranthe lewisii* (Pursh) G.L. Nesom & N.S. Fraga y *E. cardinalis* (Douglas ex



Figura 3. *Leucocarpus perfoliatus* (Kunth) Benth. (= *Mimulus perfoliatus* Kunth). Fotos V.W.S.



Figura 4. *Mimulus guttatus* DC. (primeras tres imágenes), *M. dentatus* Nutt. ex Benth. y *M. bigelovii* (A. Gray) A. Gray. Fotos: V.W.S, excepto *M. dentatus* por H. Pauli.

Benth.) Spach, respectivamente). En su estudio más reciente de radiación adaptativa, Nelson y colaboradores (2021) evitan el cambio nomenclatural bajo el argumento de “no adoptar una nomenclatura nueva para los organismos en los que trabajamos, hasta estar convencidos que la nomenclatura será estable a largo plazo” (trad. libre) (Lowry *et al.*, 2019).

Aunque el cambio nomenclatural es aceptado entre los sistématas, dada la resistencia de los “usuarios” y en aras de tranquilizar el ambiente, Nesom y colaboradores (2019) sugirieron conservar algunos de los nombres previos, incluyendo al nombre de la especie y la sección en la que se clasifica, por ejemplo, *Mimulus cardinalis* sección *Erythranthe* en lugar del nuevo nombre *Erythranthe cardinalis*; siendo esta la pauta hacia una transición más “amable” para los usuarios, dando tiempo para que se adapten.

Salvia

Las especies de *Salvia* (Lamiaceae: tribu Menthae) son muy atractivas y unas 200 de ellas adornan los jardines del mundo (Clebsch, 1997) (Figura 5). Destacan

Salvia leucantha Cav. por su valor ornamental, *Salvia officinalis* L. de gran importancia gastronómica y *Salvia hispanica* L., la “chía”, con frutos de alto valor alimenticio. Las especies de este grupo tienen enorme potencial de explotación, principalmente por sus cualidades medicinales (Ahmed *et al.*, 1994; Chen *et al.*, 1999; Cuevas-Morales *et al.*, 2022; Guillen *et al.*, 1996; Grundmann *et al.*, 2007; Kamatou *et al.*, 2008; Malik *et al.*, 1987; Qureshi *et al.*, 1989; Yagi *et al.*, 1989) y en herbolaria (Jenks y Kim, 2013). En Sudáfrica, por ejemplo, el 33 % de sus especies se utilizan para tratar diversos males (Kamatou *et al.*, 2008), desde adicciones hasta malestares estomacales. En México, se identifican dos complejos de especies ampliamente utilizados (Jenks y Kim, 2013), el Mirto (*Salvia coccinea* Buc’hoz ex Etl., *Salvia elegans* Vahl., *Salvia fulgens* Cav., *Salvia involucrata* Cav. y *Salvia microphylla* Sessé & Moc.) y el Cantueso (*Salvia lavanduloides* Kunth y *Salvia longispicata* M.Martens & Galeotti), además de la famosa *Salvia divinorum* Epling & Játiva, que contiene salvinorina A, un compuesto opioide que altera



Figura 5. Tres especies de *Salvia* próximas a formalizarse en género *Lasemia* (Porter *et. al.* com. pers.): *S. patens* Cav., *S. cacaliifolia* (Benth.) y *S. fulgens* Cav. y *S. canariensis* L., una especie del clado *Salvia* s. s. Fotos: S.I.L.C.

la conciencia, el humor y la percepción del dolor (Caselman *et al.*, 2014).

Desde la publicación de la primera filogenia para *Salvia* (Walker *et al.*, 2004), se observó que inmersos se encontraban los géneros *Dorystaechas* Boiss. & Heldr., *Mentha* L., *Thymus* L., *Origanum* L., *Rosmarinus* L. y *Perovskia* Kar. Los análisis de Walker y Sytsma (2007), confirmaron la inclusión de *Dorystaechas*, *Perovskia* y *Rosmarinus*, además de otros dos géneros también pequeños (*Meriandra* Benth. y *Zhumeria* Rech.f. & Wendelbo) en *Salvia*. Aunque la relación con *Origanum* y *Thymus* no se volvieron a observar (Drew *et al.*, 2017), es decir, que bajo la concepción que se estaba manejando *Salvia*, el género no era monofilético (al incluir a otros), por lo que se debería redefinir para reflejar entidades monofiléticas y reconocibles morfológicamente.

Para el caso de *Salvia* ha habido dos propuestas formales. La primera ya implementada por Drew y colaboradores (2017) donde el género alcanza las 1000 especies al unir (ahora como subgéneros) a los cinco géneros pequeños que antes se consideraban independientes y que Walker y Sytsma (2007) probaron anidados en *Salvia*. Desde la perspectiva de Drew y colaboradores (2017), por ejemplo, el romero, *Rosmarinus officinalis* L., debería reconocerse como *Salvia rosmarinus* (L.) Schleid, siendo especie de *Salvia* subg. *Rosmarinus* (L.) J.B. Walker, B.T. Drew & J.G. González. Por otro lado, la alternativa que proponen Will y colaboradores (2015), es dividirlo en entidades menores, monofiléticas y morfológicamente definibles, evitando hacer de *Salvia* un género aún más grande y más difícil de caracterizar morfológicamente. Esta aproximación, dado el enorme tamaño del género, implica un esfuerzo nomenclatural muy importante que está en proceso y que requiere que se retiren del género *Salvia* aproximadamente 750 especies, quedando *Salvia sensu stricto* (s.s.) con unas 250 especies, siendo estas las del clado monofilético donde se encuentra *Salvia officinalis* L. (Walker y Sytsma, 2007), especie tipo del género *Salvia*. Bajo esta visión, se reconocen los géneros monofiléticos *Dorystaechas*, *Meriandra*, *Perovskia*, *Rosmarinus* y *Zhumeria* como se definían anteriormente, y se requiere agrupar bajo nuevos géneros las demás especies. En este sentido, Will y colaboradores (2015) revivieron al género *Pleudia* Raf., que incluye 14 especies previamente clasifi-

cadas como *Salvia* secc. *Eremosphace* Bunge, distribuidas en el Norte de África, Islas Canarias, Península Arábiga y Suroeste de Asia.

Por otro lado, de acuerdo a la filogenia del género *Salvia* de Will y Classen-Bockhoff (2017), las especies de América se clasifican en tres grupos: 1) las *Salvia* de origen europeo distribuidas en el SO de EUA clasificadas como *Salviastrum* Scheele y *Salvia* secc. *Heterosphace* Benth; 2) las *Salvia* subg. *Audibertia* con ca. 19 especies distribuidas en la Alta y Baja Californias; y 3) las *Salvia* subg. *Calosphace* distribuidas del SO de EUA hacia América del Sur, incluyendo las Islas del Caribe con más de 550 especies (González-Gallegos *et al.*, 2020). Para los subgéneros *Audibertia* y *Calosphace*, Porter y colaboradores (com. pers.) están realizando los cambios nomenclaturales correspondientes a los géneros *Ramona* Raf. y *Lasemia* Raf. De manera que faltarían por redefinir nomenclaturalmente, unas 289 especies que salen del género *Salvia* s. s., manteniendo así, entidades monofiléticas, manejables y morfológicamente reconocibles.

Conclusiones

En vista de la convicción de los taxónomos por tener una clasificación natural y de la generación de más estudios filogenéticos, se prevé que sigan existiendo múltiples posturas y que continúe habiendo cierta resistencia de los usuarios, y hasta de algunos taxónomos, por adoptar y proponer nuevas circunscripciones taxonómicas; sin embargo, estos retos son inherentes al avance de la ciencia del siglo XX y XXI. Recordemos que Tournefort, por ejemplo, fue autor de muchos géneros pequeños y que mantuvo seguidores, entre los que destaca Rafinesque, (Frodin, 2004) autor de los géneros *Senegalia* y *Racosperma* (de las *Acacia*) (Figura 1), *Pleudia* (de las *Salvia*), entre otros.

Reconocer grupos monofiléticos incrementa la probabilidad de que se mantengan estables en la clasificación, puesto que la unión entre especies se basa en relaciones evolutivas, implica menos ambigüedad y mayor aceptación (Clayton, 1982; Humphreys y Linder, 2009). Dicho de otra forma, una clasificación artificial no transmite información sobre unidades evolutivas y puede resultar engañosa o confusa. En aquellos casos que aún no hay suficiente evidencia para proponer una reclasificación (cuando hay pocos estudios filogenéticos, o muestreos moleculares muy reducidos



o parciales), la comunidad sistemática ha optado por mantener géneros parafiléticos hasta obtener suficiente evidencia; sin embargo, la meta es reconocer grupos monofiléticos y reducir el riesgo de mantener clasificaciones poco predictivas e informativas (Schrire y Lews, 1996).

Es interesante que a pesar del aparente caos que generan los cambios nomenclaturales basados en evidencias filogenéticas, en realidad el impacto en la clasificación es positivo y redundante en un mayor orden; al menos así lo demuestran los casos de los géneros que se han redefinido a la fecha. Dicho de otra forma, no es tan alarmante como algunos temían. Por ejemplo, el impacto de adoptar nuevas circunscripciones para los 840 géneros registrados en la flora de Alemania, solo se refleja en 140 géneros documentados como no monofiléticos y en otros 20 géneros para los que se ha cuestionado su monofilia (Kadereit *et al.*, 2016). Evidentemente, el impacto de los cambios nomenclaturales será mayor para áreas de alta diversidad como México, aunque, por supuesto, no llegaría a implicar rehacer toda la clasificación botánica.

Ciertamente los usuarios no están obligados a seguir la nueva nomenclatura, aunque no es lo deseable. En los casos en los que hay fuerte resistencia al cambio, o cuando se trata de nombres científicos usados ampliamente como vernáculos, se les ha propuesto usar nombres informales incorporando comillas al epíteto. Por ejemplo, para *Erythranthe rhodopetra*, que no se llegó a publicar formalmente dentro del género *Mimulus*, se puede hacer referencia como *Mimulus* “rhodopetra” y para *Erythranthe arenicola* como *Mimulus* “arenicola” (Nesom *et al.*, 2019); sin embargo, lo mejor sería realizar las combinaciones pertinentes y reconocer a las especies nuevas en la nomenclatura aceptada.

Definitivamente, hay que tener paciencia respecto a la generación y aceptación de cambios nomenclaturales, ya que su incorporación suele ser paulatina. Conocer y contrastar diferentes sistemas nomenclaturales y considerar los supuestos en los que son soportados es muy útil, así como hacer mención de los nombres alternativos para familiarizarnos con ellos; de igual manera, no hay que dudar en acercarse a bases de datos confiables y de libre acceso cuando haya duda sobre algún nombre, por ejemplo,

<https://www.ipni.org>;

<https://www.tropicos.org/home>;

<https://powo.science.kew.org>.

Agradecimientos

A la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por el Proyecto 8.16 otorgado a la primera autora; a Victor W. Steinmann (V.W.S.), a Harald Pauli y al Proyecto Flora Alpina (PFA) por permitirnos el uso de sus fotografías; finalmente, agradecemos a los revisores por sus comentarios.

Bibliografía

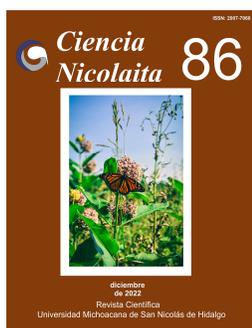
- Agnarsson, I. y Kuntner, M., 2007, Taxonomy in a changing world: seeking solutions for a science in crisis: *Systematic Biology*, 56(3), 531-539. ISSN 1063-5157 (print) 1076-836X (web).
<https://doi.org/10.1080/10635150701424546>
- Ahmed, S., Kapadia, Z. y Badar, Y., 1994, Antibacterial activity of *Salvia santolinifolia*: *Fitoterapia*, 65, 271-272.
- Ashour, M.A., Fatima, W., Imran, M., Ghoneim, M.M., Alshehri, S. y Shakeel, F., 2022, A Review on the Main Phytoconstituents, Traditional Uses, Inventions, and Patent Literature of Gum Arabic Emphasizing *Acacia seyal*: *Molecules*, 27(4), 1171-1190.
<https://doi.org/10.3390/molecules27041171>
- Barker, W.R., Nesom, G.L., Beardsley, P.M. y Fraga, N.S., 2012, A taxonomic conspectus of Phrymaceae: A narrowed circumscription for *Mimulus*, new and resurrected genera, and new names and combinations: *Phytoneuron*, 39, 1-60. ISSN 2153 733X (web).
- Beardsley, P.M. y Olmstead, R.G., 2002, Redefining Phrymaceae: the placement of *Mimulus*, tribe Mimuleae, and *Phryma*: *American Journal of Botany*, 89(7), 1093-1102. ISSN 1537-2195 (web).
<https://doi.org/10.3732/ajb.89.7.1093>
- Bentham, G. y Hooker, J.D., 1862-1883, *Genera Plantarum: London, U.K, A. Black*, 3 vols.
- Casselmann, I., Nock, C.J., Wohlmuth, H., Weatherby, R.P. y Heinrich, M., 2014, From local to global—Fifty years of research on *Salvia divinorum*: *Journal of ethnopharmacology*, 151(2), 768-783. ISSN 18727573.
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.11.032>
- Chase, M.A., Stankowski, S. y Streisfeld, M.A., 2017, Genomewide variation provides insight into evolutionary relationships in a monkeyflower species complex (*Mimulus* sect. *Diplacus*): *American Journal of Botany*,

- 104(10), 1510-1521. ISSN 1537-2195 (web).
<https://doi.org/10.3732/ajb.1700234>
- Chen, H., Chen, F., Zhang, Y.L. y Song, J.Y., 1999, Production of lithospermic acid B and rosmarinic acid in hairy root cultures of *Salvia miltiorrhiza*: *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 22, 133-138.
- Clayton, W.D., 1982, The genus concept in practice: *Kew Bulletin*, 38(2), 149-153,
<https://doi.org/10.2307/4108098>
- Clebsch, B., 2003, The new book of Salvias: sages for every garden: *Oregon, Timber press Portland*, 344 p. ISBN-13: 978-0-88192-913-3.
- Cuevas-Morales, C., Zavala-Ocampo, L.M., Miguel-Chávez, S., González-Trujano, M.E., Basurto-Peña, F.A., Muñoz-Ocotoero, V. y Aguirre-Hernández, E., 2022, Evaluación farmacológica de la actividad antinociceptiva y análisis fitoquímico de los extractos activos de *Salvia purpurea* Cav.: *Botanical Sciences*, 100(2), 383-396.
<https://doi.org/10.17129/botsci.3013>
- Ebach, M.C., Valdecasas, A.G. y Wheeler, Q.D., 2011, Impediments to taxonomy and users of taxonomy: accessibility and impact evaluation: *Cladistics*, 27(5), 550-557.
<https://doi.org/10.1111/j.1096-0031.2011.00348.x>
- Frodin, D.G., 2004, History and concepts of big plant genera: *Taxon*, 53, 753-776. ISSN 1996-8175 (web).
<https://doi.org/10.2307/4135449>
- Funk, V.A., 1985, Cladistics and generic concepts in the Compositae, *Taxon*, 34(1), 72-80. ISSN 1996-8175 (web). <https://doi.org/10.2307/1221566>
- González-Gallegos, J.G., Bedolla-García, B.Y., Cornejo-Tenorio, G., Fernández-Alonso, J.L., Fragoso-Martínez, I., García-Peña, M.D.R., Harley, R.M., Klitgaard, B., Martínez-Gordillo, M.J., Wood, J.R. y Zamudio, S., 2020, Richness and distribution of *Salvia* subg. *Calosphace* (Lamiaceae): *International Journal of Plant Sciences*, 181(8), 831-856. <https://doi.org/10.1086/709133>
- Grudmann, O., Phillips, S.M., Zadezensky, I. y Butterweck, V., 2007, *Salvia divinorum* and Salvinorin A: an update on pharmacology and analytical methodology: *Planta Medica*, 73, 1039-1046. <https://doi.org/10.1055/s-2007-981594>
- Guillén, M.D., Cabo, N. y Burillo, J., 1996, Characterization of the essential oils of some cultivated aromatic plants of industrial interest: *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 70, 359-363.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199603\)70:3<359::AID-JSFA512>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199603)70:3<359::AID-JSFA512>3.0.CO;2-0)
- Hennig, W., 1966, Phylogenetic systematics: *University of Illinois Press, Urbana*. ISBN 978-025-2068-140.
- Hussain, G. y Al Jaloud, A.A., 2011, Screening of Drought Resistant Range Plants for Controlling Desertification in Saudi Arabia: *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, 1, 326-333.
- Kadereit, J.W., Albach, D.C., Ehrendorfer, F., Galbany-Casals, M., García-Jacas, N., Gehrke, B., Kadereit, G., Kilian, N., Klein, J.T. Koch, M.A., Kropf, M., Oberprieler, C., Pirie, M.D., Ritz, C.M., Röser, M., Spalik, K., Sussanna, A., Wigend, M., Welk, E., Wesche, K., Zhang, L.B. y Dillenberger, M.S., 2016, Which changes are needed to render all genera of the German flora monophyletic?: *Willdenowia*, 46(1), 39-91.
<https://doi.org/10.3372/wi.46.46105>
- Kamatou, G.P.P., Makunga, N.P., Ramogola, W.P.N. y Viljoen, A.M., 2008, South African *Salvia* species: a review of biological activities and phytochemistry: *Journal of Ethnopharmacology*, 119, 664-672.
<https://doi.org/10.1016/j.jep.2008.06.030>
- Kull, C.A. y Rangan, H., 2012, Science, sentiment and territorial chauvinism in the *Acacia* name change debate: *Terra Australis*, 34.
- Kyalangalilwa, B., Boatwright, J.S., Daru, B.H., Maurin, O. y van der Bank, M., 2013, Phylogenetic position and revised classification of *Acacia* s.l. (Fabaceae: Mimosoideae) in Africa, including new combinations in *Vachellia* and *Senegalia*: *Botanical Journal of the Linnean Society*, 172(4), 500-523. <https://doi.org/10.1111/boj.12047>
- Kornet, D.J., 1988, Conventional and fundamental problems in the delimitation of general from a phylogenetic point of view: *Acta. Botánica Neerlandica*, 37(4), 527-529.
- Kuntner, M. y Agnarsson, I., 2006, Are the Linnean and phylogenetic nomenclatural systems combinable? Recommendations for biological nomenclature: *Systematic Biology*, 55(5), 774-784.
<https://doi.org/10.1080/10635150600981596>
- Lowry, D.B., Sobel, J.M., Angert, A.L., Ashman, T.L., Baker, R.L., Blackman, B.K., Brandvain, Y., Byers, K. J.R.P., Cooley, A.M., Coughlan, J.M., Dudash, M.R., Fenster, C.B., Ferris, K.G., Fishman, L., Friedman, J., Grossenbacher, D.L., Holeski, L.M., Ivey, C.T., Kay, K.M., Koelling, V.A., Kooyers, N.J., Murren, C.J., Muir, C.D., Nelson, T.C., Peterson, M., Puzey, J.R., Rotter, M.C., Seemann, J.R., Sexton, J.P., Sheth, S.M., Streisfeld, M.A., Sweigart, A.L., Twyford, A.D., Vallejo-Marín, M., Willis, J.H., Wright, K.M., Wu, C.A. y Yuan, Y.W., 2019, The case for



- the continued use of the genus name *Mimulus* for all monkeyflowers: *Taxon*, 68(4), 617-623. ISSN 1996-8175 (web). <https://doi.org/10.1002/tax.12122>
- Mabberley, D.J., 1997, The plant-book. A portable dictionary of the vascular plants: *Cambridge University Press*, 2a ed., 858 p. ISBN 0521414210.
- Malik, M.S., Rafique, M., Sattar, A. y Khan, S.A., 1987, The fatty acids of indigenous resources for possible industrial applications: Part XII. The fatty acids composition of the fixed oils of *Ocimum sanctum* and *Salvia aegyptica* seeds: *Pakistan Journal of Scientific And Industrial Research*, 30, 369-371.
- Martínez, M., 1994, Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas: *México, Fondo de Cultura Económica*, 1247 p. Moore, G., Smith, G.F., Figueiredo, E., Demissew, S., Lewis, G., Schrire, B., Rico, L. y van Wyk, A.E., 2010, *Acacia*, the 2011 Nomenclature Section in Melbourne, and beyond: *Taxon*, 59(4), 1188-1195. ISSN 1996-8175 (web). <https://doi.org/10.1002/tax.594017>
- Moore, G., Smith, G.F., Figueiredo, E., Demissew, S., Lewis, G., Schrire, B., Rico, L., van Wyk, E.E., Lucklow, M., Kiesling, R. y Sousa, S.M., 2011, The *Acacia* controversy resulting from minority rule at the Vienna Nomenclature Section: Much more than arcane arguments and complex technicalities: *Taxon*, 60(3), 852-857. ISSN 1996-8175 (web). <https://doi.org/10.1002/tax.603017>
- Nelson, T.C., Stathos, A.M., Vanderpool, D.D., Finseth, F.R., Yuan, Y.W. y Fishman, L., 2021, Ancient and recent introgression shape the evolutionary history of pollinator adaptation and speciation in a model monkeyflower radiation (*Mimulus* section *Erythranthe*): *PLoS Genetics*, 17(2), e1009095. <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1009095>
- Nesom, G.L., Fraga, N.S., Barker, W.R., Beardsley, P.M., Tank, D.C., Baldwin, B.G. y Olmstead, R.G., 2019, Response to “The case for the continued use of the genus name *Mimulus* for all monkeyflowers”: *Taxon*, 68(4), 624-627. ISSN 1996-8175 (web). <https://doi.org/10.1002/tax.12124>
- Olmstead, R.G., de Pamphilis, C.W., Wolfe, A.D., Young, N.D., Elisens, W.J. y Reeves, P.A., 2001, Disintegration of the Scrophulariaceae: *American Journal of Botany*, 88, 348-361. ISSN 1537-2195 (web). <https://doi.org/10.2307/2657024>
- Olmstead, R.G., 2002, Whatever happened to the Scrophulariaceae: *Fremontia*, 30(2), 13-22.
- Orchard, A.E. y Maslin, B.R., 2003, (1584) Proposal to conserve the name *Acacia* (Leguminosae: Mimosoideae) with a conserved type: *Taxon*, 52(2), 362-363. ISSN 1996-8175 (web).
- Pedley, L., 1986, Derivation and dispersal of *Acacia* (Leguminosae) with particular reference to Australia and the recognition of *Senegalia* and *Racosperma*: *Botanical Journal of the Linnean Society*, 92, 219-254. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1986.tb01429.x>
- Qureshi, I.H., Ahmed S. y Kapadia. Z., 1989, Antimicrobial activity of *Salvia splendens*: *Pakistan Journal Of Scientific And Industrial Research*, 32, 597-599.
- Ramírez Ibarra, J.G., 2012, Estudio y traducción de la obra *Novarum Vegetabilium Descriptiones* (1824-1825), de Juan José Martínez de Lejarza y Pablo de la Llave: *México, Instituto de Investigaciones Históricas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 339 p.
- Schrire, B.D. y Lewis, G.P., 1996, “Monophyly: a criterion for generic delimitation, with special reference to Leguminosae”, *The biodiversity of African plants*: Springer, Dordrecht, pp. 353-370. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0285-5_48
- Soltis, D.E., Albert, V.A., Savolainen, V., Hilu, K., Qiu, Y-L., Chase, M.W., Farris, J.S., Stefanović, S., Rice, D.W., Palmer, J.D., Soltis, P.S. y Less, S., 2004, Genome-scale data, angiosperm relationships, and ‘ending incongruence’: a cautionary tale in phylogenetics: *Trends Plant Sciences*, 9, 477-483. <https://doi.org/10.1016/j.tplansci.2004.08.008>
- Tamayo-Cen, I., Torke B.M., López Contreras, J.E., Carnevali Fernández-Concha, G., Ramírez Morillo, I., Can Itza, L.L. y Duno de Stefano, R., 2022, Revisiting the phylogeny and taxonomy of the *Pithecellobium* clade (Leguminosae, Caesalpinioideae) with new generic circumscriptions: *PhytoKeys*, 205, 279-298. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.205.82728>
- Turland, N.J., Wiersema, J.H., Barrie, F.R., Greuter, W., Hawksworth, D.L., Herendeen, P.S., Knapp, S., Kusber, W.H., Li, D.Z., Marhold, K., May, T.W., McNeill, J., Monro, A.M., Prado, J., Price, M.J. y Smith, G.F. (eds.), 2018, International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code) adopted by the Nineteenth International Botanical Congress Shenzhen, China, July 2017. *Regnum Vegetabile* 159. Glashütten: Koeltz Botanical Books. <https://doi.org/10.12705/Code.2018>

- Villaseñor, J.L., 2015, ¿La crisis de la biodiversidad es la crisis de la taxonomía?: *Botanical Sciences*, 93(1), 03-14. <https://doi.org/10.17129/botsoci.456>
- Ward, P.S. y Branstetter, M.G., 2017, The acacia ants revisited: convergent evolution and biogeographic context in an iconic ant/plant mutualism: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1850), 20162569. <https://doi.org/10.1098/rspb.2016.2569>
- Will, M. y Claßen-Bockhoff, R., 2017, Time to split *Salvia sl* (Lamiaceae)—new insights from Old World *Salvia* phylogeny: *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 109, 33-58. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2016.12.041>
- Will, M., Schmalz, N. y Claßen-Bockhoff, R., 2015, Towards a new classification of *Salvia sl*:(re) establishing the genus *Pleudia* Raf.: *Turkish Journal of Botany*, 39(4), 693-707. <https://doi.org/10.3906/bot-1405-34>
- Yagi, A., Fujimoto, K., Tanonaka, K., Hirai, K. y Takeo, S., 1989, Possible active components of Tan-Shen (*Salvia miltiorrhiza*) for protection of the myocardium against ischemia-induced derangements: *Planta Medica*, 55, 51-54. <https://doi.org/10.1055/s-2006-961824>



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis espacial del riesgo de inundación a través de Sistemas de Información Geográfica: Caso sector Hacienda-Margarita, Puebla

Spatial analysis of flood risk through Geographic Information Systems: Case of the Hacienda-Margarita sector, Puebla

Eduardo Jerjes Molina-Blancas, Stephanie Scherezada Salgado-Montes*,
María Lourdes Guevara-Romero

Para citar este artículo: Eduardo Jerjes Molina-Blancas, Stephanie Scherezada Salgado-Montes*, María Lourdes Guevara-Romero, 2022. Análisis espacial del riesgo de inundación a través de Sistemas de Información Geográfica: Caso sector Hacienda-Margarita, Puebla. Ciencia Nicolaita no. 86, 97-110. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.629>



Historial del artículo:

Recibido: 21 de abril de 2022

Aceptado: 30 de septiembre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: stephanie.salgado@correo.buap.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Análisis espacial del riesgo de inundación a través de Sistemas de Información Geográfica: Caso sector Hacienda-Margarita, Puebla

Spatial analysis of flood risk through Geographic Information Systems: Case of the Hacienda-Margarita sector, Puebla

Eduardo Jerjes Molina-Blancas¹, Stephanie Scherezada Salgado-Montes^{2*}, María Lourdes Guevara-Romero²

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Arquitectura, Maestría en Ordenamiento Territorial.

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Arquitectura.

Resumen

La investigación presenta el análisis espacial, a través del uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), de las condiciones naturales y urbanas que generan el riesgo de inundación que afecta el sector Hacienda-Margarita en la ciudad de Puebla. El objetivo es explicar las condiciones de riesgo de inundación mediante el análisis comparativo, el modelado del territorio y la simulación hidrológica, bajo el sustento de la construcción social del riesgo. El análisis demuestra las diferencias del impacto de las inundaciones en cada uno de estos asentamientos urbanos con base en la estructura urbana, la topografía y la dinámica hídrica. Las conclusiones plantean la potencialidad de los SIG para determinar niveles de riesgo y vulnerabilidad precisos que sirvan para la prevención y la mitigación del riesgo.

Palabras clave: Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis espacial, simulación hidrológica, riesgo de inundación, asentamientos urbanos

Abstract

This research exposes the spatial analysis carry out by Geographic Information Systems (GIS) of natural and urban conditions of the flood risk in the Hacienda-Margarita sector in Puebla city. It aims to explain the flood risk through the comparative analysis, modeling of the territory and hydrological simulation, supporting by the social construction of risk theory. The analysis show that urban structure, topography, and hydrological dynamic set the differences of the negative impacts of urban flooding in each of these urban settlements. The conclusions raise the potential of GIS for detailed analysis to set the levels of risk and vulnerability to prevent and mitigate the flood risk in urban settlements.

Keywords: Geographic Information Systems (GIS), spatial analysis, hydrological simulation, flood risk, urban settlements

Introducción

En el estudio de riesgos de desastre se considera que los procesos de urbanización y la transformación de los bienes y fenómenos naturales, generan condiciones de vulnerabilidad física y social (Beck, 1998; O'Keefe *et al.*, 1976). Se ha estimado el aumento de los desastres a nivel mundial desde la década de los 40, así como la diferencia de los impactos en pérdidas de vida, de bienes y económicas (Marskey, 2011; O'Keefe *et al.*, 1976). El riesgo de desastre es consecuencia de la urbanización difusa y de la degradación ambiental (Narvaéz *et al.*, 2020), de la inadecuada utilización y modificación del territorio (Lungo, 2001), y de la segregación socioespacial e injusticia en la distribución de los recursos (Ríos, 2020). La modalidad de la urbanización, cualquiera que sea, implica una relación entre la sociedad y el territorio que genera riesgos de distinta índole y grado; no obstante, hay modos y umbrales de urbanización que provocan más riesgos y de diferente carácter que otros (Lungo, 2001).

Las investigaciones en materia de riesgos de desastre promueven métodos de análisis y una revisión crítica de los procesos de urbanización (Gellert-de-Pinto, 2012), de planeación urbana y gestión de riesgos (Ríos, 2020), de participación social y con enfoque local (Marskey, 2011; Mojtahedi y Oo, 2016). Se resalta la atención al riesgo de desastres como prioritaria, impulsada en la agenda internacional a través de organizaciones como la Oficina de las Naciones Unidas para Reducción de Riesgo de Desastres con enfoque en la prevención, mitigación, resiliencia ante el riesgo y la adaptación de asentamientos humanos. El Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastre (UNDRR, 2015), plantea la necesidad de mejorar el entendimiento de los riesgos de desastre en todas sus dimensiones de exposición, vulnerabilidad y peligro; fortalecer las instituciones, la cooperación global de los actores involucrados, la capacidad para la gestión de riesgos de desastre, la movilización de inversiones para infraestructura resiliente y evitar la generación de nuevos riesgos; y contar con políticas, programas y financiamiento para atender el riesgo de desastre.

En el caso de México, la política de la Gestión Integral del Riesgo plantea acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, desde un enfoque multifactorial y como un proceso en permanente construcción que

debe atenderse mediante políticas públicas, estrategias y procedimientos integrados desde el nivel federal hasta el municipal (Gobierno federal, 2021). Sin embargo, desde la década de los 80 se han presentado 64 desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos que han ocasionado la muerte de 2 015 personas y han afectado a otras 4 438 268 (Salgado-Montes, 2020), esto como resultado de las debilidades institucionales que incentivan la construcción de asentamientos humanos en cuencas lacustres o zonas potencialmente inundables, lo mismo que la urbanización y el constreñimiento de las riberas, los taludes y las barrancas de los cauces de los ríos (Flores-Lucero *et al.*, 2016). En el caso del municipio de Puebla, 460 (50 %) de los asentamientos urbanos presentan riesgo de inundación; se identifican periodos de retorno de 3.6 años (Ramírez, 2017). Es importante mencionar que en el Atlas de Riesgos Naturales no se aborda el análisis de riesgo desde un enfoque sistémico, ni multifactorial, a la vez que no cuenta con una actualización desde hace diez años, por lo que es necesario generar información precisa y actualizada del riesgo.

Los SIG para el análisis de riesgos de desastre

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son tecnologías que incluyen conocimientos científicos de la geografía. Además de la ciencia aplicada, también emplean la experiencia y la idoneidad adquiridas para la resolución de problemas en materia de planeación urbana y de ordenamiento territorial (Principi y Buzai, 2021; Baxendale, 2015). El enfoque sistémico y multidisciplinario (García, 2006) de los SIG para el análisis espacial mediante el tratamiento y estudio descriptivo y exploratorio de datos geoespaciales, así como la aplicación de estadística y el modelado espacial, permiten plantear diferentes escenarios útiles para la toma de decisiones (Buzai *et al.*, 2015). En el caso del análisis de riesgos de inundación, se identifican los factores que inducen y generan el riesgo con base en las condiciones urbanas y las corrientes de agua, información que se procesa a través de capas temáticas en formatos geoespaciales (Chen, 2022). Por otra parte, las simulaciones hidrológicas y modelos digitales de elevación, permiten optimizar el cálculo de escenarios y la comparación de resultados más precisos para representar flujos y acumulación de agua (Jafarzadegan

y Merwade, 2017). En este sentido, los programas informáticos como HEC-RAS 5 de simulación hidrológica de corrientes (Moya-Quiroga *et al.*, 2016), QGIS o ArcGIS, posibilitan el análisis de la extensión de las inundaciones, los flujos de agua y la formación de socavones mediante la superposición de capas de inundación calculadas a partir de modelos matemáticos (Schubert y Sanders, 2012). Además, para el análisis se aplican las condiciones de vulnerabilidad mediante la relación de las variables físicas y sociales en asentamientos urbanos (Dou *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2017).

En este contexto, el propósito del presente estudio es explicar las condiciones de riesgo de inundación del sector conformado por los asentamientos urbanos La Hacienda y La Margarita en el municipio de Puebla, mediante el análisis comparativo, el modelado del territorio y la simulación hidrológica, bajo el sustento de la construcción social del riesgo a través de los SIG.

Materiales y métodos

La teoría de la construcción social del riesgo (Beck, 1998) permitió considerar la dinámica del sistema hidrológico y los procesos de urbanización que inciden en la generación del riesgo de inundación, así como la vulnerabilidad física y social en asentamientos urbanos (Lungo, 2001). Para llevar a cabo este estudio, se realizaron tres recorridos de campo en las vialidades paralelas al río Alseseca en la zona de riesgo de inundación para georreferenciar datos y realizar levantamientos fotográficos de la ribera y del cauce del río, así como de las construcciones e infraestructura de los asentamientos urbanos La Hacienda y La Margarita; asimismo, se procesaron datos estadísticos y geoespaciales mediante el análisis espacial con SIG.

En el programa QGIS 3.14,¹ se procesó el Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR (MDE) con una resolución espacial de 1.5 m para calcular las curvas de nivel a 1 m de altitud y las pendientes del terreno (INEGI, 2012). Por otra parte, en el programa HEC-RAS 5.0.3,² se realizó la simulación hidrológica (generación informática del comportamiento del agua

en un cauce) con base en el MDE, mientras que la rugosidad del terreno se llevó a cabo con referencia en el coeficiente de Manning, considerando variables de distintos gastos³ de agua. Los resultados muestran el comportamiento de los flujos en el cauce con base en períodos de retorno de hasta 100 años (SEDESOL, 2012) para sustentar los diferentes escenarios de inundación. Asimismo, se aplicó la superposición e intersección de capas vectoriales con imágenes satelitales con resolución espacial de 10 cm, obtenidas del programa Universal Maps Downloader para calcular cortes transversales y puntos de conflicto. También se procesaron las corrientes de agua en formato vectorial con escala 1: 50 000 (INEGI, 2010) y las manzanas con escala 1: 20 000 (INEGI, 2010) para definir las zonas de riesgo de inundación. Posteriormente, se asociaron los datos estadísticos del Censo de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2020) a las manzanas y se georreferenciaron equipamientos mediante la técnica de fotointerpretación para identificar a la población, las viviendas, las vialidades y los equipamientos vulnerables. Finalmente, se elaboraron mapas de riesgo en escala 1:12,000 para mostrar los resultados del análisis.

Riesgo de inundación en el sector Hacienda-Margarita

El asentamiento urbano denominado colonia La Hacienda, construido a finales de la década de los 60, colinda al este con la Unidad Habitacional La Margarita, construida en la década de los 80; ambos se ubican en el suroriente de la ciudad de Puebla, en uno de los puntos de drenaje de la subcuenca hidrológica río Alseseca. La forma y estructura urbana de los dos asentamientos, aunque independientes, responden al eje del río y a las fuertes pendientes del terreno (Figura 1). El proceso de antropización de este sector, se

¹ QGIS 3.14 se refiere a las iniciales de Quantum GIS, un sistema de información geográfica de licencia libre, desarrollado por Fundación OSGeo.

² HEC-RAS (acrónimo de Hydrologic Engineering Center and River Analysis System) es un sistema informático de modelación de la hidráulica de flujo de aguas en ríos naturales y

otros canales; fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la Armada de los Estados Unidos de América.

³ Relación entre el volumen del líquido que fluye por un conducto y el tiempo que tarda en fluir.

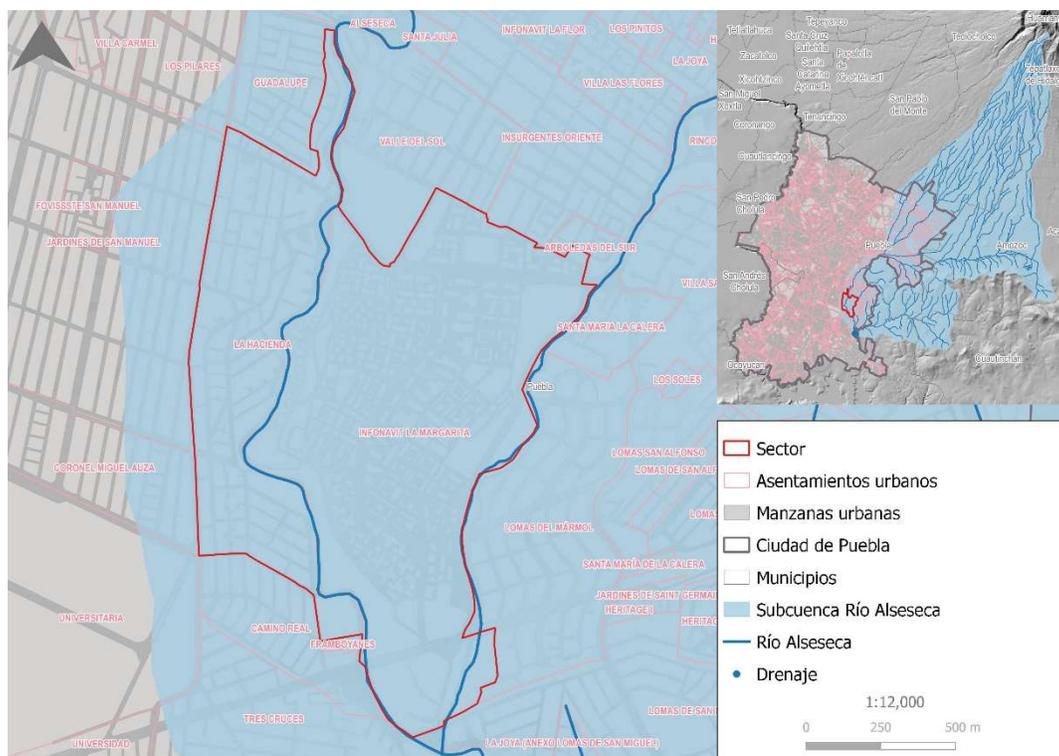


Figura 1. Localización del área de estudio. Fuente: Marco Geoestadístico, INEGI, 2019; Información vectorial de localidades ameznadas y números exteriores, INEGI, 2010; Región hidrológica 18 Río Balsas, SIATL, 2010.

caracterizó por la permisividad de las autoridades gubernamentales para la construcción de viviendas, infraestructura y equipamientos urbanos sobre el terraplén natural del río, para lo cual, fue necesario el estreñimiento y revestimiento de concreto de los taludes del cauce (Salgado-Montes, Flores-Lucero y Guevara-Romero, 2019).

El sector presenta inundaciones pluviales y fluviales desde la década de los 70, con periodos aproximados de retorno de 3.6 años (Ramírez, 2017), lo que causa situaciones de emergencia, pérdida de bienes, afectaciones a inmuebles y evacuación de la población, principalmente en la colonia La Hacienda (Salgado-Montes, Flores-Lucero y Guevara-Romero, 2019). En 2012, con la publicación del *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puebla* (SEDESOL, 2012), se determinó que el sector constituye una zona de riesgo de inundación. Este instrumento y la base de datos vectorial y *raster*, se encuentra en el Sistema de Información Geográfica del Atlas Nacional de Riesgos del Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED, 2021); sin embargo, presenta una metodología y datos que no explican la relación causal entre el proceso de urbanización y las modificaciones del

entorno natural que generaron el riesgo, ni las condiciones de vulnerabilidad.

En este sentido, la importancia del presente estudio consiste en la identificación de riesgo y vulnerabilidad en el sector Hacienda-Margarita en el que existen 27 641 habitantes, 13 728 viviendas, tres equipamientos educativos, un equipamiento religioso y cuatro espacios públicos que incluyen parques y jardines.

Simulación hidrológica

El sector se ubica, como ya se mencionó, en uno de los puntos de drenaje de la subcuenca del río Alsesecá, por lo que recibe los flujos de las corrientes perennes e intermitentes del sistema hidrológico del volcán Malinche y de las lluvias atípicas que se presentan entre los meses de abril y julio en la ciudad de Puebla (Salgado-Montes, 2020), lo que genera gastos de hasta 458 m³/s y la acumulación de agua en algunas zonas (SEDESOL, 2012).

Aplicando la herramienta *cross section* del programa HEC-RAS 5.0.3, se calcularon 44 cortes transversales en el cauce del río con una distancia promedio de 50 m y a una menor distancia en los sitios en los que se detectaron áreas de mayor ocurrencia de



Figura 2. Cortes transversales modelado en el área de estudio. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012; Imagen satelital con resolución espacial de 10 cm, Universal Maps Downloader.

inundaciones (Figura 2). Por otro lado, se calcularon las curvas de nivel cada 1 m con base en el MDE con el programa QGIS 3.14 para comparar las altitudes de cada asentamiento y determinar cómo esto incide en el riesgo de inundación.

El resultado del modelado del sector fue la identificación de tres puntos conflictivos con mayor probabilidad de inundación debido a la poca diferencia de altitud entre las construcciones y el cauce, lo que provoca que el río Alseseca se desborde ante el aumento del volumen y la aceleración de los flujos de agua por

el revestimiento de concreto de los taludes y el colapso de la red de drenaje y alcantarillado. El primer punto se encuentra entre los cortes 8 y 9: en el corte 8 La Hacienda se encuentra a 2 116.5 m con una diferencia de 4.5 m respecto al cauce. En contraste, en La Margarita, las primeras construcciones se encuentran a una altitud de 2,125 m s. n. m., con una diferencia de 14 m.

Por otra parte, la técnica *overlay mapping* se aplicó para sobreponer las capas vectoriales correspondientes a las curvas de nivel a cada 1 m, el eje del río Alse-

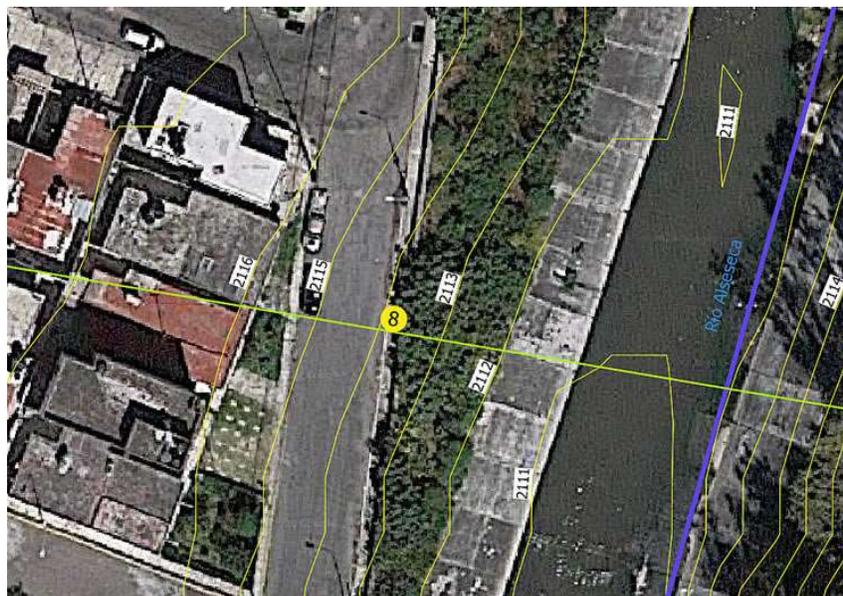


Figura 3. Curvas de nivel en el corte 8 de La Hacienda. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012; Imagen satelital con resolución espacial de 10 cm, Universal Maps Downloader.



Figura 4. Curvas de nivel en el corte 8 de La Margarita. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012; Imagen satelital con resolución espacial de 10 cm, Universal Maps Downloader.

seca y los cortes transversales 8 y 9, así como una imagen satelital del terreno que permitió identificar que en el corte 8 las construcciones en La Hacienda tienen mayor probabilidad de inundación, principalmente aquellas que se encuentran en los 2 114 m, con una diferencia de 3 m y separadas por un área verde de 9 m (Figuras 3 y 4). En contraste, en La Margarita, las construcciones se encuentran a una altitud de 2 123

m con una diferencia de 12 m respecto al cauce y a una distancia de 30 m con respecto al lecho del río, separadas por un área provista de vegetación y con una pendiente escarpada en el talud (Figuras 5 y 6).

El siguiente punto conflictivo se identifica en los cortes transversales 21 y 22 en el punto final del revestimiento de concreto, donde se ubica la Escuela

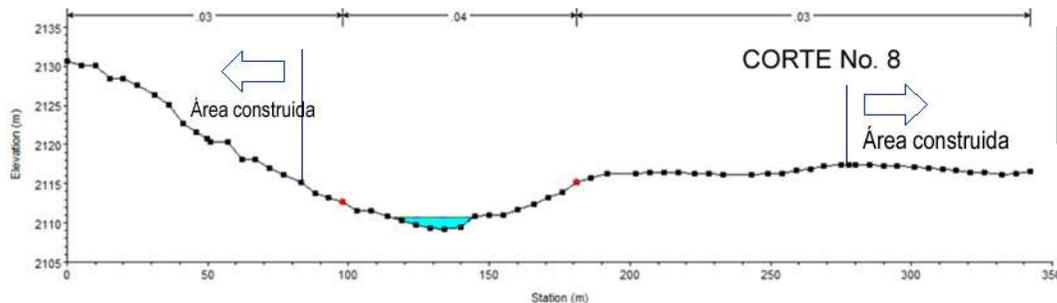


Figura 5. Perfil del corte transversal 8. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012.

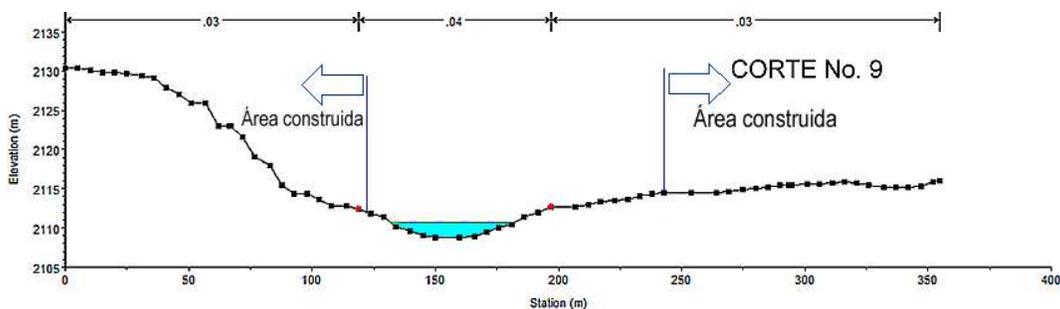


Figura 6. Perfil del corte transversal 9. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012.



Figura 7. Curvas de nivel del corte transversal 22. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012; Imagen satelital con resolución espacial de 10 cm, Universal Maps Downloader.

Primaria Hacienda de Guelatao de la colonia La Hacienda y la Escuela Secundaria Técnica No. 42 de la Unidad Habitacional La Margarita, respectivamente (Figura 7). El corte transversal 22 muestra que La Hacienda se encuentra a 2 117 m, con una diferencia de 8 m de altitud sobre el lecho del río, mientras que la secundaria se encuentra a 2 110 m con un metro de diferencia respecto al lecho (Figura 8), lo que significa que es la construcción con mayor probabilidad de riesgo de inundación.

El tercer punto conflictivo se encuentra en el corte 35 en la colonia La Hacienda a 2 111 m, en el que se identificó el menor desnivel, con una diferencia de 3 m respecto a la altura promedio del flujo del río (Figura 9). Se observa que, a pesar de que existe un área de vegetación entre la vialidad y el río, la altitud es

menor, por lo tanto, este es un punto de potencial aumento de los volúmenes de agua. En contraste, las construcciones de La Margarita se encuentran a una altitud de 2 124.6 m, con una diferencia de 13.6 m con respecto al flujo del agua, a la vez que el terraplén entre el cauce y las construcciones, está ocupado por un área de vegetación de 18 m (Figuras 10 y 11).

El procesamiento del MDE permite evidenciar, con base en los datos de altitud del relieve, que existen tres puntos de conflicto que presentan una mayor probabilidad de inundación debido a que las altitudes de las construcciones son menores con respecto al lecho del río Alseseca. Asimismo, se identificó que en el punto donde termina el revestimiento de concreto, existe una curva que genera turbulencia⁴ del flujo y la acumulación de residuos sólidos. Esto significa que, al

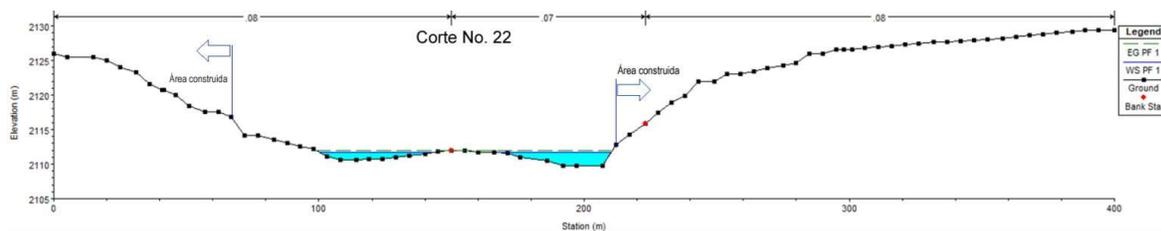


Figura 8. Perfil del corte transversal 22. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012.

⁴ En términos de la dinámica de fluidos, turbulencia o [flujo turbulento](#) es un régimen de flujo caracterizado por baja difusión de momento, alta convección y cambios espacio-temporales rápidos de [presión](#) y [velocidad](#).



Figura 9. Curvas de nivel del corte transversal 35 de La Hacienda. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012; Imagen satelital con resolución espacial de 10 cm, Universal Maps Downloader.

crecer el caudal del río (los volúmenes y el nivel del agua), los desbordamientos pueden ocasionar que las construcciones sean afectadas por la inundación de aguas contaminadas. Para corroborar estas afirmaciones, se realizaron análisis complementarios aprovechando los algoritmos disponibles en el programa QGIS 3.14, los cuales se detallan a continuación.

Análisis del terreno

El cálculo de altitudes se realizó mediante un modelo *raster* en pseudocolor que se generó a partir del

MDE, en el que los píxeles que representan los puntos de menor altitud aparecen en tonos opacos de color rojo y varían hacia tonos brillantes al aumentar la altitud, mientras que el rango oscila entre 2 101 m y 2 146 m. Se identificó, con base en este modelo, que La Hacienda cuenta con áreas de menor altitud (más extensas en comparación con La Margarita), las cuales oscilan entre 2 106 m y 2 116 m (Figura 12).

La superposición de capas vectoriales correspondiente a las manzanas y equipamientos urbanos, así como la capa *raster* correspondiente a las altitudes, se



Figura 10. Curvas de nivel del corte transversal 35 de La Margarita. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012; Imagen satelital con resolución espacial de 10 cm, Universal Maps Downloader.

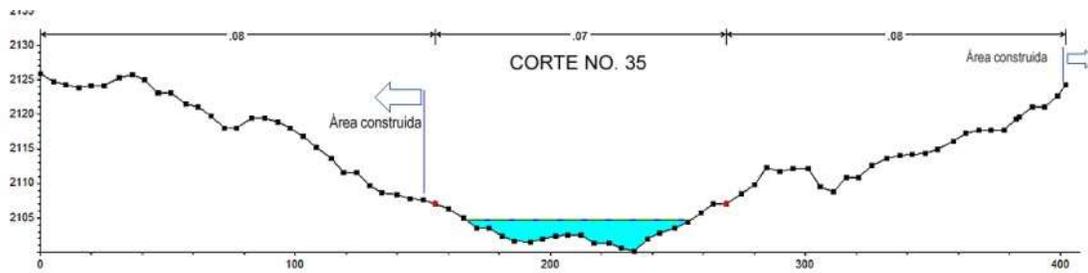


Figura 11. Perfil del corte transversal 35. Fuente: Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012.

desplegaron para identificar las manzanas urbanas expuestas a las inundaciones. En este caso, la colonia La Hacienda presenta un área con una extensión aproximada de 259 360 m², construida a una menor diferencia de altitud respecto al lecho del río; por otro lado, la Unidad Habitacional La Margarita presenta una extensión aproximada de 138 654 m².

En el modelo de pendientes se calcularon rangos de valores de 0 a 35 grados de inclinación a partir del MDE. En este sentido, en el sector se identifican pendientes escarpadas que oscilan entre 33 y 35 grados en la Unidad Habitacional La Margarita, en contraste, la colonia La Hacienda presenta una pendiente de 16 grados respecto al cauce del río, lo que demuestra que esta última se construyó en un terraplén horizontal

que aumenta las probabilidades de acumulación de los flujos de agua pluviales y fluviales.

Zonificación del riesgo

En el programa QGIS 3.14 y HEC-RAS 5.0.3 se procesaron el MDE y los gastos históricos registrados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (SEDESOL, 2012), a partir de los cuales se obtuvieron tres polígonos que definen zonas de los niveles de riesgo de inundación. Para determinar los alcances máximos del flujo de agua se consideraron como parámetros el gasto de agua de 174 m³/s que corresponde a un nivel alto de riesgo, el gasto de 350 m³/s que corresponde a un nivel medio de riesgo y el gasto de 458 m³/s para un nivel bajo de riesgo (Figura 13).

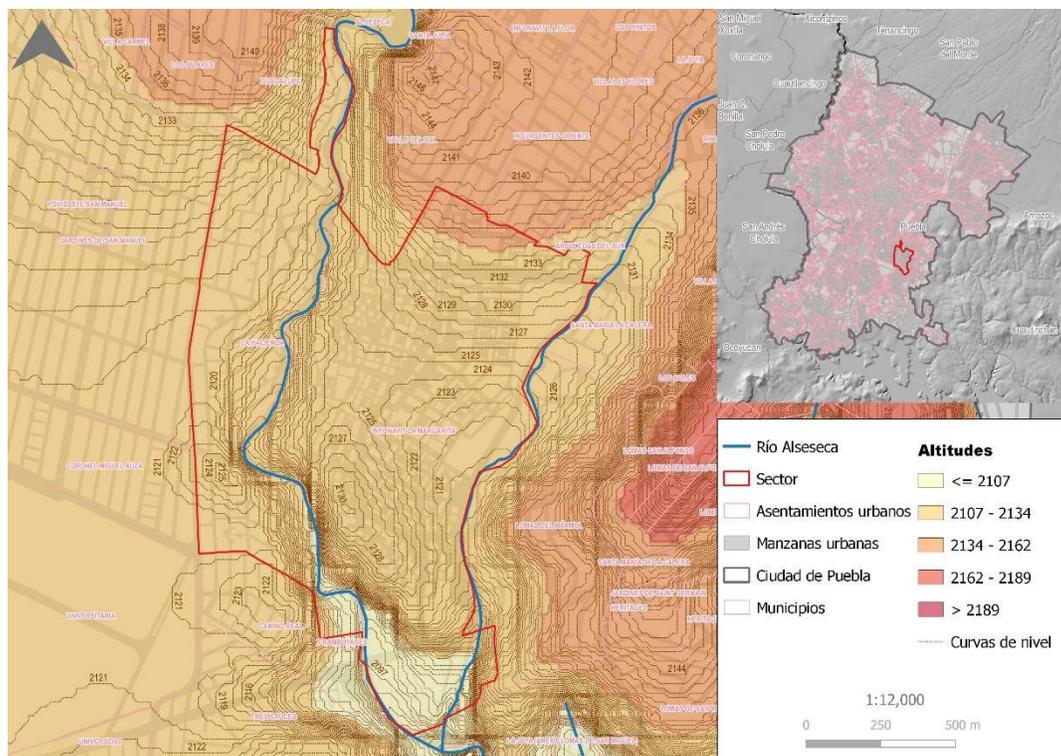


Figura 12. Modelo Digital de Elevación. Fuente: Marco Geoestadístico, INEGI, 2019; Información vectorial de localidades amanzanadas y números exteriores, INEGI, 2010; Modelo Digital de Elevación de Alta Resolución LiDAR, INEGI, 2012.

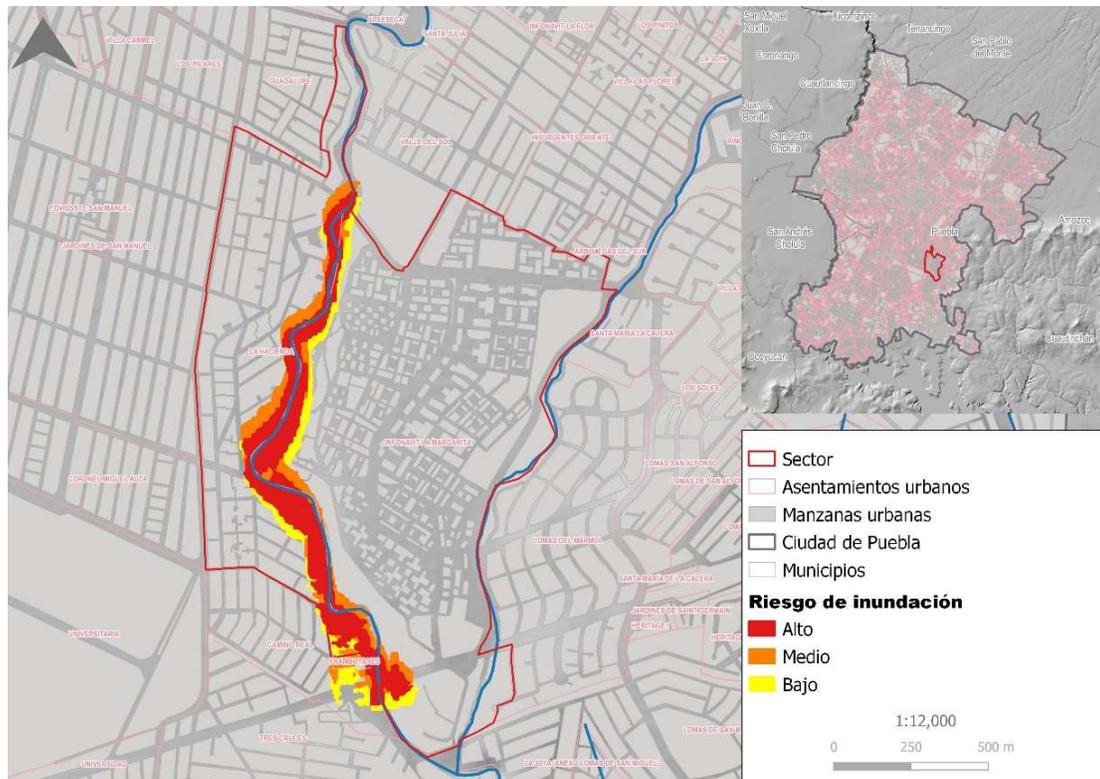


Figura 13. Mapa de riesgo de inundación. Fuente: Marco Geoestadístico, INEGI, 2019; Información vectorial de localidades ameznadas y números exteriores, INEGI, 2010; Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puebla, SEDSOL, 2012.

La vulnerabilidad física y social se identificó mediante la técnica *overlay mapping*, con base en los polígonos de las zonas de riesgo de inundación, las manzanas, los servicios urbanos y las construcciones (Instituto Registral y Catastral del Estado de Puebla, 2020). Los resultados muestran que hay 2 055 habitantes, 482 viviendas en 23 manzanas, 29 vialidades y cuatro equipamientos vulnerables, estos últimos, correspondientes a la Escuela Secundaria Técnica No. 42 ubicada en la calle 32 sur en La Margarita, la Escuela Primaria Hacienda de Guelatao ubicada en la calle Hacienda Vista Hermosa, la Escuela Secundaria No 3 “Aarón Merino Fernández” ubicada en la avenida San Claudio y la parroquia de San José La Hacienda ubicada en la calle de Coatepec, estos últimos situados en La Hacienda (Figura 14). Además de corroborar los resultados por medio de los recorridos de campo, se identificó que en estos puntos existen muros perimetrales de ladrillos que se colocaron debido a las situaciones de emergencia en los que se han afectado los bienes inmuebles y muebles.

Conclusiones

La investigación da cuenta del riesgo de inundación del sector definido por la colonia La Hacienda y la Unidad Habitacional La Margarita, situación generada por el proceso de urbanización que implicó la excesiva modificación del cauce del río Alseseca mediante el estreñimiento del cauce y el revestimiento de concreto de los taludes, la baja regulación de la utilización del terreno y las carencias en los instrumentos de riesgo de desastre, escenario que coloca en condición de vulnerabilidad a la población y sus bienes. Asimismo, el propósito del estudio fue explicar los factores que inciden en el riesgo mediante el procesamiento de datos estadísticos y geográficos, bajo el sustento de la construcción social del riesgo con enfoque sistémico y multifactorial (Beck, 1998; Merlinsky y Tobías, 2016).

El procesamiento de datos del sector Hacienda-Margarita, correspondientes a las corrientes y gastos de agua, las altitudes, las pendientes y la rugosidad del terreno, permitieron definir los niveles de riesgo de

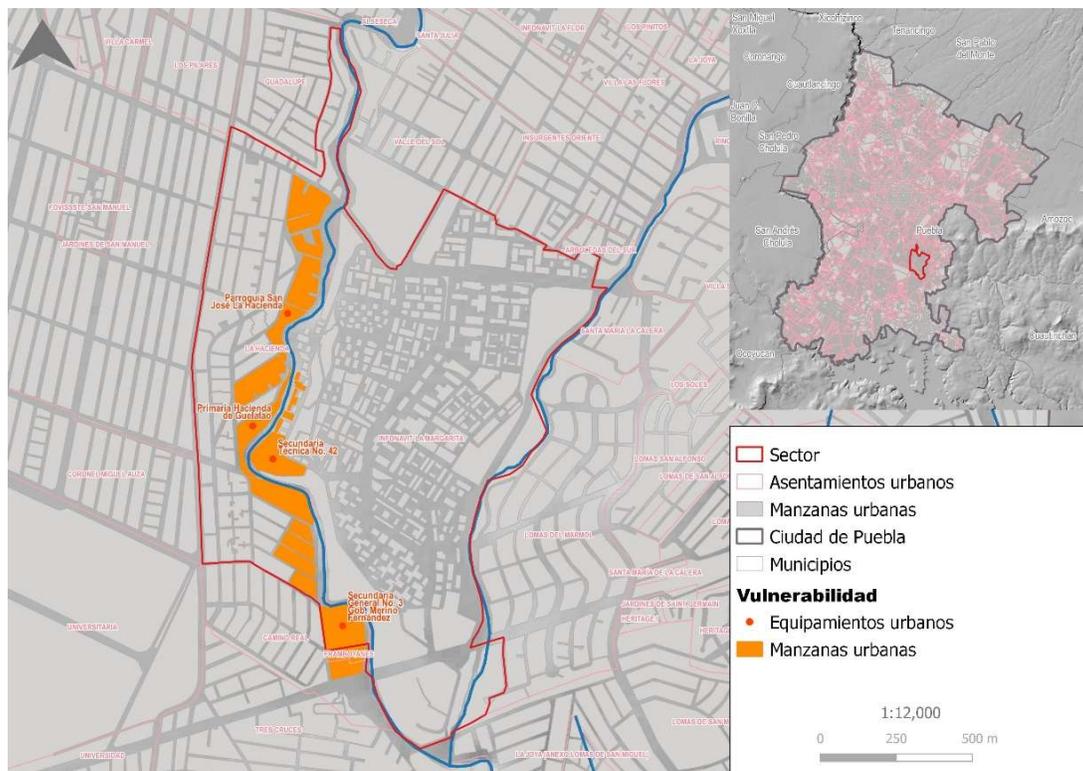


Figura 14. Mapa de vulnerabilidad. Fuente: Marco Geoestadístico, INEGI, 2019; Información vectorial de localidades ameznadas y números exteriores, INEGI, 2010.

inundación; además, los datos de las viviendas y equipamientos, las vialidades y las manzanas de ambos asentamientos urbanos, posibilitaron determinar las condiciones de vulnerabilidad. El análisis comparativo del sector evidencia que, aunque en los dos asentamientos urbanos existe riesgo y vulnerabilidad como consecuencia de la forma urbana, la topografía y la dinámica hídrica, cada asentamiento presenta diferencias en el nivel riesgo de inundación.

La importancia de los resultados que arrojó esta investigación, radica en el hecho de que pueden ser utilizados para la toma de decisiones en materia de planificación urbana y gestión de riesgos de desastres, con el objetivo de plantear estrategias precisas bajo el enfoque de la prevención, la mitigación y la resiliencia ante los riesgos de inundación, pero también, para la adaptación de los asentamientos urbanos y así reducir las rupturas con el medio natural.

Referencias

Baxendale, C., 2015, "Geografía, ordenamiento territorial y Sistemas de Información Geográfica. Articulaciones conceptuales para aplicaciones en la planificación y

gestión territorial", in M. Miraglia y N. B. Caloni, *Sistemas de Información Geográfica en la investigación científica actual*, Buenos Aires, Universidad Nacional de General Sarmiento.

Beck, U., 1998, "La lógica del reparto de la riqueza y del reparto de los riesgos", in U. Beck, *La sociedad del riesgo*, Barcelona, Paidós, pp. 1-80.

Buzai, G., Baxendale, C., Lanzelotti, S., Acuña, G., Humacata, L., and Principi, N., 2015, Análisis espacial y evaluación de zonas de potenciales conflictos ambientales, productivos y patrimoniales ante la expansión urbana en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina): *Anuario de la División Geografía*, ISSN: 1851-7897.

CENAPRED, "Atlas Nacional de Riesgos. Recuperado", <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/atlas.html> [consultado el 2021]

Chen, Y., 2022, Flood hazard zone mapping incorporating geographic information system (GIS) and multi-criteria analysis (MCA) techniques: *Journal of Hydrology*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128268>

Dou, X., Song, J., Whang, L., Tang, B., Xu, S., Kong, F., and Jiang, X., 2018, Flood risk assessment and mapping based on a modified multiparameter flood hazard index

- model in the Guanzhong Urban Area, China: *Stoch Environ Res Risk Assess*, 1131-1146. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1429-5>
- Flores-Lucero, M. L., Ramírez-Flores, J. M. y Milián-Ávila, G. M., 2016, Gestión colaborativa para disminuir el riesgo de inundación en el municipio de Puebla, *Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo*, Universitat Politècnica de Catalunya, BarcelonaTech, Barcelona-Balneário Camboriú. DOI:10.5821/siui.6287
- García, R., 2006, "Conceptos básicos para el estudio de sistemas complejos", in R. García, *Sistemas Complejos. Conceptos, método y fundamentación epistemológica de la investigación interdisciplinaria*, Barcelona, España, Gedisa, pp. 39-71.
- Gellert-de-Pinto, G.I., 2012, El cambio de paradigma: de la atención de desastres a la gestión del riesgo: *Boletín Científico Sapiens Research*, 2, 13-17. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3841348>
- Gobierno federal, 2021, "Ley General de Protección Civil. Ciudad de México", <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpc.htm> [consultado en 2021].
- INEGI, "Hidrografía", <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/#Descargas>
- INEGI, "Información vectorial de localidades ameznadas y números exteriores", <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?t=071000000000000&tg=3604>
- INEGI, "Modelo de Elevación Digital de Alta Resolución LiDAR", <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/?tg=1015>
- INEGI, "Censo de Población y Vivienda 2020", <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Instituto Registral y Catastral del Estado de Puebla, "Portada Servicios Catastro", https://www.ircep.gob.mx/portada_servicios_catastro.html
- Jafarzaghan, K., and Merwade, V., 2017, A DEM-based approach for large-scale floodplain mapping in ungauged watersheds: *Journal of Hydrology*, 550, 650-662. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.053>
- Liu, J., Wang, X., Zhang, B., Li, J., Zhang, J., and Liu, X., 2017, Storm flood risk zoning in the typical regions of Asia using GIS technology: *Nat Hazards*, 1691-1707. DOI: 10.1007/s11069-017-2843-1
- Lungo, M., 2001, Expansión de las ciudades en Centroamérica y generación de riesgos urbanos: *Realidad. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 79, 41-62. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4020831>
- Marskey, A., 2011, Revisiting community-based disaster risk: *Environmental Hazards*, 10, 1, 42-52. DOI: <https://doi.org/10.3763/ehaz.2011.0005>
- Merlinsky, M.G., and Tobías, M.A., 2016, Inundaciones y construcción social del riesgo en Buenos Aires. Acciones colectivas, controversias y escenarios futuros: *Cuaderno del Cendes*, 33, 91, 45-63. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-25082016000100004&lng=es&nrm=iso
- Mojtahedi, M., and Oo, B.L., 2016, Critical attributes for proactive engagement of stakeholders in disaster risk: *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35-43. DOI: 10.1016/j.ijdr.2016.10.017
- Moya-Quiroga, V., Kure, S., and Udo, K., 2016, Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS versión 5: *Revista Iberoamericana del Agua*, 3, 25-33. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2386378116000025>
- Narváez, Q.I., Durán, S.G., Menoscal, C.J., and Bayón, J.M., 2020, Espacio urbano periférico y la construcción social del riesgo en ciudades intermedias: *Cuadernos de vivienda y urbanismo*, 13, 1-18. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu13.eupc>
- O'Keefe, P., Wastegate, K., and Wisner, B., 1976, Taking the naturalness out of natural disasters: *Nature*, 260, 566-567. <https://doi.org/10.1038/260566a0>
- Principi, N., and Buzai, G., 2021, "Mapa social y vulnerabilidad socioeconómica en la ciudad de Luján (Buenos Aires, Argentina)", in S.S. Villerías and N.G. Nochebuena, *Procesos Territoriales: un enfoque multidisciplinario*, Buenos Aires, Lugar Editorial, pp. 17-38.
- Ramírez, F.J., 2017, Gestión para la reducción del riesgo de inundación en el municipio de Puebla: Tesis de Doctorado, *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*, p. 136. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/1118>
- Ríos, C., 2020, Fragilidad urbana: una lectura del desastre desde los habitantes menos protegidos: *QUIVERA. Revista de Estudios Territoriales*, 22, 57-74. <https://doi.org/10.36677/qret.v22i1.12798>
- Salgado-Montes, S.S., 2020, Empoderamiento ciudadano para mitigar el riesgo de inundación. Caso colonia La Hacienda, Puebla, México: Tesis de Doctorado, *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*, p. 118. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/10572>

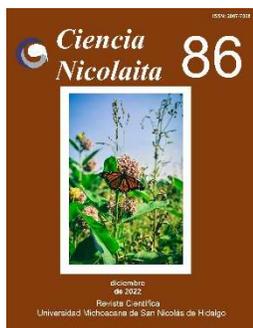
Salgado-Montes, S.S., Flores-Lucero, M.L., and Guevara-Romero, M.L., 2019, "Gestión del riesgo de inundación en la colonia La Hacienda. Hacia el empoderamiento ciudadano", in F. Iglesias-Suárez, *Humanidades y Ciencias de la Conducta*, 1, 61-77. https://www.ecorfan.org/collections/Collection_Humanidades_y_Ciencias_de_la_Conducta_TI/Extenso/Collection_Humanidades_y_Ciencias_de_la_Conducta%20_TI.pdf

Schubert, J.E., and Sanders, B.F., 2012, Building treatments for urban flood inundation models and implications for

predictive skill and modeling efficiency: *ELSEVIER*, 41, 49-64. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.02.012>

SEDESOL, "Atlas de Riesgos Naturales Municipio de Puebla", <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>

UNDRR, "Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030", https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Despliegue de gotas sobre superficie a alta temperatura

Display of drops on surface at high temperature

Luis Fernando Huerta Mendoza, Gildardo Solorio Díaz, Crisanto Mendoza Covarrubias*,
Alicia Aguilar Corona

Para citar este artículo: Luis Fernando Huerta Mendoza, Gildardo Solorio Díaz, Crisanto Mendoza Covarrubias*, Alicia Aguilar Corona, 2022. Despliegue de gotas sobre superficie a alta temperatura. Ciencia Nicolaita no. 86, 111-121.
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.662>

Historial del artículo:



Recibido: 24 de mayo de 2022

Aceptado: 4 de octubre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: cmendoza@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Despliegue de gotas sobre superficie a alta temperatura

Display of drops on surface at high temperature

Luis Fernando Huerta Mendoza, Gildardo Solorio Díaz, Crisanto Mendoza Covarrubias*,
Alicia Aguilar Corona

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

Resumen

La extracción de calor debido al uso de agua es el principal método de enfriamiento utilizado en diversos procesos metalúrgicos, siendo el enfriamiento secundario en colada continua uno de ellos, donde por medio de chorros de agua generados por boquillas, se elimina la mayor cantidad de calor. Existen adaptaciones en este método de enfriamiento que permiten acelerar la transferencia de calor, tales como: variación de caudal de agua, velocidad de aspersión de agua y pulverización de agua. Sin embargo, existen pocos trabajos que se enfoquen en el conocimiento básico de la transferencia de calor entre la superficie a alta temperatura y gotas de agua que salen pulverizadas (Celata *et al.*, 2006). Por lo tanto, en este trabajo, mediante técnicas de imagen con cámaras de alta velocidad, se realiza una investigación de cómo se da el despliegue de la gota después de que esta impacta sobre una superficie que se mantiene a distintos valores de temperatura. Con la utilización de un microgotero y normogotero, se garantizan dos tamaños de gotas de 3.5 mm y 5 mm de diámetro, respectivamente. Las gotas se dejan caer por gravedad sobre la superficie desde una altura de 80 cm y, con la ayuda de las imágenes obtenidas mediante la cámara de alta velocidad, se analiza el despliegue de la gota para temperaturas que van desde la temperatura ambiente hasta los 800 °C. Como resultados se observa que, dependiendo de la temperatura superficial de la placa metálica, el comportamiento del despliegue de la gota al momento del contacto varía; asimismo, se observa cómo la rugosidad interfiere en el despliegue de la gota de agua al momento de hacer contacto con la placa.

Palabras clave: variación de temperatura, rugosidad, despliegue de gota, comportamiento de gota, velocidad



Abstract

Heat extraction due to the use of water is the main cooling method used in various metallurgical processes, being the secondary cooling in continuous casting one of them, where through jets of water generated by nozzles, the most heat is removed. There are adaptations in this cooling method that allow to accelerate heat transfer, such as: water flow variation, water spray speed and water spray. However, there are few works that focus on the basic knowledge of heat transfer between the surface at high temperature and water droplets that spray out (Celata *et al.*, 2006). Therefore, in this work by means of imaging techniques with high-speed cameras, an investigation is made of how the drop unfolds after it impacts a surface that is maintained at different temperature values. With the use of a microdropper and normogotero, two drop sizes 3.5 mm and 5 mm in diameter are guaranteed, respectively. The drops are dropped by gravity on the surface from a height of 80 cm, and with the help of images obtained from the high-speed camera, the deployment of the drop is analyzed for temperatures ranging from ambient temperature, to 800 °C. As a result, depending on the surface temperature of the metal plate, the behavior of the drop deployment at the time of contact varies. It is also observed how the roughness interferes in the deployment of the drop of water when making contact with the plate.

Keywords: temperature variation, roughness, drop deployment, drop behavior, speed

Introducción

La elaboración de acero por medio de colada continua representa, actualmente, su principal vía de obtención. En los últimos años, el empleo de esta tecnología ha ido creciendo en casi todos los países del mundo, reemplazando paulatinamente el colado convencional en lingotes (Cicutti, 1997). Sin embargo, a diferencia del colado convencional en lingotes, la solidificación del material procesado por colada continua ocurre en pocos minutos, estando el producto sometido a fuertes tensiones y deformaciones por lo que la calidad del mismo está íntimamente relacionada con la evolución térmica a lo largo del proceso. El enfriamiento secundario tiene como función solidificar el acero líquido a un remanente dentro de la sección colada, formando una “piel” estable y evitando la formación de grietas internas u otros defectos (Pulgar Hormazábal, 2017). En el proceso, la extracción de calor se produce, principalmente, debido a la conducción de calor por contacto del rodillo-línea, por radiación desde la superficie del acero, por evaporación parcial del agua que incide sobre el producto y por conducción de calor del agua que escurre y se acumula entre el rodillo y el acero (Sengupta *et al.*, 2005).

Antecedentes

El proceso de colada continua se desarrolló hace varias décadas para producir formas posteriores en procesos de semi-fabricación como laminado o extrusión en aceros. La productividad del proceso está controlada por la velocidad de fundición, por lo que siempre se buscan las velocidades más altas; sin embargo, la velocidad de salida del planchón o palanquilla no se puede aumentar arbitrariamente por diferentes razones (Sengupta *et al.*, 2005), por ejemplo, por el sistema de enfriamiento secundario. Aquí se basa solamente en la velocidad de colada y en un control de avance, el cual se aplica para calcular el agua de refrigeración y el caudal requerido. Un aumento en la velocidad de colada, implica un enfriamiento menos eficiente (Ji & Yang, 2010). Comúnmente, en el enfriamiento secundario son utilizadas boquillas en donde se mezcla agua y aire, la cual se regula variando el caudal del agua y manteniendo constante la presión de la boquilla del aire (Montes & Castillejos *et al.*, 2008). Se ha visto que la medición de la distribución del coeficiente de transferencia de calor, no está en función de la distribución del líquido suministrado por las boquillas (Horský & Raudenský, 2005). En cambio, el coeficiente de transferencia de calor es más sensible al

cambio con la modificación de la presión del aire. La combinación de ambos parámetros da una buena función de correlación de calidad (Kotrbaček *et al.*, 2021).

La mayoría de los estudios sobre el enfriamiento secundario se basan en la investigación de las boquillas que inducen una mezcla de agua y aire, variando velocidad de aspersión de agua, caudal de agua, presión de aire, por mencionar algunos, pero pocos se basan en la influencia de la temperatura de una superficie caliente y una gota derivada de la pulverización del chorro de agua a través de boquillas. Existen también investigaciones en donde se trabaja en una superficie caliente que ronda entre los 200 °C y 300 °C, cuyo objetivo principal es conocer más a fondo lo que sucede con un impacto de gota y el efecto Leidenfrost (Karl & Frohn, 2000). Labeish y Pimenov (1984), hicieron pruebas de transferencia de calor entre gotas y pared, en donde la superficie fue calentada desde los 120 °C y continuaron con más análisis que superaron los 360 °C de temperatura. Por su parte, Tartarini y colaboradores (1999) realizaron pruebas de impacto de gotas en una superficie que osciló entre 100 °C y 200 °C, esto para conocer el efecto del inicio de la ebullición en la tasa de evaporación de la gota de agua, medir la evolución de la temperatura de la superficie sólida durante la evaporación y examinar alguna posibilidad de hacer una mejora en cuanto a la eficiencia del enfriamiento por aspersión de agua. Por otro lado, en el trabajo de Bertola (2015) se estudia la morfología del impacto de una gota de agua sobre una superficie que es calentada en un rango de temperatura de los 50 °C hasta los 400 °C. En su investigación, propone varios regímenes de impacto en función del resultado final del comportamiento de la gota.

Del mismo modo, la rugosidad en superficies calientes es de importancia, pues existe una influencia directa sobre la transferencia de calor y las gotas que impactan en la misma. Las superficies irregulares presentan cavidades y picos que causan una transferencia de calor no homogénea que repercute directamente a la gota que impacta. Se han realizado diversos estudios sobre el efecto de la rugosidad en superficies calientes para conocer un poco más de este comportamiento. Por ejemplo, Mudawar y colaboradores (1996), presentan un trabajo en donde realizan técnicas de fotografía a alta velocidad y miden la transferencia de calor para el estudio del impacto de

una gota sobre superficies calientes a diferentes valores de rugosidad: de 97, 970 y 2960 nm, en donde encuentran que, gracias a la rugosidad, la gota es capaz de romper en temperaturas menores que en superficies pulidas. Karl y Frohn (2000), en cambio, mencionan que el comportamiento general del impacto de gotas no cambia con los diferentes valores de rugosidad en la superficie.

En este trabajo se estudió el comportamiento y despliegue de gotas sobre una superficie caliente a distintas temperaturas, así como la velocidad de la gota cercana a la superficie caliente, además se analizó el efecto de la rugosidad de la superficie sobre el despliegue de la gota.

Metodología experimental

Para la metodología experimental se llevó a cabo la construcción de un banco de pruebas que se muestra de manera representativa en la figura 1.

Las pruebas parten con el calentamiento de una placa de acero inoxidable AISI 304, la cual tiene dimensiones de 25.4 mm x 25.4 mm x 62 mm, y una perforación céntrica longitudinal de 15 mm de diámetro en donde se coloca una resistencia tipo Kanthal, la cual es calentada por medio de una máquina para soldar que suministra 18 amperes, corriente necesaria para alcanzar los 800 °C en la superficie de la placa experimental. La transferencia de calor que se da entre la resistencia tipo Kanthal y las paredes internas de la placa es por radiación. Una vez alcanzada la temperatura a la cual se hará la prueba, se deja caer una gota de agua que es influenciada por la acción de la gravedad y generada por un normogotero o microgotero (5 mm y 3.5 mm de diámetro de gota, respectivamente). Estos goteros han sido previamente modificados para poder controlar la caída de la gota en función del tiempo a través de un estrangulador. Simultáneamente a la caída de la gota, se utiliza una cámara de alta velocidad *visión research phantom* modelo *miro 340*, que permite tomar videos a 3000 fps. Una buena iluminación es fundamental para obtener imágenes de calidad en la experimentación, pues al tomar videos por encima de los 1000 fps, el obturador de las cámaras tiende a absorber menores cantidades de luz. Como parte final de la prueba, se guarda el video obtenido por la cámara de alta velocidad y se dispone de softwares específicos para hacer edición y análisis de

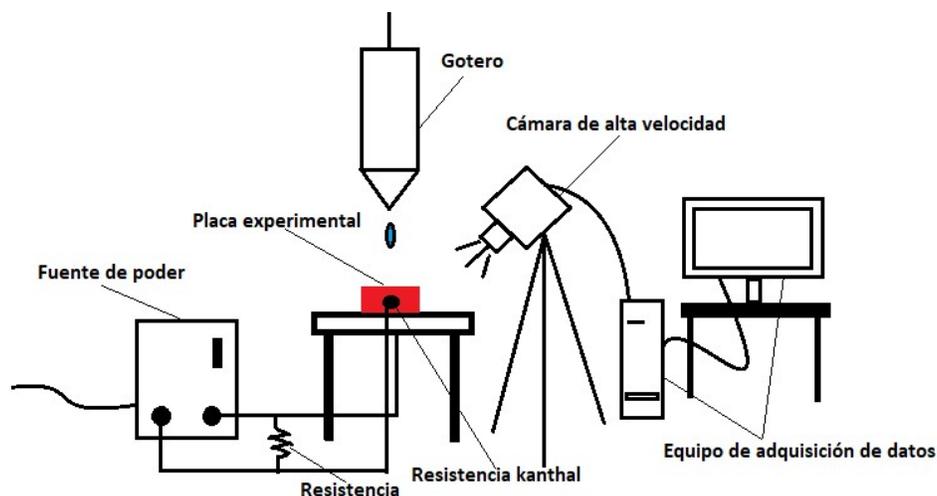


Figura 1. Esquema representativo del banco experimental.

los datos generados. Esta metodología es utilizada para todos los casos de investigación que parten de los 100 °C hasta los 800 °C. En las pruebas isotérmicas, se omite el calentamiento de la placa.

Resultados

A continuación se muestran los resultados y observaciones realizadas en los experimentos de impacto de gotas en superficies a altas temperaturas.

Visualización de gota a diferentes temperaturas

En la prueba de 100 °C se nota claramente que después del despliegue de la gota, esta no se desprende de la superficie para romper y generar partículas de gotas más pequeñas. Se observa cómo la película de agua se encuentra en transición, pues no tiene la temperatura necesaria como para generar una capa de vapor estable que permita un rebote de partículas. Esto sucede porque la superficie no es lo suficientemente caliente, ya que, con base en la literatura, a partir de

los 193 °C se genera el efecto de Leidenfrost, que es el fenómeno que explica el movimiento errático de las partículas de algún líquido volátil al hacer contacto con una superficie metálica caliente.

La segunda prueba realizada de una gota que impacta sobre una superficie caliente, fue de 200 °C. Se puede corroborar que, efectivamente, la gota rompe y se despliega en partículas más pequeñas, demostrando que el efecto Leidenfrost ocurre a temperaturas superiores de los 193 °C. También se observa que el rompimiento de la gota en volúmenes más pequeños no se da justo después del impacto de la gota, sino que tarda un periodo de tiempo para que se desprenda de la superficie: alrededor de 4.66 milisegundos para el caso particular. En este tiempo de transición, la energía potencial de la gota se transforma a energía cinética, acción por la cual, en conjunto con el efecto Leidenfrost, se logra visualizar la elevación y movimiento de las partículas de agua.

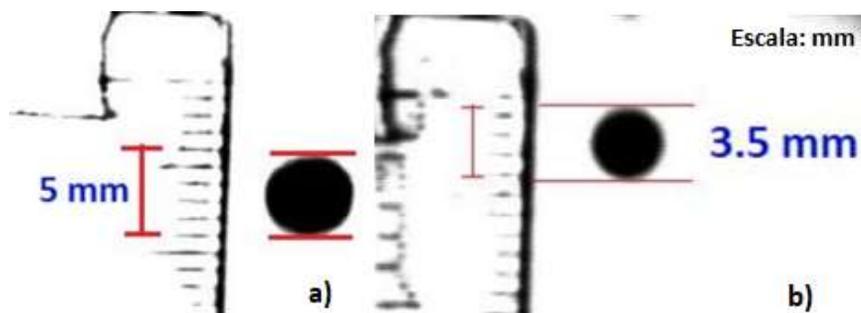


Figura 2. Obtención de los diámetros de gota (cada línea horizontal). a) Gota generada por normogotero, b) Gota generada por microgotero.

Para la temperatura de 300 °C, la capa de vapor que existe entre la superficie caliente y la gota comienza a mostrar una tendencia estable, puesto que la diferencia de temperaturas es cada vez mayor y, por lo tanto, la evaporación de la gota sucede a más velocidad.

Para una gota que impacta la superficie caliente a 400 °C se observa que, en cuanto al despliegue, desprendimiento y movimiento de la gota, presenta una tendencia similar a la mostrada con la temperatura de 300 °C. La película de vapor pasa de estar bajo un régimen en transición a una fase estable, en la cual la capa de vapor hace que el coeficiente de transferencia de calor disminuya, por lo que en esta etapa se puede considerar un aumento en la velocidad de impacto de la gota.

Una vez que se ha alcanzado una temperatura que permite generar una película de vapor estable (de 600 °C a 800 °C), se observa la interacción entre la superficie caliente y la gota. En esta etapa se visualiza cómo el vapor permite que se despliegue en un mayor diámetro el agua que impacta en la superficie. Ciertas variaciones pueden producir que la gota no tenga un comportamiento habitual, por ejemplo, la suciedad en la superficie en donde impactan las gotas produce un comportamiento distinto, ya que no permite que se haga un contacto homogéneo. En este sentido, para la prueba de 500 °C la superficie metálica presenta suciedad, de ahí que, al no existir un contacto libre de imperfecciones, la gota genera una capa de vapor inestable, por lo que rompe en partículas de agua y, a su vez, impide que se extraiga calor como lo haría a través de un despliegue homogéneo.

En la Figura 3 se observa cómo se comportan las gotas que están en contacto con una superficie caliente a diferentes temperaturas.

Diámetros máximos de despliegue

Se analizaron nueve videos y se capturó el momento en donde la gota generada por el microgotero mostró el despliegue máximo de la película de agua a través de la variación de la temperatura, antes de que esta se rompiera y se dividiera en partículas de agua de menor volumen. Con base en los resultados del análisis de imágenes y la medición de los diámetros máximos de despliegue de la gota, se puede comprobar que existen tres etapas en el comportamiento de

una gota que impacta una superficie metálica caliente, y que se encuentra en función de la temperatura.

Como primera etapa se tiene el comportamiento de despliegue de gota regular (véase d1 y d2 de Figura 4). Aquí se tiene una película de agua que se expande de manera natural, pues la temperatura de la superficie no tiene el calor suficiente como para generar alguna alteración o capa de vapor entre la gota y la placa metálica. La transferencia de calor bajo estas condiciones se puede considerar alta, ya que se presenta un contacto en la totalidad del tiempo.

En la segunda etapa, se inicia con la presencia del efecto Leidenfrost, el cual indica la aparición de una capa de vapor entre la gota y la superficie. Para el caso particular de esta investigación, desde el d3 hasta el d6 (véase Figura 4 y Tabla 1), se encontró evidencia de una capa de vapor inestable, pues se observa cómo el diámetro máximo de despliegue es menor que el diámetro en condiciones isotérmicas. Esto es debido a que la inestabilidad de la capa de vapor provoca un rompimiento aleatorio de partículas en la película de agua, evitando que se expanda a un diámetro mayor.

Como etapa final, se tiene un comportamiento de despliegue de gota en donde se encuentra una capa de vapor totalmente desarrollada y estable, teniendo un tamaño de diámetro similar a los de la primera etapa. Como se observa en la figura 4, los diámetros d7, d8 y d9, presentan una similitud a la hora de expandirse. La película de agua sugiere una estabilidad que también permite observar un contacto mayor comparado con la etapa de vapor inestable, aunque eso no indica que la tasa de transferencia de calor sea también mayor. Al tener una capa de vapor estable en toda el área de contacto, se reduce el calor que se pudiera disipar, pues el vapor evita una correcta transferencia de calor.

Comportamiento de la gota a través de la variación de temperatura

Para observar la influencia de la temperatura en la gota, se realizó un análisis en su trayectoria, donde se obtuvieron las velocidades correspondientes para cada uno de los casos de investigación. Las pruebas realizadas se tomaron en el umbral de impacto, a una altura no mayor a los 50 mm sobre la superficie metálica. El propósito de mostrar los resultados a esta distancia, es revisar si existe un cambio de velocidad

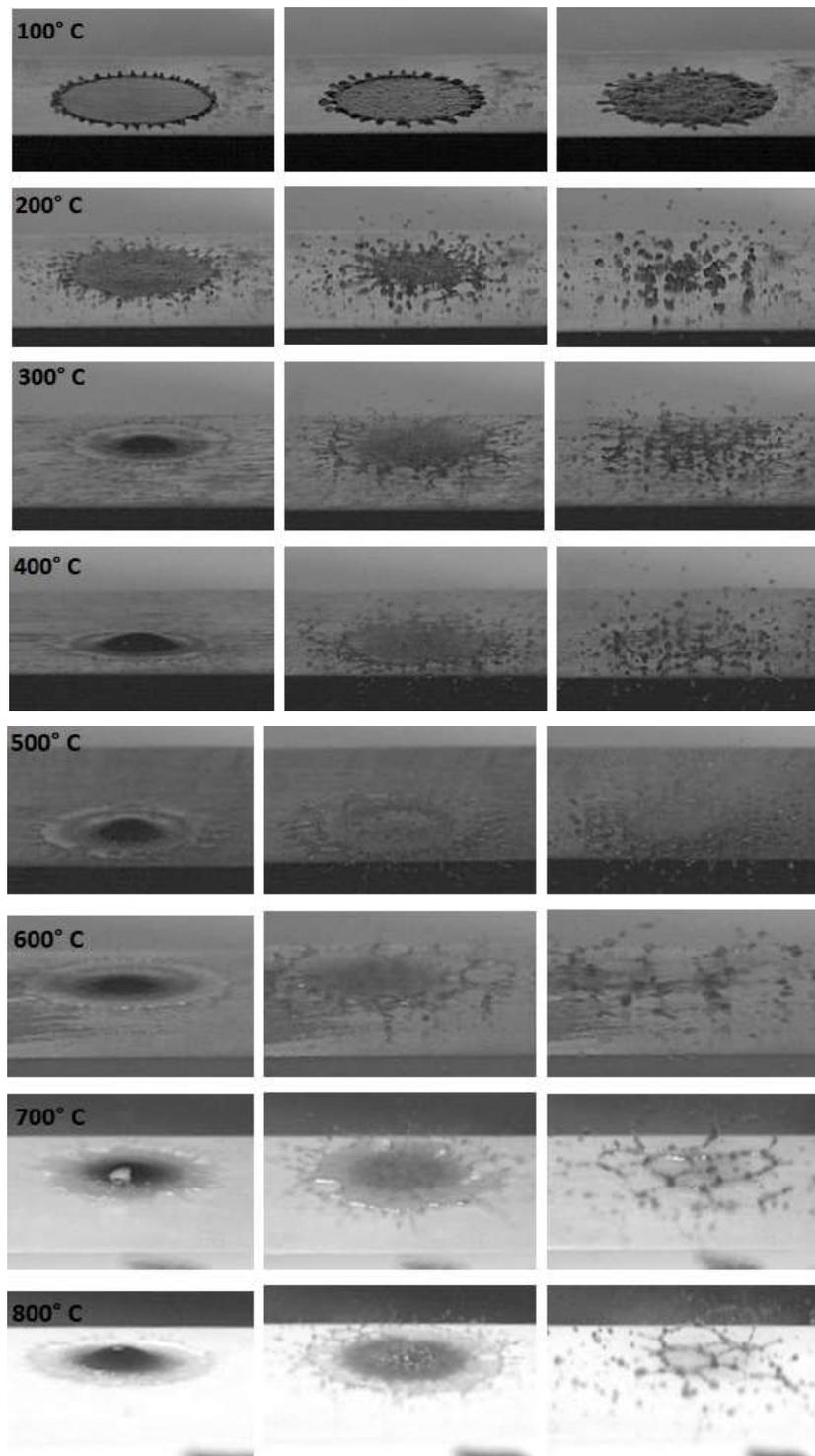


Figura 3. Visualización de impacto de gotas de 3.5 mm de diámetro a diferentes temperaturas.

justo antes del impacto de la gota sobre la superficie caliente, variando la temperatura.

Se analizaron nueve videos para un tamaño de gota de 3.5 mm de diámetro (desde temperatura iso-

térmica, hasta los 800 °C), mientras que para un tamaño de gota de 5 mm de diámetro, se revisaron 10 videos (desde temperatura isotérmica, hasta los 800 °C). Los resultados de estos análisis se presentan en

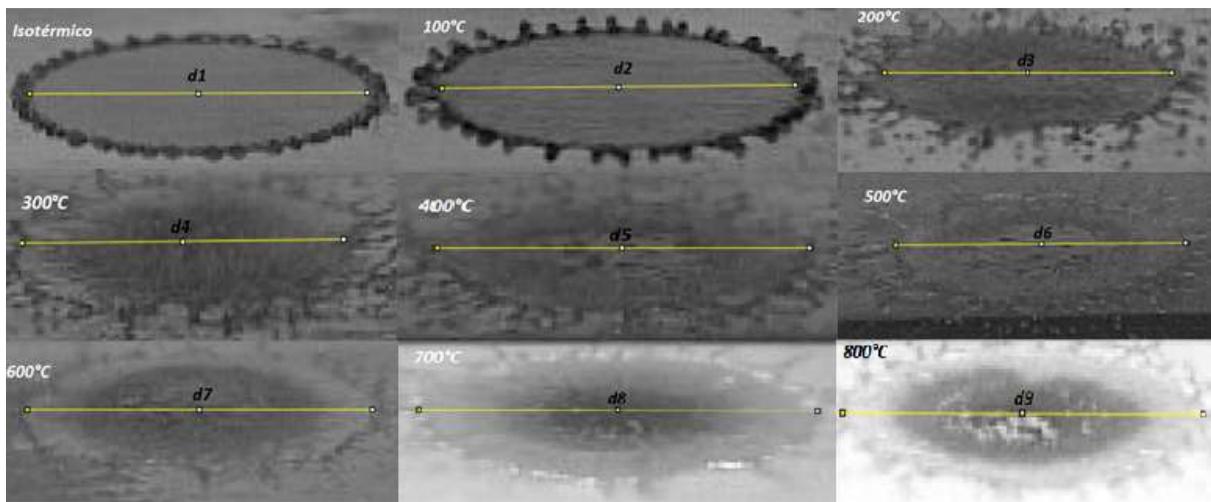


Figura 4. Diámetros máximos de gotas generadas por microgotero al momento de su impacto sobre una superficie caliente

las figuras 5 y 6, donde se engloban los resultados y se presentan en función de su diámetro.

Tabla 1

Valores máximos de diámetros de gotas de agua en función de su temperatura.

Temperatura	Diámetro
Isotérmico	$d1 = 25.659 \text{ mm}$
100 °C	$d2 = 26.840 \text{ mm}$
200 °C	$d3 = 23.005 \text{ mm}$
300 °C	$d4 = 23.771 \text{ mm}$
400 °C	$d5 = 21.982 \text{ mm}$
500 °C	$d6 = 20.619 \text{ mm}$
600 °C	$d7 = 25.816 \text{ mm}$
700 °C	$d8 = 26.968 \text{ mm}$
800 °C	$d9 = 26.330 \text{ mm}$

Se tiene que, para gotas de 3.5 mm y 5 mm de diámetro, justo antes de impactar una superficie metálica que no supere los 800 °C, la variación en la velocidad por la influencia de la temperatura será mínima y aleatoria. Se asume un comportamiento aleatorio en este umbral, pues no se tiene una predicción sobre en qué momento aumentará o disminuirá la velocidad en su trayectoria. Para la prueba de tamaño de gota de 5 mm, fue posible medir una temperatura superior a las establecidas en la investigación, que fue de 890 °C (Figura 6). Esta temperatura se obtuvo suministrando corriente eléctrica a la resistencia tipo Kanthal hasta hacerla fallar; la falla ocurrió por derretimiento del material. Debido a que fue la última prueba, en ningún momento entorpeció el propósito de esta investigación.

Comportamiento de la gota en función de la superficie de contacto

Se observó en las pruebas realizadas para un tamaño de gota de 5 mm de diámetro con una superficie pulida, el comportamiento del despliegue de la película de agua sobre la superficie metálica caliente.

Un caso particular se presenta en estas pruebas. Para las temperaturas de 400 °C y 500 °C, se puede notar cómo después de que se despliega la gota, la inercia de la película debido a la diferencia de presiones que se da al momento de impactar, obliga a converger el líquido justo en el lugar donde fue el contacto de la gota, liberando partículas de agua en todo el recorrido, esto sin romper la película (Figura 7). Este fenómeno solo aparece en temperaturas que se consideran en esta investigación como temperaturas en transición, siendo solo en dos casos de los cuatro que se presentan en esta etapa. Este fenómeno se considera que aparece cuando la rugosidad que existe en la superficie es tan pequeña, que no afecta el despliegue de la gota con alguna irregularidad que pudiera tener. Los diferentes valores de rugosidad superficial tienden a hacer que la salpicadura en la superficie metálica sea de menor duración y con un comportamiento errático, en donde se puede considerar que los picos, relieves y cavidades generan capas de vapor de diferentes tamaños, teniendo como resultado explosiones de partículas de agua y bajas tasas de transferencia de calor al medio ambiente.

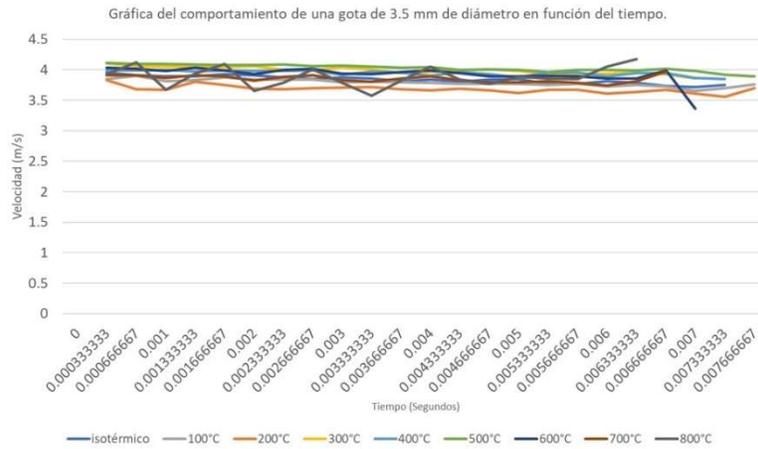


Figura 5. Gráfica del comportamiento de una gota de 3.5 mm de diámetro en función del tiempo.

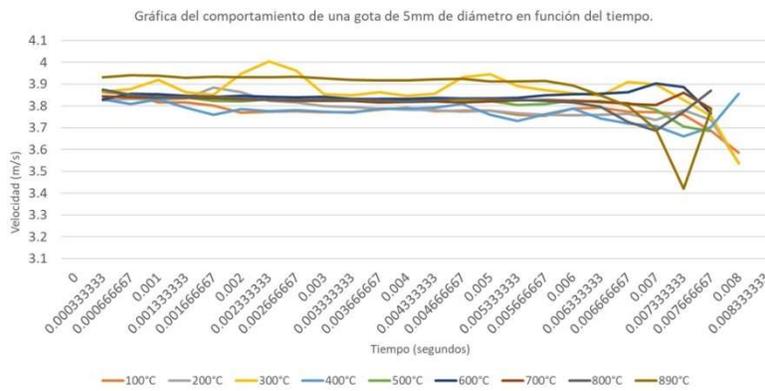


Figura 6. Gráfica del comportamiento de una gota de 5 mm de diámetro en función del tiempo.

También se puede observar que este fenómeno genera que las partículas que se encuentran en un extremo de la película de agua, cambien su trayectoria y hagan un recorrido hacia el sentido opuesto. Como ejemplo, en la figura 8 se observa el recorrido de una partícula que se encuentra encerrada en un círculo

rojo. La partícula **P** aparece en el cuadrante A de la imagen 1, que es en el momento cuando el despliegue de la gota alcanza su diámetro máximo, antes de comenzar a converger. Después de esto, se puede observar cómo la partícula **P** va siguiendo una trayecto-

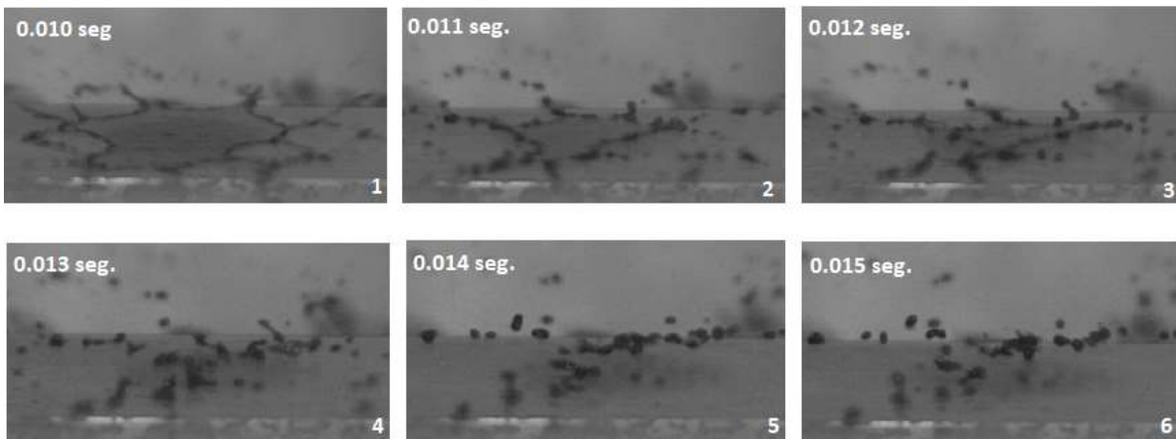


Figura 7. Secuencia de imágenes que presenta el comportamiento del despliegue de gotas de agua en superficies metálicas calientes a una temperatura de 500°C.

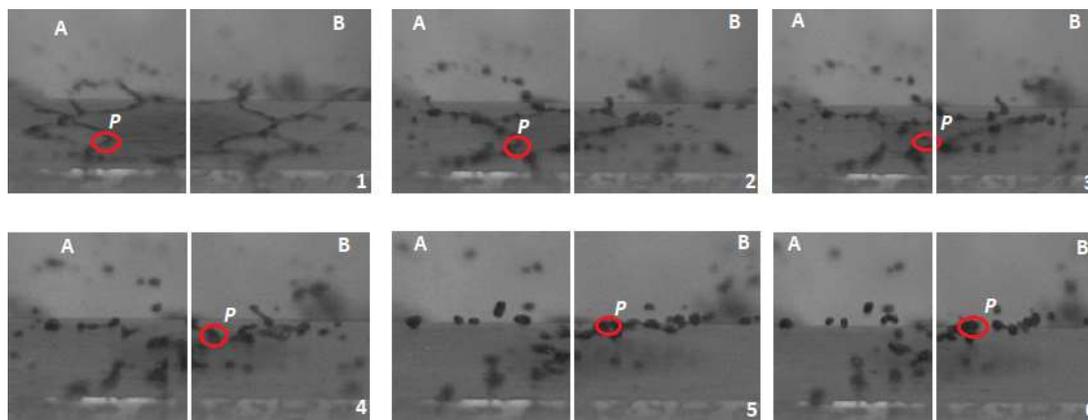


Figura 8. Seguimiento del recorrido de una partícula de agua.

ria hacia el cuadrante B. Este fenómeno solo se observa cuando la superficie metálica caliente se encuentra con una rugosidad baja, con acabado pulido.

En el caso de las temperaturas que superan los 600 °C, la capa de vapor se encuentra en la etapa estable (Figura 9). Como resultado de las pruebas realizadas, se presentaron comportamientos similares a las demás pruebas hechas con el microgotero.

Conclusiones

En este trabajo de investigación se construyó un banco experimental en donde se realizaron pruebas de impacto de gotas de agua sobre una superficie metálica, la cual fue calentada a diferentes temperaturas por medio de una resistencia tipo Kanthal. Estas pruebas se hicieron con gotas de agua influenciadas por la acción de la gravedad y se generaron por medio de goteros de uso médico. Los experimentos permitieron conocer datos sobre la influencia de la temperatura en la velocidad de la gota, en el despliegue, así como el comportamiento de la gota con respecto a la rugosidad superficial. A continuación, se mencionan los aspectos más importantes de esta investigación.

Se observó cómo a través del incremento de la temperatura superficial de la placa, la gota fue tomando diferentes características después de impac-

tar. La variación en la temperatura de la superficie metálica generó un comportamiento diferente en el despliegue de la gota para los distintos casos de estudio. Se tiene que, a menor temperatura de la superficie metálica (100 °C), mayor es la transferencia de calor, ya que no existe una capa de vapor formada por debajo de la gota. A partir de los 200 °C, se comienza a formar una capa de vapor, aunque se presenta de manera inestable y esto ocasiona que las gotas reboten y se dispersen. Llegando a los 600 °C, la transferencia de calor resultaría menos eficiente, pues al tener un despliegue mayor, el área de contacto aumenta, pero la capa de vapor impide que se genere un contacto directo con la superficie caliente.

Se realizaron análisis en las trayectorias de las gotas de agua de 3.5 mm y 5 mm de diámetro, donde se obtuvieron las velocidades correspondientes para cada uno de los casos de investigación. Se encuentra que, para las condiciones mencionadas, la variación en la velocidad de la gota por la influencia de la temperatura será mínima y aleatoria, por lo que se puede decir que no genera variaciones trascendentes para los casos de estudio. Esto quiere decir que el impacto de una gota de agua de 3.5 mm y de 5 mm de diámetro que es influenciada por la acción de la gravedad

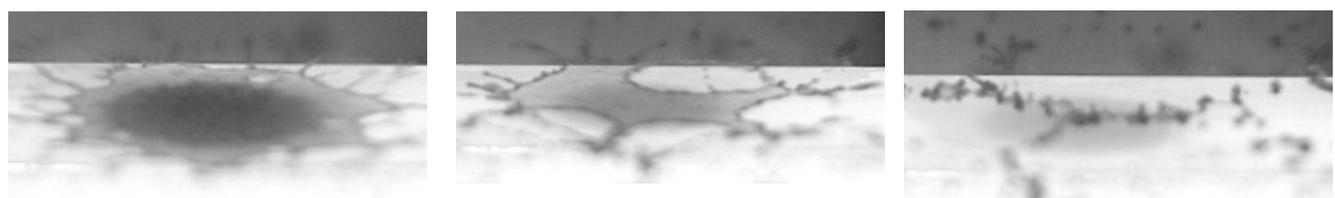


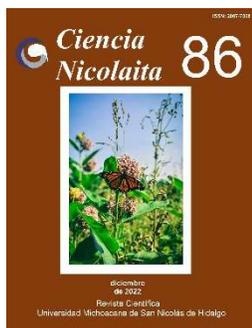
Figura 9. Despliegue de una gota de agua a 600°C sobre una superficie metálica caliente pulida.

sobre una superficie metálica, desde temperatura ambiente hasta los 800 °C a una altura no mayor a los 50 mm, tendrán un comportamiento similar.

Se visualizó cómo es que la rugosidad superficial de la placa influye en el comportamiento del impacto de la gota. En las pruebas de impacto de gotas de agua sobre una superficie pulida, se presentó un despliegue similar al que muestran las pruebas isotérmicas, lo que favorecería la transferencia de calor. En cambio, las superficies con una cierta rugosidad, muestran una tendencia a generar el rompimiento de la película de agua en la superficie metálica, impidiendo extraer el máximo calor de la superficie caliente.

Referencias

- Bernardin, J.D., Stebbins, C.J., and Mudawar, I., 1996, Effects of surface roughness on water droplet impact history and heat transfer regimes: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40, 1, 73-88. doi.org/10.1016/S0017-9310(96)00067-1.
- Bertola, V., 2015, An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces: *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 85, 430-437. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.084.
- Celata, G.P., Cumo, M., Mariani, A., and Zummo, G., 2006, Visualization of the impact of water drops on a hot surface: Effect of drop velocity and surface inclination: *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*, 42, 10, 885-890. doi.org/10.1007/s00231-006-0139-1.
- Cicutti, C., 1997, Transferencia de calor en la colada continua de aceros. I parte. El molde: *Revista de Metalurgia*, 33, 5, 333-344. doi.org/10.3989/revmetalm.1997.v33.i5.846.
- Ji, Z., and Yang, J., 2010, Online dynamic control of secondary cooling for the continuous casting process: *Proceedings - 3rd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 269-272. doi.org/10.1109/ICINIS.2010.21.
- Karl, A., and Frohn, A., 2000, Experimental investigation of interaction processes between droplets and hot walls: *Physics of Fluids*, 12, 4, 785-796. doi.org/10.1063/1.870335.
- Kotrbaček, P., Bellerova, H., Luks, T., and Raudenský, M., 2021, Heat Transfer Correlations for Secondary Cooling in Continuous Casting: *Steel Research International*, 92, 3. doi.org/10.1002/srin.202000465.
- Labeish, V.G., and Pimenov, A.G., 1984, Experimental study of heat transfer between a hot wall and impinging drops: *Journal of Engineering Physics*, 47, 6, 1400-1406. doi.org/10.1007/BF00870055.
- Pulgar Hormazábal, J.P., 2017, Perfil de solidificación de acero bajo distintas condiciones operacionales en colada continua de palanquillas: Tesis de Licenciatura, *Universidad de Concepción*, pp. 9-11.
- Montes, J.J., Castillejos, A.H., Acosta, F.A., Gutiérrez, E.P., and Herrera, M.A., 2008, Effect of the Operating Conditions of Air-Mist Nozzles on the Thermal Evolution of Continuously Cast Thin Slabs: *Canadian Metallurgical Quarterly*, 47, 2, 187-204. doi.org/10.1179/000844308794408416.
- Sengupta, J., Thomas, B.G., and Wells, M.A., 2005, The use of water cooling during the continuous casting of steel and aluminum alloys: *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 36 A, 1, 187-204. doi.org/10.1007/s11661-005-0151-y.
- Tartarini, P., Lorenzini, G., and Randi, M.R., 1999, Experimental study of water droplet boiling on hot, non-porous surfaces: *Waerme- Und Stoffuebertragung Zeitschrift*, 34, 6, 437-447. doi.org/10.1007/s002310050280.
- Horský, J., and Raudenský, M., 2005, Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting: *Metal*, 1-8. http://metal2013.tanger.cz/files/proceedings/metal_05/papers/235.pdf



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Análisis geotécnico de la estabilidad del talud “El Álamo”, ubicado en la antigua carretera de Mil Cumbres

Geotechnical analysis of the stability of the slope “El Álamo”, located on the old road of Mil Cumbres

Arreygue Rocha J.E.,* Ávila Ambriz G.H. y Hurtado Beltrán A.

Para citar este artículo: Arreygue Rocha J.E., Ávila Ambriz G.H. y Hurtado Beltrán A., 2022. Análisis geotécnico de la estabilidad del talud “El Álamo”, ubicado en la antigua carretera de Mil Cumbres. Ciencia Nicolaita no. 86, 122-135.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.678>

Historial del artículo:



Recibido: 18 de junio de 2022

Aceptado: 3 de noviembre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: eleazar.arreygue@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Análisis geotécnico de la estabilidad del talud “El Álamo”, ubicado en la antigua carretera de Mil Cumbres

Geotechnical analysis of the stability of the slope “El Álamo”, located on the old road of Mil Cumbres

Arreygue Rocha J.E.,^{1*} Ávila Ambriz G.H.² y Hurtado Beltrán A.¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Fac. Ingeniería Civil.

²Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Fac. Ingeniería Civil, Maestría en Infraestructura del Transporte

Resumen

La carretera de Mil Cumbres se construyó en los años 40 para conectar la Ciudad de México con Morelia. En la actualidad, se trata de un camino viejo con poco mantenimiento y conservación, lo que ha generado algunos eventos de inestabilidad de sus taludes con caída de bloques de diferentes tamaños, lo que provoca que en algunas ocasiones se dificulte transitar por esta carretera.

En este trabajo, se estudió el sitio que se ubica en el km 207, llevándose a cabo la caracterización geotécnica de los materiales del talud; asimismo, se aplicaron dos clasificaciones geomecánicas a través de los métodos de Bieniawski (1989) y Romana (1985). Además, se utilizó el software Dips de Rocscience®, el cual permitió realizar el análisis cinemático de los principales mecanismos de rotura del macizo rocoso.

Los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio fueron: para la roca andesítica la densidad fue de 2.37 g/cm³, absorción de 1.42 %, índice de durabilidad de 98.74 % y resistencia a la compresión de 129.38 MPa. Para la brecha, su densidad fue de 1.76 g/cm³, absorción de 17.07 %, índice de durabilidad de 4.83 % y resistencia a compresión de 4.47 MPa. De las clasificaciones geomecánicas, tanto para el RMR como para el SMR, la calidad de la roca resultó ser mala. De la aplicación del Dips se identificaron tres familias y una dispersa, además, el tipo de rotura que prevalece es el de cuña.

Palabras clave: geotecnia, talud, Mil Cumbres, Dips, número de familias

Abstract

The Mil Cumbres Highway was built in the 1940's to connect Mexico City with Morelia. Currently, it is an old road with little maintenance and conservation, which has generated some instability events on its slopes with falling blocks of different sizes, occasionally, it has been challenging to travel along this road. Specifically, the site under study is located at km 207.

In this study, a geotechnical characterization of the slope materials was undertaken. Likewise, two geomechanical classifications were applied through the Bieniawski (1989) and Romana (1985) methods. In addition, the Rocscience® Dips software was used, which allowed a kinematic analysis of the main rock mass failure mechanisms to be performed.

The results obtained from the laboratory tests revealed, for the andesitic rock, a density of 2.37 g/cm³, absorption of 1.42 %, durability index of 98.74 %, and compressive strength of 129.38 MPa. For the breccia, its density was 1.76 g/cm³, absorption of 17.07 %, durability index of 4.83 %, and compressive strength of 4.47 MPa. Based on the geomechanical classifications, both the RMR and the SMR, the rock quality was found to be poor. From the application of Dips software, three families and one disperse were identified, and the type of break that prevails is the wedge.

Keywords: geotechnics, slope, Mil Cumbres, Dips, number of families

1. Introducción

Los procesos de inestabilidad de taludes están relacionados a periodos excepcionales de precipitación y sismicidad. La acción constante de la gravedad y el debilitamiento de los materiales, debido a los procesos de meteorización, hacen que los movimientos de materiales en zonas con morfologías accidentadas sean inevitables. Por lo que, los lugares donde se localizan este tipo de movimientos son áreas de montaña, áreas de modificación antrópica como zonas mineras y cortes de taludes para obras civiles, entre otras.

La construcción de taludes es una tarea compleja que debe abordarse, usualmente, en zonas de laderas o de montañas como parte de la construcción de autopistas, carreteras o caminos vecinales, lo que genera beneficios sociales al permitir la comunicación entre las diferentes regiones del país. No obstante, en algunos casos, estos taludes presentan movimientos de tierra o caídas de fragmentos de roca que pueden provocar grandes pérdidas económicas y hasta de vidas humanas, debido a deficiencias significativas en el proyecto de la obra. Un aspecto importante en el proyecto de taludes, es conocer las propiedades y el comportamiento físico y mecánico de la roca, con el propósito de realizar un diseño mejor sustentado que, además, esté basado en criterios ingenieriles, ya sea para obras temporales o permanentes. Por lo anterior, se deben aplicar las herramientas necesarias para

diseñar, construir y ejecutar acciones que contribuyan a la prevención de cualquier tipo de accidentes, lo que favorecerá la seguridad y el bienestar de los usuarios que circularán por las carreteras, coadyuvando así, a una operación vehicular segura y eficiente.

El tramo de la carretera de Mil Cumbres conecta a Morelia con Ciudad Hidalgo; al ser una zona accidentada se tienen muchos cortes, por lo que se considera que la principal problemática es la inestabilidad de taludes, ya que tiene más de cuarenta años de operación. Se percibe que solo le dan mantenimiento a la carpeta asfáltica, más no a los taludes, razón por la cual constantemente se ven afectados por cualquier tipo de movimiento del terreno. En este sentido, el presente trabajo abordó un talud ubicado en esta carretera para realizar una caracterización geotécnica y buscar mecanismos que ayuden a disminuir estos procesos. En este ámbito, se han hecho algunos estudios geotécnicos en taludes y, en general, todos tienen la misma problemática; dichos estudios han realizado propuestas para su estabilización.

Como mencionamos, en el presente artículo se estudió un talud de 146 m de longitud y 24 m de altura que se localiza en la antigua carretera de Mil Cumbres (MEX-015). La elección de este sitio se debió a que en los últimos años las intensas lluvias han provocado algunos problemas de caídos de bloques con diámetro menor de un metro, cayendo la mayoría de ellos sobre

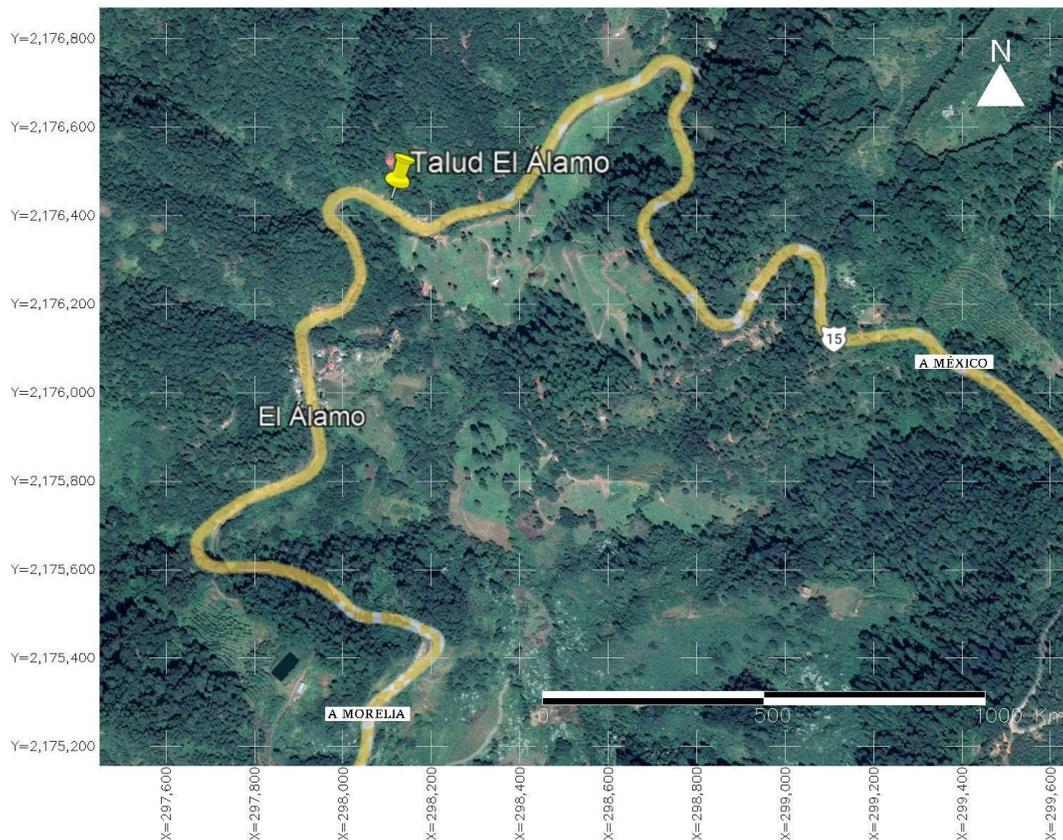


Figura 1. Ubicación del talud “El Álamo” (Google Earth, 2022). Se incluye la dirección a cada localidad, así como el sitio en estudio.

la carpeta asfáltica, cunetas o incluso han atravesado la carretera, quedando en la orilla del acantilado. Además, en el sitio de estudio se observaron antiguos deslizamientos de diferentes dimensiones, estos del tipo rotacional y de caída de bloques, por lo que se considera como una zona inestable. Para el estudio se realizó la caracterización geotécnica y se hicieron algunas recomendaciones para su estabilización.

2. Localización de la zona

El talud se encuentra en la antigua carretera México-Morelia (MEX-015), en el tramo Huajumbaro-Morelia, mejor conocido como carretera Mil Cumbres, ubicado adelante de la población “El Álamo” a 31 Km de la ciudad de Morelia con dirección a México (Figura 1). El sitio de estudio pertenece al municipio de Charo que se localiza al norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°32' y 19°48' de latitud norte y los meridianos 100°54' y 101°07' de longitud oeste. Este se ubica en la zona sísmica “C”, de acuerdo con la regionalización sísmica de la Comisión Federal

de Electricidad (CFE), donde se registra una baja frecuencia de sismos o son zonas afectadas por altas aceleraciones que no exceden del 70 % de la aceleración del suelo (CFE, 2015). Conforme con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la zona no se encuentra en una falla o fractura geológica, existiendo estas solamente en los alrededores del talud (INEGI, 2000).

El área de trabajo se localiza en el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, su geología, acorde con el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2009), está compuesta por rocas ígneas extrusivas: andesita-brecha volcánica intermedia (47.48 %), brecha volcánica intermedia (16.64 %), toba ácida (9.53 %), volcanoclásticas (4.78 %), dacita-toba ácida (4.78 %), andesita (3.67), toba intermedia-brecha volcánica (2.81 %), basalto (0.36 %) y dacita-brecha volcánica ácida (0.33 %). Asimismo, se observan rocas sedimentarias: arenisca-conglomerado (1.69 %), limonita-arenisca (1.42 %), conglomerado (1.16 %), material aluvial (4.33 %) y material lacustre (0.01 %).

En el Atlas Nacional de Riesgos realizado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), se menciona que el talud se encontró próximo a los límites de la región potencial de deslizamientos de taludes naturales denominada Eje Neovolcánico (CENAPRED, 2014). Además de lo observado en campo, se puede mencionar que hay evidencias de movimientos superficiales de tierra en sitios próximos, incluso es evidente ver sobre la carpeta asfáltica algunos círculos de falla de pequeños deslizamientos (movimiento rotacional) que han estado reparando, pero algunos continúan con su movimiento, incrementando sus desniveles (del tipo escalonamiento). Otro aspecto que se aprecia, y que también es muy frecuente, son los constantes desprendimiento de bloques de diferentes tamaños (menor a un metro de diámetro) que caen directamente sobre la calzada del camino, en algunos casos llegan hasta el lado opuesto y cuando son de menor diámetro, se quedan sobre la cuneta. También se observan algunas zonas erosionadas, esto provocado por las intensas lluvias del lugar y que se catalogan como pequeños flujos de lodo o escombros.

3. Metodología

La metodología empleada se basó en tres fases: la primera se enfocó al trabajo de campo; la segunda a la realización de las pruebas de laboratorio para obtener las propiedades índice y mecánicas de la matriz rocosa; mientras que en la tercera se aplicaron las clasificaciones de Bieniawski y Romana, además de un análisis cinemático para el macizo rocoso. Al término, se analizaron los resultados y, basado en ellos, se hicieron propuestas de estabilización.

3.1. Trabajo de campo

El trabajo de campo consistió en observar el talud para identificar sus principales cambios litológicos, apreciando tres tipos de materiales: suelos, brecha volcánica y roca andesítica, además se midió para obtener su longitud y la altura promedio. Enseguida, se realizó un levantamiento de los principales planos de las discontinuidades utilizando una brújula de geólogo, asimismo, se utilizó el esclerómetro de Schmidt para medir la resistencia aparente de la roca en el lugar. Por último, se tomaron diferentes fragmentos de

roca, procurando recolectar sanas y alteradas, con el propósito de analizarlas en laboratorio a través de las pruebas de densidad, absorción, porosidad, índice de durabilidad y carga puntual. Se realizaron varias visitas al lugar para complementar la información sobre la caracterización de la matriz rocosa, la zonificación con base en criterios litológicos-estructurales y la descripción de las discontinuidades, entre otras.

3.2. Pruebas de laboratorio

En el laboratorio se hicieron las pruebas de densidad y absorción usando la norma ASTM C-127-04, para la porosidad fue la UNE-EN 993-1 y para el peso volumétrico seco en estado natural con la M-MMP-1-08/03 (SCT). En el caso de las propiedades mecánicas, se aplicó la prueba de carga puntual (ASTM D-5731-05), el ángulo de fricción (USBR 6258-09; Barton, 1976), e índice de durabilidad al desmoronamiento (ASTM D4644-04).

3.3. Clasificaciones geomecánicas

Con el objeto de establecer el grado de calidad del macizo rocoso del talud "El Álamo", se aplicó la clasificación geomecánica Rock Mass Rating (RMR), propuesta por Bieniawski (1989), la cual considera cinco factores: a) resistencia de la matriz rocosa; b) el RQD (Rock Quality Designation); c) el espaciado; d) las condiciones de las discontinuidades; y e) las condiciones hidrogeológicas.

El segundo método que se empleó fue el Slope Mass Rating (SMR) de Romana (1985). En este método, es importante considerar el valor del RMR (calculado anteriormente) para poder integrarlo a la fórmula. El autor considera cuatro factores, tres de ellos están basados en la orientación e inclinación de las discontinuidades del propio talud, mientras que el cuarto factor está enfocado al tipo de excavación aplicada al talud.

La aplicación de estos dos métodos permitió valorar el estado del talud, así como la calidad del macizo rocoso, lo que facilitó identificar propuestas de mecanismos para su reforzamiento o, en su caso, estabilización. En adición, se utilizó el software Dips® el cual permitió conocer el número de familias, así como realizar el análisis cinemático para conocer los tipos de rotura presentes en el talud.

4. Resultados

4.1. Geomorfología

El talud en estudio tiene una longitud de 146 m, altura promedio de 24 m, su dirección es de 302° e inclinación de 75°. El material que se observó está definido por tres tipos: roca andesítica, brecha volcánica y un estrato de suelo (en la parte baja), lo que se puede apreciar en la Figura 2. El talud se ubica sobre la Sierra de Mil Cumbres, un área de bosque de pino, encino y matorrales con topografía muy accidentada; la elevación del lugar en estudio es de 2 450 m aproximadamente. En la superficie del talud se aprecia una capa vegetal delgada y en algunos lugares las raíces de los árboles se encuentran entre algunas de las discontinuidades, lo que ha provocado que su abertura sea más grande de lo normal. Sobre el mismo talud también se observó mucha vegetación del tipo matorral. En algunos sitios de rocas se ven plantas y sus raíces están dentro de las discontinuidades, lo que también ha provocado que se abra y debilite el entorno y que ingrese materia fina.

La presencia del agua sobre la superficie del terreno es evidente, ya que se observa circulando entre los planos de las discontinuidades, en algunos casos se aprecia goteando, en otros sitios solo se ve húmedo, mientras que en otros se puede ver un pequeño hilo

de agua. En el caso de la brecha, se pueden identificar zonas alteradas y muy húmedas, incluso lugares donde ya hubo pequeños desprendimientos de material. Los suelos, no son la excepción, pues se ubican algunos sitios irregulares y saturados, lo que permite suponer que se han presentado algunos movimientos de suelo.

En la Figura 3 se aprecia una de las zonas donde se hizo el levantamiento del fracturamiento (en rojo se señalan algunos de los planos de discontinuidad que se consideraron). En la parte baja se aprecia el contacto con un estrato de brecha volcánica. También se puede ver cómo la vegetación está creciendo entre las mismas discontinuidades, las cuales tienen aberturas entre 1 a 5 mm, con rellenos de arcilla o de limos arenosos. Asimismo, se puede observar que en algunos lugares de la pared de roca hacen falta algunos fragmentos de diferentes dimensiones, mismos que posiblemente ya se desprendieron.

En la cuneta que está al pie del corte, se observó material que se desprende del talud (suelo, arenas y gravas) y en algunos casos fragmentos de roca de dimensiones pequeñas; no obstante, del otro lado del camino se pueden ver fragmentos de roca más grandes (en promedio de medio metro de diámetro). De la misma forma, se identificaron sitios sobre el camino

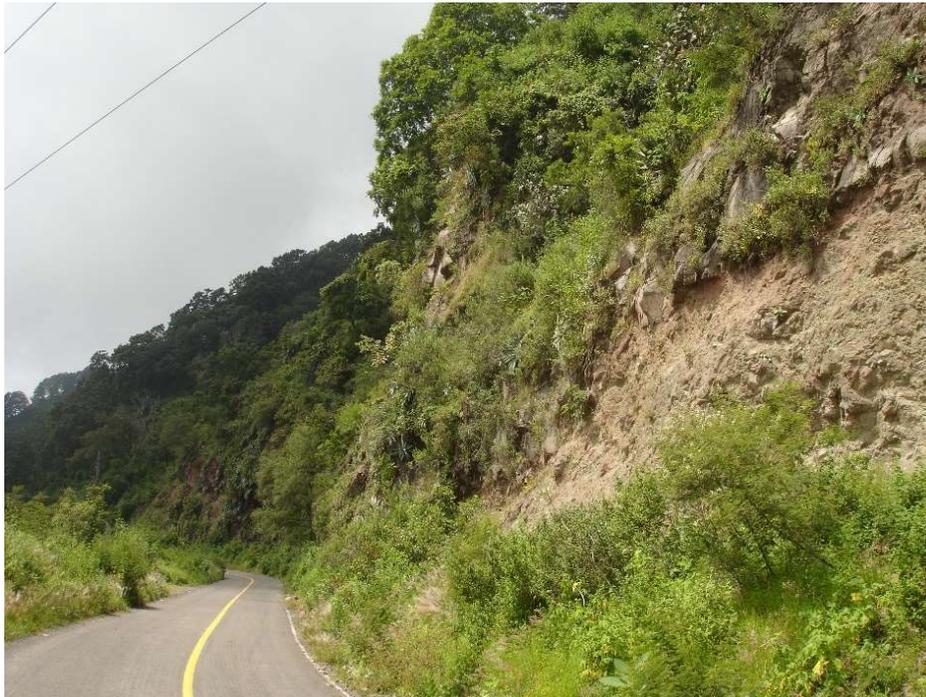


Figura 2. Vista longitudinal del talud “El Álamo”. Se aprecia la roca apoyada en un estrato de suelo (a la derecha de la imagen y arriba) y la espesa cobertura vegetal.

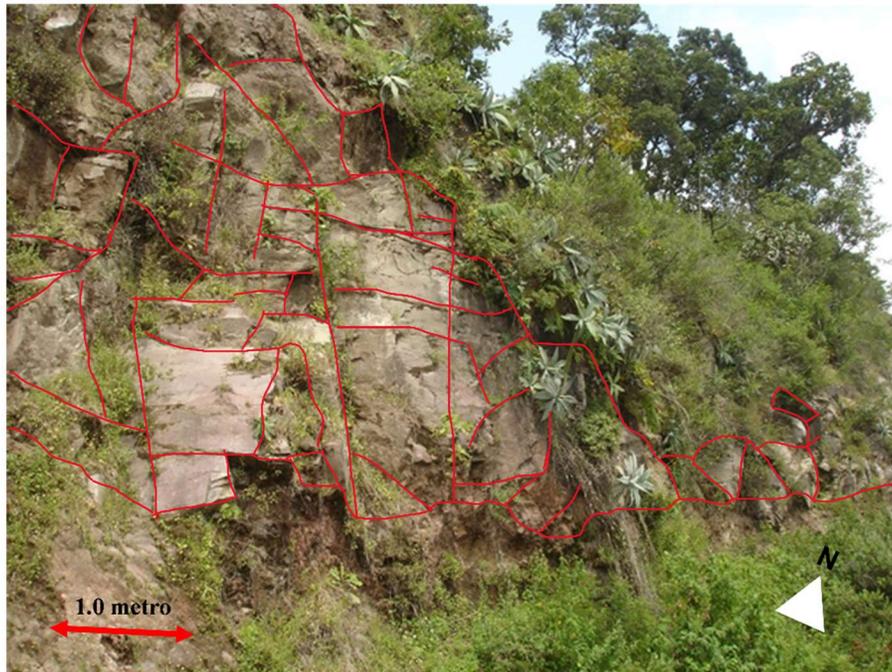


Figura 3. Macizo rocoso con sus planos de discontinuidad (en línea roja). En la parte baja está el contacto con la brecha volcánica y se aprecia la abundante cobertura vegetal.

que evidencian pequeños movimientos de la carpeta asfáltica (hundimientos), e incluso se aprecian los arreglos de mejoramiento de la carretera, así como de las guarniciones que se han movido o roto.

4.2. Trabajo de campo

En esta fase de campo y por facilidad, el talud se dividió en cuatro zonas para poder realizar el levantamiento de los planos de discontinuidad. De cada una de las zonas se obtuvieron los registros de: orientación, abertura, relleno y rugosidad. Las aberturas de las discontinuidades se midieron y son en promedio de 4 mm, con poco relleno proveniente de la capa vegetal y del deterioro de la misma roca. Sus rugosidades están en el rango de 6 a 8, tomando como referencia los perfiles de Barton y Chubey (1977). También se usó el esclerómetro de Schmitt para conocer la resistencia aparente del macizo rocoso, teniendo valores promedio de 110 MPa (las lecturas se tomaron en forma horizontal).

En la Tabla 1 se muestra el formato que se empleó para realizar el trabajo de campo; en la columna de persistencia se tienen dos nomenclaturas: la “r” que quiere decir discontinuidad contra otra roca y la “d” discontinuidad contra otra discontinuidad. En el

mismo formato se describe que la roca estaba decolorada u oxidada y con algo de humedad en su superficie. Algunos de estos valores se utilizaron para la aplicación de las clasificaciones geomecánicas y para el análisis cinemático.

4.3. Caracterización de la matriz rocosa

La caracterización de los materiales se hizo mediante ensayos de laboratorio, de acuerdo con las normas referidas en la metodología. La descripción del talud es la siguiente: en el extremo derecho superior e izquierdo superior, se apreció roca andesita de color rosa claro fragmentada y su rugosidad se valoró en baja. En la parte intermedia superior del talud se presenta brecha volcánica de composición andesítica de color café claro, altamente deteriorada.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de los resultados de la caracterización geotécnica del talud, donde se aprecia el tipo de prueba, su valor promedio y se incluyen los valores de la desviación estándar para cada prueba (más adelante se describen). Algunos de estos valores se utilizaron en las clasificaciones de Bieniawski y Romana (que se presentan más adelante).



Tabla 1
Ficha que se utilizó para realizar el levantamiento de discontinuidades (elaboración propia).

Datos generales								Levantamiento							
No. Ficha:	Uno			Realizó:	GHAA - JEAR			Inmersión (°):	302°						
Localidad:	El Álamo			Fecha:	20-sep-14			Inclinación (°):	75°						
Lugar:	km 31 carretera Mil Cumbres			No. Foto:				Altura (m)	24,00						
Intersección			Orientación		Persistencia		Abertura	Rugosidad		Resistencia		Relleno	Filtración		
No.	x	tipo	alfa	beta	termin.	traza	A	tipo	JRC	esclerómetro	degrad.	tipo	tipo	gasto	
	(m)	1)	(°)	(°)	2)	(m)	(mm)	3)	1 a 20	Mpa	orient.	5)	6)	7)	l/min
1	0,55	discon	195	55	d	1,0	4	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
2	0,90	discon	276	70	d	0,9	4	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
3	1,40	discon	350	88	r	1,2	4	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
4	1,95	discon	330	65	r	1,5	3	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
5	2,35	discon	190	70	r	1,3	3	plana	7	113	horiz	decolor	arcilla	humedo	
6	2,75	discon	305	50	d	0,7	4	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
7	3,20	discon	355	80	d	0,9	3	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
8	3,60	discon	253	83	d	0,8	5	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
9	4,20	discon	231	82	r	1,3	4	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	
10	4,95	discon	234	44	d	1,0	6	plana	7	125	horiz	decolor	arcilla	humedo	

4.3.1 Densidad, absorción y porosidad

La obtención de los valores de la densidad y de la absorción se hicieron conforme con lo estipulado por la norma ASTM C-127-04. El valor de la densidad para la andesita está entre 2.61 g/cm^3 y 2.70 g/cm^3 , para la brecha su rango es de 1.95 g/cm^3 a 2.04 g/cm^3 . De la misma forma se aplicó para la absorción y sus rangos fueron los siguientes: para la andesita de 1.12 % a 1.70 % y para la brecha de 16.56 % a 17.38 %.

Para la porosidad se aplicó la norma UNE-EN 993-1 y sus valores fueron: para la andesita se registraron entre 0.31 % y 0.47 %, en cuanto a la brecha quedaron entre 14.23 % y 16.046 %. De acuerdo con lo reportado, se observa que la porosidad de la andesita es muy baja, lo que hace que su densidad sea grande y tenga bajos niveles de absorción. En el caso de la brecha volcánica, su porosidad es muy alta, por lo que no sorprende que su densidad haya resultado baja y tenga una absorción alta.

Tabla 2
Resumen de los resultados de la caracterización geotécnica del talud, incluyendo su desviación estándar

Tipo de Prueba	Roca andesita		Brecha volcánica	
	Promedio	Desvest	Promedio	Desvest
Densidad (g/cm^3)	2.65	± 0.0636	1.98	± 0.0636
Absorción (%)	1.42	± 0.4101	17.07	± 0.5798
Porosidad (%)	0.40	± 0.1131	15.15	± 1.2799
Peso volumétrico seco (g/cm^3)	2.37	± 0.3677	1.76	± 0.1344
Durabilidad (%)	98.74	± 0.4313	4.82	± 0.2192
Resistencia a compresión (Mpa)	129.37	± 69.6854	4.47	± 1.8668
Ángulo de fricción básico (°)	43.00	± 4.9497	45.00	± 4.9497

4.3.2 Peso volumétrico seco en estado natural

La obtención del peso volumétrico seco en estado natural, se hizo por el método de la parafina, siguiendo el procedimiento de la norma SCT M-MMP-1-08/03. Los resultados fueron los siguientes: para la andesita entre 2.09 g/cm³ y 2.61 g/cm³, en cambio para la brecha, se registraron entre 1.69 g/cm³ y 1.88 g/cm³.

4.3.3 Prueba del índice de durabilidad

El índice de durabilidad se determinó mediante el ensayo de sequedad-humedad-desmoronamiento, acorde con la norma ASTM D4644-04. Para este estudio, se efectuaron cinco ciclos por tipo de material (andesitas y brechas). Los resultados registrados para la andesita fueron entre el 98.42 % y 99.03 %, lo que refiere a un índice de durabilidad alto, en cambio para la brecha fue entre 4.71 % y 5.02 %, indicándose como un índice de durabilidad muy bajo. En la Figura 4 se presenta el promedio del índice para cada tipo de material, lo que demuestra la dureza de la andesita y lo suave que es la brecha volcánica, principalmente en los últimos ciclos.

4.3.4 Ángulo de fricción básico

La prueba se aplicó de acuerdo con lo descrito en la norma USBR 6258-09. Para este estudio se analizaron 10 especímenes de cada zona y para cada material, considerando diferentes posiciones para obtener mejores resultados. Los valores obtenidos se registraron entre 40° y 47° para la andesita y para la brecha fue de 38° a 45°.

4.3.5 Carga puntual

Para la resistencia a la compresión uniaxial se tomaron muestras a lo largo del talud, siendo 22 especímenes de roca andesítica e igual número de muestras para la brecha volcánica. Una vez obtenidos los especímenes, se determinaron sus dimensiones y se procedió a ensayarlos, acorde con la norma ASTM D5731-05. Cada espécimen se llevó a la falla y se registró la carga máxima soportada, determinándose su resistencia a compresión uniaxial. La andesita presentó resistencias entre 86.46 MPa y 185.01 MPa, en cambio la brecha volcánica fue en el rango de 3.51 y 6.15 MPa. Con ello, se demuestra que la andesita es un material muy duro, mientras que la brecha volcánica es sumamente blanda y capaz de romperse incluso con un golpe del martillo de geólogo.

5. Clasificaciones geomecánicas

Las clasificaciones geomecánicas son métodos de uso generalizado que se han convertido en una herramienta habitual para el reconocimiento de los macizos rocosos en los que se van a proyectar y construir obras de ingeniería, como lo son taludes, túneles y obras subterráneas. Estas clasificaciones permiten evaluar el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos para estimar sus parámetros geotécnicos de diseño y en caso necesario, implementar mecanismos de sostenimiento como, anclajes, concreto lanzado, mallas, marcos metálicos para túneles y obras subterráneas, lo que contribuye a determinar el índice de calidad del macizo rocoso.

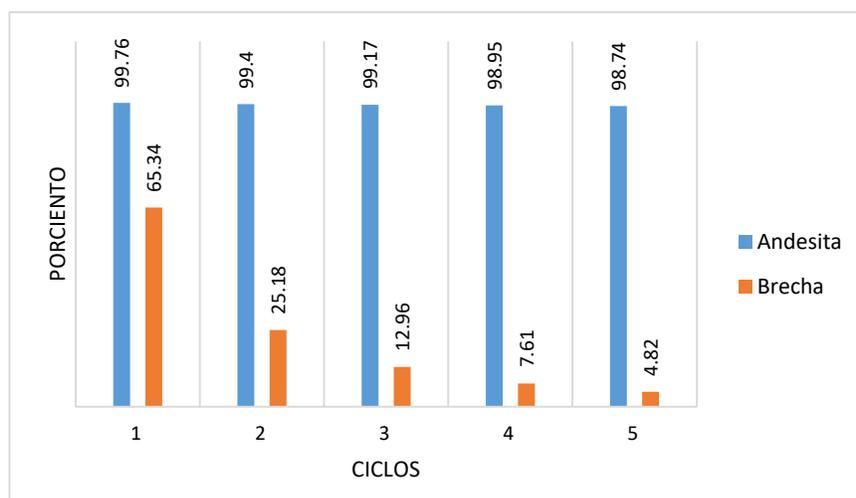


Figura 4. Valores en por ciento del índice de durabilidad para los cinco ciclos. Se aprecia que la andesita tiene una mayor dureza en comparación con la brecha que, después del segundo ciclo, disminuye considerablemente.

El empleo de las clasificaciones geomecánicas tiene como propósito obtener las características geotécnicas del macizo rocoso, lo que permite estimar la calidad y sus parámetros de resistencia, cohesión y ángulo de fricción. Asimismo, se debe considerar el número de familias de discontinuidades, orientación, echado o buzamiento, espaciado, persistencia, rugosidad y su comportamiento hidrogeológico, los cuales proporcionan ciertas propiedades mecánicas del sitio en estudio y que son básicas para estimar el tipo de técnica de excavación en taludes y túneles, así como el tipo de sostenimiento a utilizar.

5.1. Rock Quality Designation (RQD)

La calidad del macizo rocoso es un parámetro necesario que se emplea para realizar la clasificación por el método RMR. El índice de calidad de la roca o Rock Quality Designation (RQD), es un parámetro geomecánico establecido por Deere (1989) que define la correlación existente entre el RQD y la frecuencia del fracturamiento lineal. El RQD se calculó a través de la Ecuación (1).

$$RQD = 100e^{(-0.1\lambda)} (0.1\lambda + 1) \quad (1)$$

donde λ : Número de discontinuidades/longitud de la línea de muestreo.

Para el cálculo del RQD del talud en cuestión, se aplicó la Ecuación 1, considerando un muestreo a lo largo del sitio, dentro del cual se consideró el número de planos de las discontinuidades presentes en las cuatro zonas en las que se dividió el talud, obteniendo que para la zona 1, se tomaron 14 discontinuidades correspondientes a un RQD de 62.70 %; en la zona 2, se obtuvieron 17 discontinuidades equivalente a un RQD de 73.60 %; en la zona 3, se obtuvieron 10 discontinuidades que sería un RQD de 59.20 %; y finalmente, en la zona 4, se obtuvieron 19 discontinuidades correspondientes a un RQD de 73.60 %.

5.2. Parámetros JCS, JRC, ϕ_r y ϕ_b .

La resistencia de la pared de una discontinuidad influye en su resistencia al corte y en su deformación; esto depende del tipo de matriz rocosa, del grado de alteración y de la existencia de relleno. En discontinuidades sanas y limpias, la resistencia sería la misma de

la matriz rocosa, pero generalmente la resistencia es menor debido a la meteorización de las paredes.

El criterio de Barton y Chubey (1977) permitió conocer la resistencia de las discontinuidades en un macizo rocoso. Se trata de un criterio empírico, deducido a partir del análisis del comportamiento de las discontinuidades en ensayos de laboratorio, con el que se logró estimar la resistencia al corte en discontinuidades rugosas a través de la Ecuación (2), su resultado se presenta en la Tabla 3:

$$\tau = \sigma'_n \tan [JRC * \log_{10} (JCS/\sigma'_n) + \phi_r] \quad (2)$$

donde:

τ y σ'_n : esfuerzos tangencial y normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.

ϕ_r : ángulo de fricción residual.

JRC: coeficiente de rugosidad de la discontinuidad (Joint Roughness Coefficient).

JCS: resistencia a la compresión de las paredes de la discontinuidad (Joint wall Compresión Strength).

Para determinar el ángulo de fricción residual se consideró que, generalmente, la pared de la discontinuidad estaba alterada, por lo que el ángulo de fricción residual será inferior al ángulo de la roca sana ϕ_b . Para su evaluación se aplicó la Ecuación (3):

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 (r/R) \quad (3)$$

donde:

R: valor del rebote del esclerómetro o martillo Schmidt sobre una superficie de material sano y seco;

(r): valor del rebote del esclerómetro sobre la superficie de la pared de la junta en estado natural, húmedo o seco;

ϕ_b : ángulo de resistencia básico de la roca. Si las paredes de la discontinuidad están sanas, $\phi_r = \phi_b$.

Con los valores mostrados en la Tabla 3 y aplicando la ecuación 3, se obtuvo el ángulo de fricción que es requerido para el análisis cinemático de cada zona. Para esto se trazó una envolvente de falla no lineal que es usada para definir una línea de tendencia con la cual se determinó el ángulo de fricción residual, el cual está entre 24.50° y 36.10°.

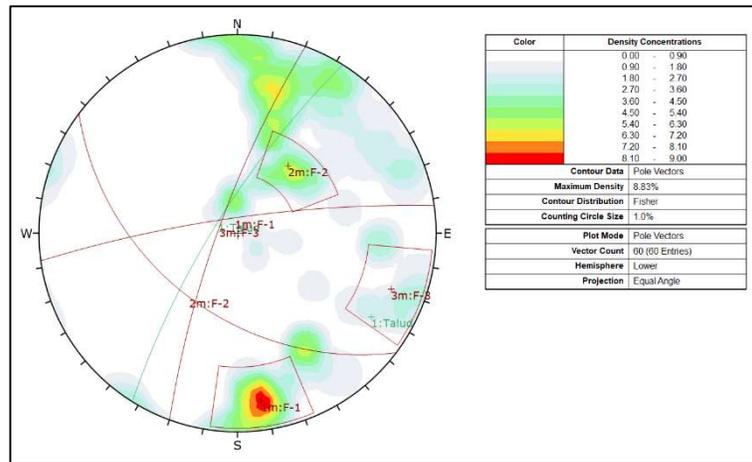


Figura 5. Aplicación de la proyección estereográfica a las discontinuidades del talud. Las líneas indican los planos de falla, además, se integra la dirección del talud.

Para la determinación de la resistencia a compresión simple (JCS) en las paredes de las discontinuidades, se utilizó el peso volumétrico de la roca y la lectura del esclerómetro en la roca alterada (r). Aplicando la Ecuación 4 se determinó el parámetro JCS. Los valores que se obtuvieron oscilan en 56.86 y 60.10 MPa.

$$\log_{10} JCS = 0.00088 * \gamma_{roca} * r + 1.01 \quad (4)$$

Para la determinación del coeficiente de rugosidad de las discontinuidades (JRC) se empleó el peine de Barton, cuya clasificación está en función de los perfiles de rugosidad que varían entre 1 y 20 (Barton y Chubey, 1977). Con ello, se obtuvo el parámetro JRC para cada zona, resultando que fue de 7. En la Tabla 3 se muestra el promedio de los parámetros obtenidos.

Tabla 3

Parámetros de resistencia aparente de los planos de las discontinuidades según el criterio de Barton y Chubey (1977).

Parámetro	Resultado
τ (MPa)	70.32
JCS (MPa)	44.66
JRC	7.00
ϕ_r (°)	31.77

5.3. Análisis cinemático con el Software DIPS

El análisis cinemático está regido por los diferentes tipos de rotura que condicionan el fracturamiento del macizo rocoso, basado en la orientación y la distribución de cada uno de los planos de las discontinuidades

del talud, lo que definió el tipo de rotura de acuerdo con los parámetros de resistencia y de la matriz rocosa. Para este caso, se usó el software Dips de Rocscience®, el cual permitió trabajar con una proyección estereográfica, donde se ingresaron el buzamiento y la dirección de buzamiento de cada discontinuidad del talud.

Para este estudio se consideraron 60 discontinuidades, en la Figura 5 se muestra el resultado del análisis empleando polos y el comando de contornos, lo que da como resultado tres familias más una dispersa que están indicadas con las formas de trapecio, las líneas representan los planos de falla, además, en la leyenda se presenta la densidad de los polos que está representado en colores.

Para conocer los tipos de rotura presentes en el talud, se empleó el mismo programa y con la misma información, por lo que se analizaron tres casos de fracturamiento, estos fueron: planar, cuña y vuelco. En la Figura 6 se muestran los resultados del estudio: en la imagen A se tiene una falla plana, donde se indica que hay dos casos de este tipo; la imagen B corresponde a una falla de cuña, presentándose más de 15 casos; y en la imagen C se representa una falla por vuelco donde se tienen cinco desprendimientos. Estos tres mecanismos de rotura serán empleados en la clasificación SMR de Romana (1985).

5.4. Rock Mass Rating (RMR)

El Rock Mass Rating es un sistema de clasificación de macizos rocosos que permite relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo ro-

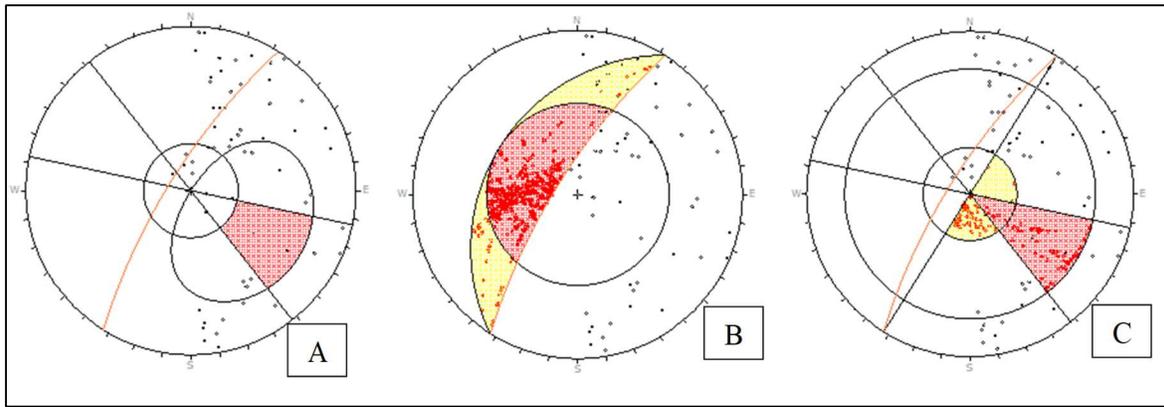


Figura 6. Resultados del fracturamiento del macizo rocoso de acuerdo con los tipos de rotura: A) plana, B) cuña y C) vuelco. Los puntos indican los polos de los planos de discontinuidad.

coso en excavaciones y túneles, lo que permite obtener mecanismos para la estabilización de taludes. La incidencia de sus parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad del RMR que varía de 0 a 100.

Para la aplicación de esta clasificación, se dividió el talud en zonas con características geológicas uniformes conforme con lo observado en campo y considerando sus propiedades de la matriz rocosa y de las discontinuidades, por lo que se consideraron cuatro zonas y, de acuerdo con los aspectos mencionados en la metodología y que ya se habían levantado en campo, se procedió a realizar la clasificación geomecánica aplicando la propuesta de Bieniawski (1989). En la Tabla 4 se muestran los resultados para cada zona, apreciándose que, en general, todas las zonas están muy próximas entre ellas, a excepción de la Z-2 que tiene un valor más bajo.

Tabla 4

Valoración del RMR de las cuatro zonas del estudio.

Zona	Z-1	Z-2	Z-3	Z-4
Puntaje	38	33	38	37

El promedio del puntaje fue de 36.5, lo que corresponde a una valoración en el rango de 21 a 40 (conforme con la tabla propuesta por el autor), esto se refiere a que el macizo rocoso tiene una clase IV. Además, el mismo autor proporciona información complementaria para el tipo de roca, como lo es el ángulo de fricción que está entre 15° y 25°, y una cohesión de 1 a 2 Kp/cm². Conforme con lo obtenido de la clasificación, el talud requiere mantenimiento a través de

mecanismos de estabilización tales como anclas, concreto lanzado, malla doble torsión, entre otros.

5.5. Slope Mass Rating (SMR)

La aplicación de las clasificaciones geomecánicas a los taludes permite evaluar empíricamente la estabilidad de una excavación. A partir de la clasificación RMR de Bieniawski (1989), Romana (1997) propuso la clasificación Slope Mass Rating (SMR) aplicada a taludes, considerando que la rotura de un talud rocoso puede ocurrir como consecuencia de su estructura y la litología de la roca. En la mayoría de los casos, la rotura de la masa rocosa está gobernada por los planos de discontinuidad que producen superficies formadas por uno o varios planos de discontinuidades.

Para emplear este método, primero se realizó el análisis cinemático del macizo rocoso para determinar los mecanismos de rotura a través del software Dips (mencionado en el apartado 5.3 de este mismo trabajo), ya que el SMR hace una corrección de los factores basados en estos mecanismos de rotura.

De acuerdo con los resultados, se menciona que todo el talud tiene la misma clase de roca y que corresponde a un tipo III, valorada como roca normal y que se considera el talud parcialmente estable, pero con algunas posibles roturas de cuña, por lo que se sugiere que se empleen algunos mecanismos sistemáticos y un tratamiento ocasional para estabilizarlo. Esta clasificación SMR se considera más realista, ya que toma en cuenta los movimientos de rotura que pueden presentarse en el macizo rocoso.

La Tabla 5 muestra una comparación de los resultados de los dos métodos de clasificación para macizos rocosos, RMR y SMR. En ella se aprecia el valor y

Tabla 5

Comparación de resultados entre la clasificación RMR y SMR del macizo rocoso, donde se indican las clases y sus puntajes. Están referidos a las propuestas de cada autor.

Zona	Bienawski		Romana	
	RMR	Clase	SMR	Clase
1	38	IV	50	III
2	33	IV	58	III
3	38	IV	63	III
4	37	IV	51	III

la clase asignada a cada zona de estudio, es decir, para el RMR se tiene una clase IV que corresponde a un macizo rocoso de mala calidad, en cambio, el SMR presenta una clase III, siendo un macizo rocoso normal. No obstante, en la aplicación de los dos métodos se sugiere que se coloquen mecanismos de sostenimiento para garantizar la estabilidad del talud.

6. Conclusiones

El talud “El Álamo”, con una longitud de 146 m y una altura promedio de 24 m, está compuesto principalmente por dos estratos: uno de roca andesita y el otro de brecha volcánica. En este estudio, se hizo la caracterización del material para cada estrato, dando los siguientes resultados: la roca andesita tiene densidad de 2.65 g/cm³, absorción de 1.42 %, porosidad de 0.40 %, peso volumétrico seco de 2.37 g/cm³, índice de durabilidad de 98.74 %, resistencia a compresión de 129.37 MPa y un ángulo de fricción básico de 43°. En cambio, para la brecha volcánica, los resultados fueron: densidad de 1.98 g/cm³, absorción de 17.07 %, porosidad de 15.15 %, peso volumétrico seco de 1.76 g/cm³, índice de durabilidad de 4.82 %, resistencia de 4.47 MPa y ángulo de fricción básico de 45°. Es importante mencionar que todas las pruebas fueron realizadas según lo establecido en la norma correspondiente.

Con la aplicación de las clasificaciones geomecánicas se obtuvo que para el talud el RMR de Bieniawski (1989), le otorga una calidad de la roca clase IV que indica roca de mala calidad, ángulo de fricción que está entre 15° y 25°, y una cohesión de 1 a 2 Kp/cm². En cambio, el SMR de Romana (1997), le otorga una clase III que corresponde a un talud normal y parcialmente inestable, además se recomienda un tratamiento sistemático.

Los resultados del análisis cinemático permitieron identificar tres familias más una dispersa, así como dos roturas planas, 15 roturas de cuña y cinco roturas por vuelco, por lo que el principal mecanismo será la rotura de cuña.

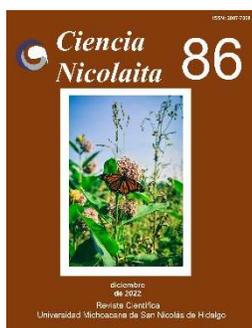
De acuerdo con los resultados de todo el estudio, se propone considerar para su estabilización el empleo de anclajes en las roturas planares, de cuña y de vuelco, con el propósito de evitar los caídos de bloques. De manera complementaria, también se propone colocar malla de doble torsión y concreto lanzado con colocación de drenes; asimismo, un muro de contención de gaviones, lo que ayudará a detener los fragmentos más pequeños para así impedir que alcancen el arroyo vial de la carretera.

Bibliografía

- American Society for Testing and Materials, C 127-04 Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM C127 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate -- eLearning Course, [consultado el 05 de octubre de 2022].
- American Society for Testing and Materials, D4644-04 Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks, ASTM D4644-04 - ASTM International - Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks Datasheet | Engineering360 (globalspec.com), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- American Society for Testing and Materials, D5731-05 Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock (astm.org), [consultado el 05 de octubre de 2022].



- Barton N.R. and Choubey V., 1977, The shear strength of rock joints in theory and practice: *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10, 1-54, (PDF) The shear strength of rock joints in theory and practice (researchgate.net), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Barton, N.R., 1976, The shear strength of rock and rock joints: *International Journal of rock mechanics and mining sciences & Geomechanics abstracts*, 13, 255-279, The shear strength of rock and rock joints - ScienceDirect, [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications. A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering: *John Wiley & Sons, Inc.* ISBN: 0-471-60172-1. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and ... - Z. T. Bieniawski - Google Libros, [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2014, "Monitoreo de laderas con fines de evaluación y alertamiento", Informe Técnico "Monitoreo de Laderas con Fines de Evaluación y Alertamiento" | Centro Nacional de Prevención de Desastres | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Comisión Federal de Electricidad (CFE), 2015, "Manual de diseño de obras civiles; Diseño por sismo, Recomendaciones", Manual de Diseño de Obras Civiles—Diseño por Sismo, notable logro de la ingeniería de México | Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Deere, D.U. and Deere, D.W., 1989, Rock quality designation (RQD) after twenty years. Contract Report GL-89-1. US Army Corps of Engineers: *Department of Commerce National Technical Information Service Springfield*, Deere, D.U. and Deere, D.W. (1989) Rock Quality Designation (RQD) after Twenty Years Contract Report GL-89-1. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg. - References - Scientific Research Publishing (scirp.org), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2000, "Carta de Tzitzio E14-A24", 702825649678.pdf (inegi.org.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Normalización Española UNE-EN-993-1:2018, "Método de ensayo para determinar la densidad aparente, la porosidad abierta y de la porosidad total", UNE-EN 993-1:2018 (Ratificada) Métodos de ensayo para producto..., [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Rocscience Inc, 2014, "Dips v8.0 – Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data", Dips - Graphical and Statistical Analysis of Orientation Data Software (cesdb.com), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Romana M., 1997, El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes: *IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada*, III, pp. 955-1011, (PDF) La clasificación geomecánica SMR: aplicación experiencias y validación (researchgate.net), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Romana, M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes: *International Symposium on the Role of Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics*, pp. 49-53, Romana, M. (1985) New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. Proceedings of International Symposium on the Role of Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics, Salzburg, 49-53 - References - Scientific Research Publishing (scirp.org), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Secretaría de Transporte y Comunicaciones (SCT), M-MMP-1-08/03, "Método de muestreo y prueba de materiales, masas volumétricas y coeficientes de variación volumétrica", Microsoft Word - M-MMP-1-08-03.doc (imt.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2009, "Carta geológica de Tzitzio E14-A24", TZITZIO E14-A24 (sgm.gob.mx), [consultado el 05 de octubre de 2022].
- USBR 6258-09, "Procedure for Determining the Angle of Basic Friction Using a Tilting Table Test", Microsoft Word - 6258_formatted.docm (usbr.gov), [consultado el 05 de octubre de 2022].



Ciencia Nicolaita 86

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Diseño de prensa hidráulica para reciclar polietileno de alta densidad (HDPE) en forma de placas

Hydraulic press design for recycling HDPE high-density polyethylene in plates form

Renato González Bernal*, Carlos Alfredo Zamudio Guerrero, Juan José Piña Castillo, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez, Francisco Israel Tinoco Reyes

Para citar este artículo: Renato González Bernal*, Carlos Alfredo Zamudio Guerrero, Juan José Piña Castillo, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez, Francisco Israel Tinoco Reyes, 2022. Diseño de prensa hidráulica para reciclar polietileno de alta densidad (HDPE) en forma de placas. Ciencia Nicolaita no. 86, 136-148. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi86.682>

Historial del artículo:



Recibido: 20 de agosto de 2022

Aceptado: 7 de octubre de 2022

Publicado en línea: diciembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: regonzalez@umich.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>



Diseño de prensa hidráulica para reciclar polietileno de alta densidad (HDPE) en forma de placas

Hydraulic press design for recycling HDPE high-density polyethylene in plates form

Renato González Bernal*, Carlos Alfredo Zamudio Guerrero, Juan José Piña Castillo, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez, Francisco Israel Tinoco Reyes

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Arquitectura, Maestría en Ordenamiento Territorial.

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Arquitectura.

Resumen

En este proyecto se diseñó una prensa hidráulica para realizar placas de hojuelas de plástico de polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado. Para llevar a cabo el diseño, se realizó un análisis de las presiones y de las temperaturas necesarias para poder darle la forma adecuada y que el plástico se aglomerara de manera correcta. Una vez conocidos estos datos, se calculó la fuerza necesaria que debía aportar el pistón hidráulico, fuerza con la cual se hizo un análisis del sistema hidráulico y se realizó el diagrama hidráulico, observando las funciones que se requerían. La fuerza de cierre de la prensa fue de hasta 676 KN, mientras que la temperatura con la cual entró el molde a la prensa fue de hasta 285 °C. Se comenzó por seleccionar la unidad de potencia, continuando con el actuador que fue un pistón de doble acción para comprimir y levantar la tapa de los moldes. Finalmente, en esta etapa se seleccionaron las mangueras y las válvulas de control.

Conocida la fuerza para la compresión, se determinaron los materiales que serían utilizados en la estructura de la prensa, seleccionándose preferentemente perfiles comerciales por su fácil adquisición, armado, mantenimiento y para reducir los costos de la estructura. Lograda la estructura tipo H de la prensa, se establecieron las dimensiones de las platinas que tendrán la función de distribuir la fuerza de compresión en los moldes de las distintas medidas. Finalmente, se realizó el diseño de la prensa hidráulica con ayuda de un programa de diseño asistido llamado SolidWorks®.

Palabras clave: reciclado, polietileno de alta densidad (HDPE), sistema hidráulico, platinas, prensa

Abstract

In this project, a hydraulic press was designed to make plates of high-density polyethylene plastic flakes (HDPE) recycled, an analysis of the pressures and temperatures necessary to be able to give it the appropriate shape was carried out, and the plastic agglomerates correctly. Once these data were known, the necessary force that the hydraulic piston should provide was calculated. With this force, an analysis of the hydraulic system was made and the hydraulic diagram was made observing the functions that are required. The closing force of the press is up to 676 KN and the temperature with which the mold enters the press is up to 285 °C. It began by selecting the power unit, continuing with the actuator, which would be a double action piston. to compress and lift the lid of the molds. Finally, at this stage the hoses and control valves were selected.

Knowing the force for compression, the materials used in the structure of the press were also determined. Commercial profiles were preferably selected for their easy acquisition, assembly, maintenance and to reduce the costs of the structure. Once the H-type structure of the press was achieved, the dimensions of the plates that will have the function of distributing the compression force in the molds of the different sizes were determined. Finally, the design of the hydraulic press was carried out with the help of an assisted design program called SolidWorks®.

Keywords: recycling, high density polyethylene (HDPE), hydraulic system, platens, press

Nomenclatura	
A_c = Área total de cada columna	R_{1y} = Fuerza cortante resultante en la dirección vertical
A_p = Área requerida del tornillo 1	R_p = Fuerza cortante directa
A_T =Área total requerida para las columnas	R_{T1} = Fuerza resultante total en el tornillo 1
d = Diámetro del tornillo	S = Módulo de sección
HDPE= Polietileno de Alta Densidad	S_u = Esfuerzo último
$M_{máx}$ = Momento máximo desarrollado en la viga	S_y = Esfuerzo de fluencia
N = Factor de seguridad	S_{ys} = Esfuerzo de fluencia a cortante
P = Carga total	t = Espesor mínimo de apoyo en la conexión de la viga-columna.
PP= Polipropileno	σ_d = Esfuerzo de diseño para cargas axiales
PVC= Policloruro de vinilo	σ_{dB} = Esfuerzo de diseño de apoyo
R_{1x} = Fuerza cortante resultante en la dirección horizontal	τ_d = Esfuerzo cortante de diseño

Introducción

El reciclado de los productos plásticos es un tema esencial que en los últimos años ha cobrado mucha relevancia. Se estima que estos residuos tardan entre 100 y 1000 años en degradarse (Redes Leonardo, 2019), de allí que el reciclaje de botellas de polietileno de alta densidad (HDPE) y polipropileno (PP), estén cobrando un interés muy particular y representen otra importante sección en el mercado del reciclaje, ya que

a partir de estos residuos se puede obtener una amplia variedad de productos y aplicaciones finales con un retorno de inversión financiero interesante y valioso (Justo Irene, 2008).

Debido a la necesidad de encontrar soluciones para manejar los desechos plásticos, se han desarrollado diversas técnicas de reciclaje, ya que como hay diferentes tipos de plásticos, la separación y reutilización también es distinta. En este sentido, el reciclaje de plásticos puede ser físico, químico, térmico y, en

último caso, para disposición final en un relleno sanitario. En el caso específico del HDPE, el único proceso que no se recomienda es el reciclaje químico, ya que en términos económicos y medioambientales, no es factible, por lo que se recomiendan los reciclajes mecánico y térmico (Roca, 2016).

El reciclado mecánico consiste en varias fases, a saber: lavado y limpieza, clasificación, trituración, entre otras; una vez terminadas todas estas fases, el plástico está preparado para convertirse en nuevos productos mediante la aplicación de diferentes métodos, como extrusión, inyección, moldeo por compresión, etc. En este último, el material bien líquido o en forma de polvo, grana o de pastilla preformada (preforma), se coloca en el molde caliente, el cual se cierra lentamente hasta que las dos mitades del molde ejercen presión sobre el material. Conforme el molde va cerrándose, el material es obligado a ocupar todas las partes de la cavidad de moldeo. Bajo la acción conjunta del calor y la presión, tienen lugar las reacciones de entrecruzamiento que transforman al material termoendurecible en termoestable, proceso que se conoce vulgarmente como “curado”. Tras el curado se abre el molde y se extrae la pieza totalmente sólida, que solamente alcanza su rigidez definitiva cuando se ha enfriado totalmente. Cuando la pieza tiene forma complicada o grandes dimensiones, es aconsejable colocarla en conformadores después de extraerla del molde, para así evitar que se deforme mientras se enfría (Beltrán y Marcilla, 2012).

El HDPE es un polímero proveniente del petróleo y es uno de los plásticos más utilizados para la fabricación de artículos de todo tipo. Una de las características del HDPE que más destacan es su resistencia, ya que es un material fuerte y duro lo que lo hace muy resistente, pero que a la vez resulta flexible para la elaboración de juguetes, envases, botellas, tapas, etc. También puede contener materiales peligrosos o corrosivos como algunos ácidos, pesticidas, etc. Asimismo, soporta tanto temperaturas altas como bajas. Su composición hace que su tiempo de vida sea extendido, además de ser un material 100 % reciclable (MAXIPET, 2020).

En este contexto, el presente trabajo desarrolla el diseño mecánico de una prensa hidráulica para crear placas de plástico reciclado de polietileno de alta densidad (HDPE) y/o polipropileno (PP) utilizando el mé-

todo de moldeo por compresión, para lo cual es necesario el uso de una máquina llamada prensa hidráulica, la cual funciona aplicando una pequeña fuerza de entrada que será amplificada por el fluido para obtener determinada fuerza de salida. Una prensa hidráulica moderna se compone básicamente de estructura, sistema hidráulico, sistema eléctrico y sistema de potencia (Díaz del Castillo Felipe, 2012). El objetivo final de un diseño mecánico, es obtener un producto útil que satisfaga las necesidades industriales o de un cliente, que sea seguro, confiable, económico y de manufactura práctica (Redes Leonardo, 2019).

Si reciclamos el plástico, estaremos consumiendo una menor cantidad de materia prima y de recursos naturales y energéticos no renovables, con lo cual se evitará, en cierta forma, que estos se agoten. En este sentido, diseñar un equipo que sirva para reciclar plástico y dar nuevos usos, como es el caso de las placas de plástico reciclado que de manera particular que se plantea en este trabajo, contribuirá con el medio ambiente. Las placas son idóneas para múltiples aplicaciones, el límite de sus usos está en la imaginación y creatividad; además, una ventaja más es que sus residuos de corte o sobrantes se pueden volver a reciclar para ser usadas en nuevas aplicaciones.

Antecedentes

Fue en el año 1800, cuando el químico Jöns Jacob extrajo y aisló por primera vez un polímero natural, acuñando también el término. Tres décadas después, el físico y químico galo, Henri Victor Regnault, logró la primera transformación del policloruro de vinilo en PVC mediante la polimerización, siendo el plástico más producido en el siglo XX. Por su parte, en 1839, Charles Goodyear descubrió la vulcanización del caucho natural. Hacia finales de la primera mitad del siglo, Frederick Walton creó el linóleo, un plástico fabricado a partir de la mezcla de aceite de lino y serrín o corcho sobre un textil grueso. Para 1879, M. Gray patenta el primer extrusor, ya con diseños más adecuados y con muchos de los elementos que tienen las extrusoras actuales. Finalmente, en 1899, Hans Von Pechmann sintetizó, por casualidad, el polietileno.

El uso del plástico en el siglo XX avanzó conforme avanzaron las tecnologías, es así como en 1908 se creó el moldeo por compresión para plásticos, cuando Leo



Figura 1. Etapas del proceso de fabricación de placas.

Baekeland desarrolló las resinas de fenol-formaldehído, que siguen empleándose hoy en día. Por su parte, en 1936 se comenzó con la producción del ABS, el plástico de alta resistencia mecánica más utilizado en la industria de la automoción (López *et al.*, 2020). Iniciando la segunda mitad del siglo XX, el químico alemán Karl Ziegler desarrolló el polietileno, mientras que el italiano Giulio Natta desarrolló el polipropileno, ambos los plásticos más utilizados en la actualidad. En 1963, estos científicos compartieron el Premio Nobel de Química por sus estudios acerca de los polímeros (Martínez *et al.*, 2020). En esta misma década, específicamente en 1967, fue desarrollada por el ingeniero de Dupont Nathaniel Wyeth, la botella de plástico que resiste grandes presiones.

El avance del uso de plásticos generó problemas medioambientales propiciados por la acumulación de desechos, de allí que en 1970 se conmemoró por primera vez el Día de la Tierra, dedicado a crear conciencia con respecto a este problema; asimismo, y para poner en valor la importancia del reciclaje, se crean las 3R: reciclar, reemplazar y reutilizar (Barral, 2020). Esta concientización llevó a que a partir de la década de 1980, la industria del plástico liderara una iniciativa que alentó a recolectar y procesar los plásticos usados como parte de sus sistemas de gestión de residuos.

En el siglo XXI el plástico sigue dando de qué hablar, y es que en 2016 investigadores japoneses descubrieron en vertederos una nueva especie de bacteria bautizada como Ideonella Sakainesis, la cual se alimenta del plástico de las botellas y envases al secretar un par de enzimas capaces de descomponer en solo seis semanas el tereftalato de polietileno (PET). Asimismo, según el informe titulado Plastics the facts

2018, publicado por *Plastics Europe*, en 2017 la producción mundial de plásticos alcanzó los 348 millones de toneladas y creció 3.8 % con respecto a 2016. En este contexto, destacan las siguientes cifras regionales de producción de plásticos: Asia 50.1 % (incluye a China como el mayor productor con 29.4 %), Europa 18.5 %, Norteamérica (Canadá, EUA y México) 17.7 %, Oriente Medio y África 7.1 %, América Latina 4 % y la Comunidad de Estados Independientes formados por las exrepúblicas soviéticas con 2.6 % (Martínez A. *et al.*, 2020).

Metodología

Descripción del método: Etapas del proceso de fabricación de placas

Una vez que el material reciclado es lavado y triturado, pasa por una máquina de llenado de los moldes; una vez lleno, este se enrasa y pasa a un horno eléctrico el cual calienta el material a temperaturas de hasta 285 °C; en estado de fundición, el material pasa a la prensa de compactado que le dará la forma a la placa; finalmente, una vez enfriada la placa se extrae (ver Figura 1).

Específicamente en este trabajo se diseña la parte del proceso de la prensa hidráulica que servirá para el compactado del material. Las presiones para el compactado de plástico varían desde uno hasta 6.8 MPa; el calor que se aplica tiene como rangos de temperatura de 225 °F a 325 °F (107 °C a 163 °C); y los ciclos pueden variar desde menos de un minuto a 15 minutos (Sinchi G., 2018; Díaz del C., 2012; ver Figura 2).

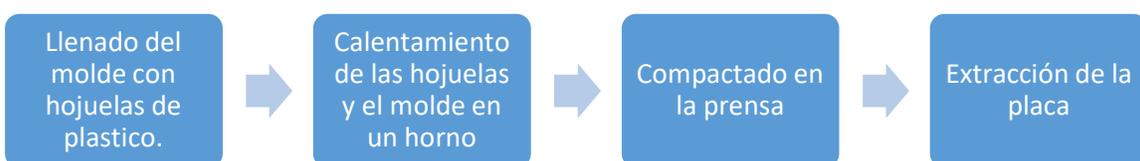


Figura 2. Etapas del proceso de compactado.

Selección del tipo de prensa y características

Se selecciona diseñar una prensa con estructura cerrada tipo H de doble acción con una capacidad de 676 kN (Figura 3), la cual tendrá un desplazamiento de la platina inferior de 304.8 mm de carrera. El objetivo del diseño de la prensa, es elaborar placas de plástico reciclado de 600 x 600 mm, con una presión máxima de cierre de 1.6 MPa, y una producción de cuatro placas/hora.

Para que el resultado del trabajo se realice en óptimas condiciones, es necesario controlar la prensa por medio de componentes que, al momento de realizar cada uno sus funciones de manera coordinada, hagan que funcione automáticamente. Estos componentes son:

Grupo de actuación. Se selecciona un actuador lineal de doble acción con una capacidad de hasta 68.95 MPa.

Grupo de generación. Se selecciona una unidad de potencia de mediana presión con una capacidad de hasta 20.7 MPa y un flujo de 6.5 gpm.

Grupo de conexión. Se selecciona una manguera de 7.9 mm de diámetro interno y una presión máxima de trabajo de 20.7 MPa.

Grupo de control. Se cuenta con cinco válvulas, a saber: una válvula estranguladora; dos válvulas de tres vías y dos posiciones que permiten, indirectamente, el control de avance y de retroceso del actua-



Figura 3. Prensa tipo H.

dor; una válvula de dos vías y dos posiciones que permite que el retroceso del actuador sea más rápido que el avance; y una válvula de cuatro vías y dos posiciones que será la que directamente va a controlar el avance o retroceso del actuador, esta válvula a su vez es controlada por las dos válvulas de tres vías dos posiciones, este se muestra en las figuras 4 y 5.

En un principio la prensa se encuentra normalmente abierta, esto quiere decir que el actuador o cilindro de doble efecto dentro del circuito hidráulico, se encuentra contraída (Figura 4). Una vez que se acciona la válvula de tres vías y dos posiciones que en el diagrama se encuentra del lado izquierdo, el fluido comienza a realizar su recorrido de tal manera que llega hasta la válvula del control del estado de la prensa o del cilindro de doble efecto y la cambia de posición.

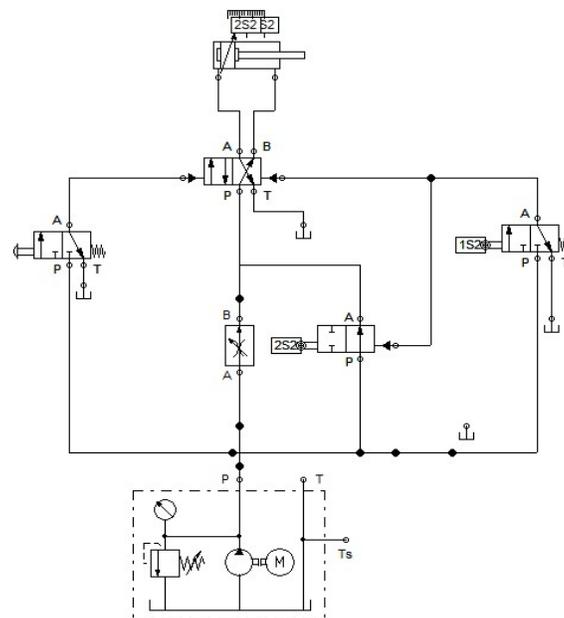


Figura 4. Diagrama del circuito hidráulico.

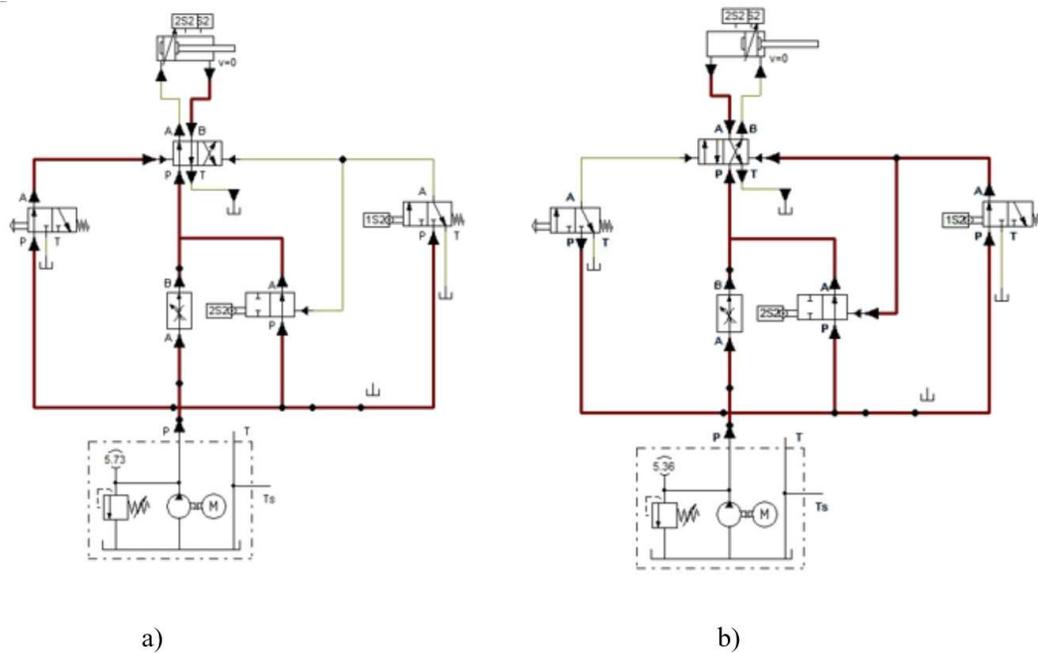


Figura 5. Circuito hidráulico con diferentes posiciones: a) Válvula de control activada, comienzo de trabajo del circuito hidráulico, b) Activación de válvula para la contracción del cilindro.

Cuando la válvula de control de cuatro vías y dos posiciones cambia su posición, el fluido realiza su recorrido hasta el actuador empujando el émbolo para que el vástago comience a salir y la prensa empiece a realizar su trabajo (Figura 5a). Al terminar su recorrido el vástago, la prensa se encuentra en un estado normalmente cerrado, lo que indica que el trabajo está realizado (Figura 5b). Después, el sensor que indica el final de la carrera del vástago, activa la válvula de tres vías y dos posiciones que en el diagrama se encuentra del lado derecho del circuito, lo que hace que el fluido realice otro recorrido para cambiar a la posición inicial la válvula de control del estado de la prensa. En ese punto, el fluido empuja de nuevo al émbolo para que el vástago se contraiga dentro del cilindro. Conforme el émbolo es empujado más adentro del cilindro, las válvulas vuelven a sus posiciones iniciales preparándose para un nuevo ciclo.

Selección del material

La estructura de la prensa se realiza con acero A36, el cual tiene las propiedades indicadas en la tabla 1.

Dimensionamiento de elementos principales

Un miembro, sometido a carga, falla cuando se rompe o deforma en exceso, lo que lo hace inaceptable para el propósito pretendido. Por ello, es esencial que el nivel del esfuerzo aplicado nunca exceda la resistencia máxima a la tensión o la resistencia a la cedencia del material. El esfuerzo de diseño, es ese nivel de esfuerzo que puede desarrollarse en un material al mismo tiempo que se garantiza que el miembro cargado es seguro. El factor de seguridad (N) es un número entre el cual se divide la resistencia reportada de un material para obtener el esfuerzo de diseño (σ_d), y para su cálculo se utilizan las siguientes ecuaciones, basado en resistencia a la cedencia (Mott, 2009).

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} \tag{1}$$

basado en resistencia máxima

$$\sigma_d = \frac{S_u}{N} \tag{2}$$

Tabla 1 Propiedades del acero A36 (Mott, 2006).			
Material ASTM núm.	Resistencia Máxima s_u	Resistencia a la cedencia S_y	Porcentaje de alargamiento en 2 in
A36	400 MPa	248 MPa	21
4140 OQT 700	ND	1462 MPa	ND

Por su parte, para el diseño del marco de la prensa como una viga que se encuentra apoyada en sus ex-

Tabla 2
Factores de diseño de acuerdo al tipo de material y carga aplicada.

la carga	ductil	fragil
Estática	$\sigma_d = s_y/2$	$\sigma_d = s_u/6$
Repetida	$\sigma_d = s_u/8$	$\sigma_d = s_u/10$
Impacto o choque	$\sigma_d = s_u/12$	$\sigma_d = s_u/15$

hidráulica se consideró que este está sometido a esfuerzo del tipo estático, ya que los elementos se someterán a una carga aplicada lentamente, sin choque y con un valor constante (Mott, 2006).

El esfuerzo de diseño calculado de los elementos sometidos a carga axial o flexionante, se determinó considerando un factor de diseño de $N=3$, ya que la carga es estática y el material seleccionado es dúctil; no obstante, se considera un poco mayor debido a que pueden existir cambios de carga a lo largo del tiempo que no se estén considerando:

$$\sigma_d = \frac{S_y}{N} = \frac{248}{3} = 82.7 \text{ MPa} \quad (3)$$

Ahora determinamos el área de sección transversal mínimo exigido de la sección requerida:

$$A_T = \frac{P}{\sigma_d} = \frac{676000N}{82.7 \text{ N/mm}^2} = 8174.1 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

La estructura de la prensa divide la carga total en cuatro columnas, por lo cual el área mínima necesaria en cada una de las columnas es:

$$A_c = \frac{A_T}{4} = 2044 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

Se selecciona utilizar perfiles del tipo Canal para las columnas. Cada columna de la prensa estará constituida por dos canales C152 x 12.2 con un área total de 3084 mm^2 (Frías, 2002). Para determinar la longitud de las columnas se tomó en cuenta el cilindro hidráulico seleccionado, la carrera del pistón, los espesores de las platinas, el ancho de la viga y la altura de la pieza llamada distribuidor, dando como resultado 1700 mm .

Para el elemento sometido a flexión, el cual tiene una longitud de 800 mm , se analiza simplemente

tremos sometida a una carga uniformemente distribuida en la parte central, tal como se indica en la figura. Se obtiene el valor máximo del momento y se dimensiona el elemento conociendo el esfuerzo de diseño del material (ver Figura 6).

$$S = \frac{M_{\text{máx}}}{\sigma_d} = \frac{36000}{82.7} = 4.35 \times 10^5 \text{ mm}^3 \quad (6)$$

Se propone usar dos canales C 254 x 22.76 (Frías, 2002) en forma de cajón con un módulo de sección de $4.42 \times 10^5 \text{ mm}^3$ para resistir esta carga.

Diseño de pernos de conexión

Cuando los miembros se someten a esfuerzos cortantes, el diseño debe basarse en el esfuerzo cortante de diseño (τ_d). Para la resistencia a la cedencia a cortante, una estimación frecuentemente utilizada es:

$$S_{ys} = \frac{S_y}{2} \quad (7)$$

Para un tornillo de acero 4140 OQT 700, el esfuerzo mínimo de tensión es de cedencia $S_y = 1462 \text{ MPa}$

$$\tau_d = \frac{S_y}{2N} = \frac{1462}{2(4)} = 182.75 \text{ MPa} \quad (8)$$

La junta considerada será una junta excéntrica cargada y se calculará la distribución de las fuerzas entre los sujetadores. Consideraremos el efecto del par en el sujetador. La figura muestra la conexión propuesta entre la columna y la viga. La fuerza neta está dirigida hacia arriba a una distancia de A del centro del patín de la columna. La fuerza total se compone de la fuerza cortante y del momento producido por las fuerzas (Mott, 2009).

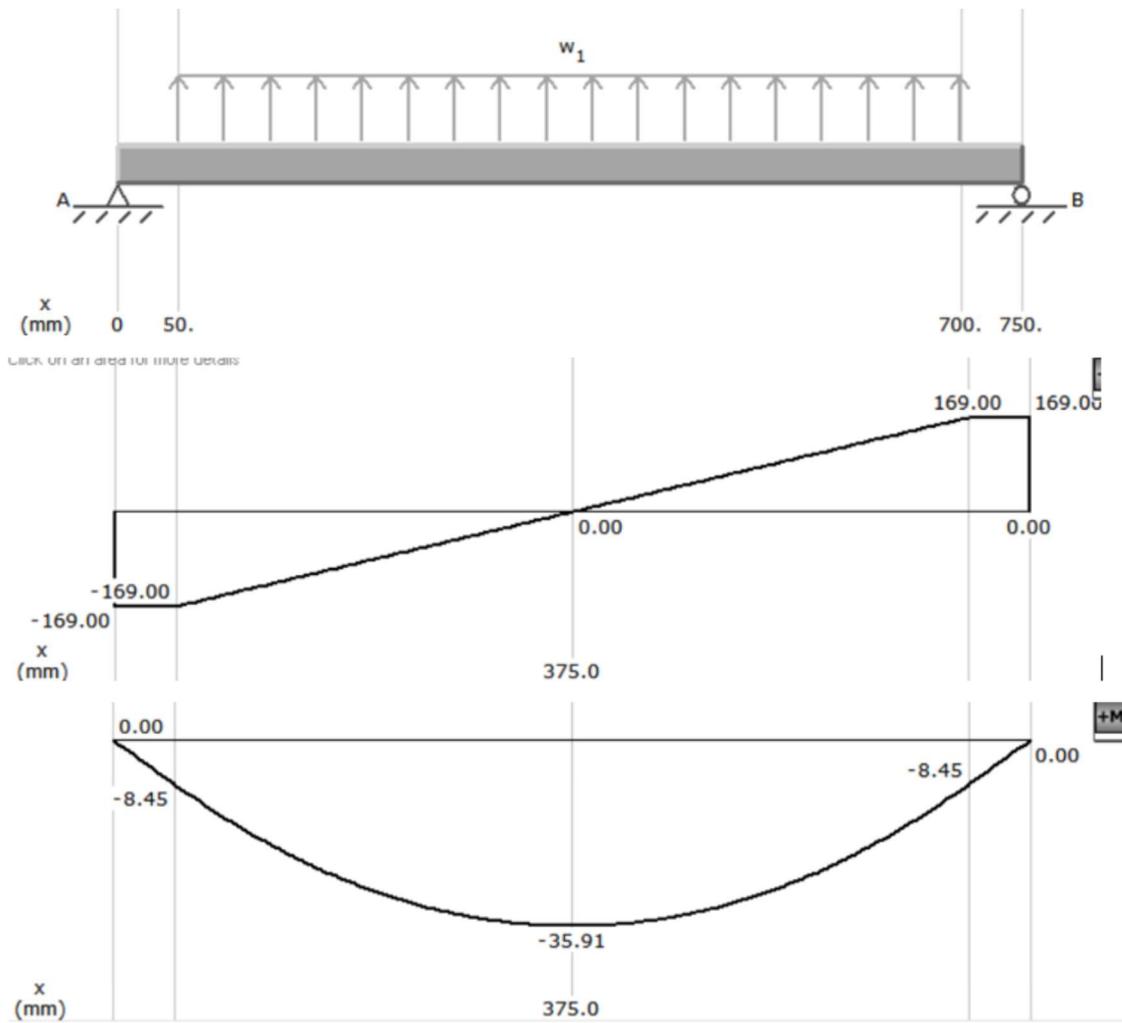


Figura 6. Diagrama de distribuciones de la fuerza sobre las vigas de la prensa, diagrama de fuerza cortante (kN) y momento flexionante (kN m).

Analizando el tornillo 1 situado abajo a la derecha:
La fuerza cortante directa \$R_p\$ es:

$$R_p = \frac{676}{48} = 14.08 \text{ kN} \quad (9)$$

Fuerzas que resiste el momento:

$$R_{1x} = \frac{M_{y1}}{\Sigma(x^2+y^2)} = \frac{27.7(61.5)}{24.729} = 68.9 \text{ kN} \quad (10)$$

$$R_{1y} = \frac{M_{x1}}{\Sigma(x^2+y^2)} = \frac{27.7(40)}{24.729} = 44.8 \text{ kN} \quad (11)$$

$$R_{T1} = \sqrt{R_{1y}^2 + R_{1x}^2} = \sqrt{58.8^2 + 68.9^2} = 90.57 \text{ kN} \quad (12)$$

$$\tau_d = \frac{R_{T1}}{A} \quad (13)$$

$$A = \frac{R_{T1}}{\tau_d} = \frac{90.57}{182750} = 495 \text{ mm}^2 \quad (14)$$

El diámetro del perno:

$$d = \sqrt{\frac{4R_i}{\pi\tau_d}} = 25.1 \text{ mm} \quad (15)$$

Se propone utilizar un diámetro de 1 pulgada (25.4 mm) para los pernos de conexión entre las columnas y las vigas (Figura 7).

Una vez determinadas las fuerzas máximas en las conexiones, se analizan los esfuerzos de apoyo de ellas. De acuerdo al Instituto Americano de Construcción de Acero AISC, el esfuerzo de apoyo no deberá exceder \$\sigma_{db} = 0.90s_y\$ (Mott, 2006).

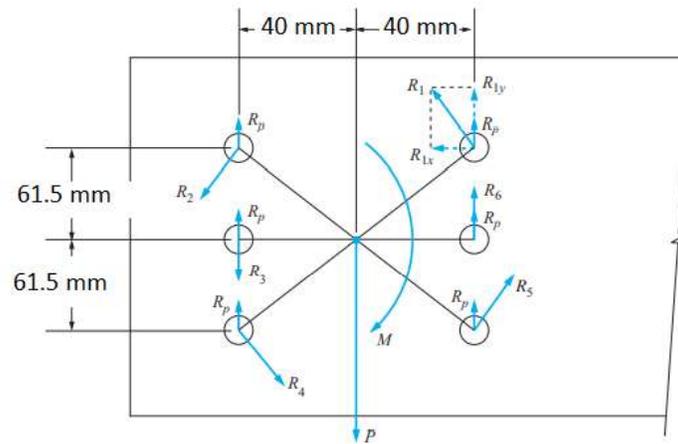


Figura 7. Conexión propuesta entre columnas y vigas.

$$\sigma_{db} = 0.90(248) = 223.2 \text{ MPa} \quad N = 1.11 \quad (16)$$

Se analiza el espesor t mínimo requerido para soportar la fuerza de 90.57 KN, para lo cual se realiza el siguiente cálculo:

$$t = \frac{R_{t1}}{\sigma_{db} D} = \frac{90.57}{(223200)(0.0254)} = 16 \text{ mm} \quad (17)$$

Analizados los espesores en el alma de los perfiles seleccionados, se observa que necesitan ser reforzados, por lo que se propone una placa de refuerzo de 12.7 mm de espesor en cada uno de los canales.

Resultados

Los resultados de esfuerzos obtenidos después del cálculo de diseño de los elementos, se pueden observar en la tabla 3, donde se muestra que estos elementos críticos cumplen con los factores de diseño seleccionados para la carga a la cual van a estar sometidos. Finalmente, se agrega una descripción de otros elementos que componen la prensa hidráulica.

Diseño de otros componentes de la máquina

Platinas. Estas se harán de placas de acero A36 de 650 x 650 mm y 2 pulgadas de espesor, las cuales tendrán la función de distribuir uniformemente la presión al molde para la fabricación de láminas de plástico reciclado, además de ayudar a soportar la carga. Estas placas se unirán a la parte de la viga, a la cual se le soldará un ángulo perforado como se muestra en la figura 7, mediante pernos en sus vértices con cabeza avellanada, ya que se requiere que la superficie sea

lisa. Al utilizar estas platinas, el módulo de sección para soportar la carga de flexión en la viga superior e inferior, aumentará hasta obtener un valor del módulo de sección $S=7.29 \times 10^5 \text{ mm}^3$, cumpliendo los requisitos mínimos de resistencia de la estructura.

Elemento	Esfuerzo real (MPa)	Factor de diseño real
Columna	55.46	N= 4.4
Viga	81.39	N=3.04
Tornillos	178.74	N=8.18
Apoyo con placa de refuerzo (viga)	189.66	N=1.30
Apoyo con placa de refuerzo (columna)	200.55	N=1.23

Placas sujetadoras de columna. Estas se localizan en los extremos de las columnas y proporcionan rigidez, además de eliminar cualquier desplazamiento de separación entre ellas. Estas se sujetarán a los perfiles de canal por medio de pernos.

Distribuidor de presión. Este elemento se acopla al cilindro hidráulico, su función es la de distribuir la fuerza a las platinas.

Refuerzos centrales. Este refuerzo se localiza entre las vigas y tiene como función dar rigidez y mayor resistencia a las platinas superior e inferior, así como im-

pedir la deformación. Se conectan con las vigas mediante pernos.

Modelado

Desde hace muchos años, ingenieros, dibujantes y diseñadores han utilizado las computadoras para realizar cálculos matemáticos; sin embargo, a mediados del siglo XX, las computadoras se comenzaron a utilizar para elaborar diseños, es por eso que hoy en día se han convertido en un factor importante para producir, modificar y transmitir dibujos originales (Ca-reaga, 2017).

Para conseguir un producto final es necesario realizar el primer paso: el diseño. En la industria actual se hace a través del CAD, diseño que consiste en el uso de sistemas informáticos para la creación o modificación de representaciones gráficas de un producto físico en dos o tres dimensiones. Esta tecnología tiene como función principal realizar la geometría del diseño, ya sea pieza o circuito, calculando sus propiedades físicas y el modelado. Este paso es importante para poder pasar al segundo: la fabricación.

Para el modelado de los elementos que componen la prensa y su ensamblado, se utilizó el software Solidworks® como se muestra en las figuras 8 y 9.

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló el diseño mecánico de una prensa hidráulica que tiene como función crear placas de plástico reciclado de HDPE y/o PP,

utilizando el método de moldeo por compresión. Para llevar a cabo dicho diseño, se comenzó por analizar las presiones requeridas para conformar las placas de HDPE reciclado. Posteriormente, se realizó el diseño de control de la prensa y con ayuda de un software SolidWorks® se realizó el esquema, una vez seleccionados los elementos que componen el control, se elaboró el diseño de la prensa tipo H, considerando que se encuentra sometida a cargas estáticas con lo que se determinó utilizar un factor de diseño de $N=3$ para la viga y las columnas. Asimismo, se seleccionaron perfiles comerciales de acero A36, para facilitar la elaboración de la prensa.

Seguidamente se determinaron los esfuerzos una vez seleccionados los perfiles, dando como resultado factores de diseño mayores a los seleccionados. Luego, se realizó un análisis para determinar la carga máxima que debían soportar los pernos que conectan la columna con la viga; hecho esto, se seleccionó el material acero 4140 y se determinó el diámetro de estos. Posteriormente se analizaron los esfuerzos de apoyo en las conexiones entre las columnas y las vigas, observándose que se necesita aplicar un refuerzo, para lo cual se sugiere utilizar una placa de $\frac{1}{2}$ pulgada de espesor en acero A36, con lo cual cumpliría el esfuerzo permisible de apoyo sugerido por la AISC.

Finalmente, se utilizó un software para la elaboración del modelado de los componentes de la prensa y para el ensamblaje, programa que permite observar el montaje correcto de las piezas y el funcionamiento requerido de la prensa.

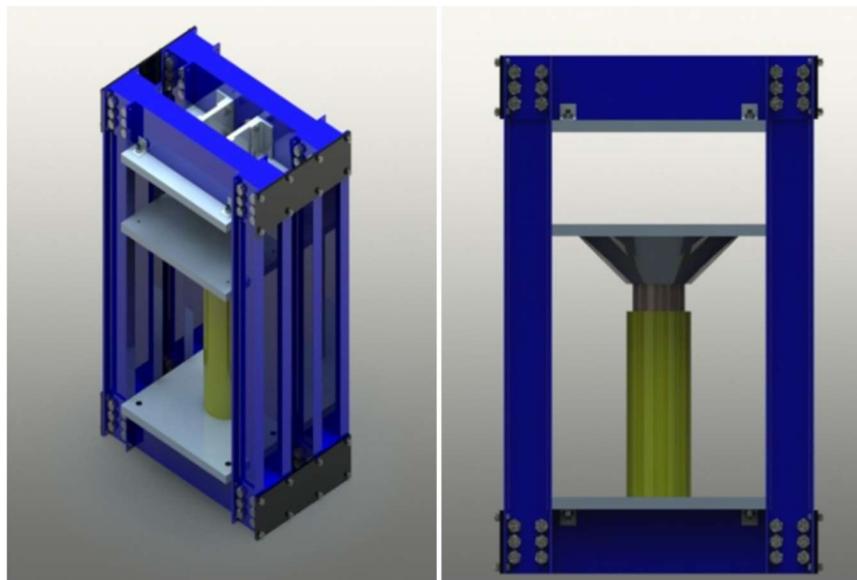


Figura 8. Modelado de prensa tipo H con platinas en SolidWorks®.

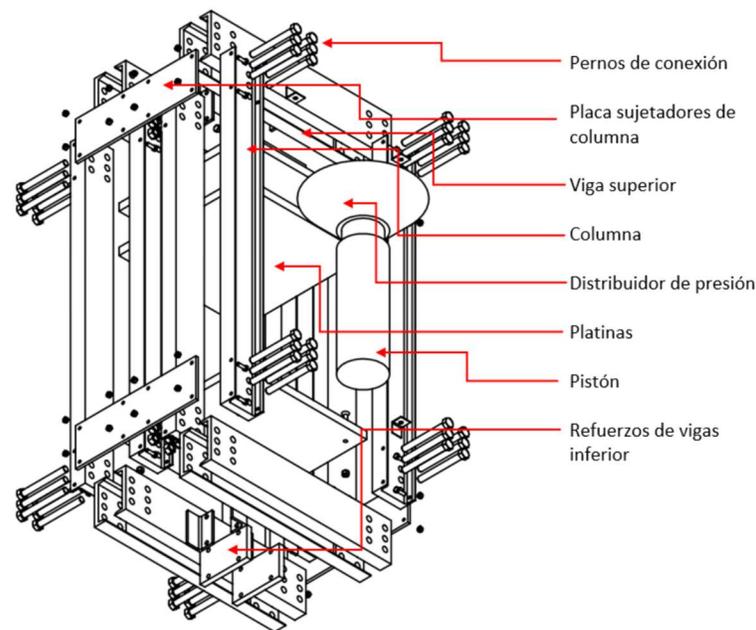


Figura 9. Explosivo del ensamble de prensa hidráulica en Solid Works®.

Recomendaciones

Realizar la simulación estática de las vigas, columnas y pernos, utilizando un software para comprobar los resultados.

Referencias

- Arandes, J.M., Bilbao, J., and López, D., 2004, Reciclado de residuos plásticos: *Revista Iberoamericana de polímeros*, 5, 1, 28-45.
- Barral, M., "Historia del reciclaje: De recurso ante la escasez a movimiento Medio Ambiental", Open Mind BBVA, <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/medioambiente/historia-del-reciclaje-recurso-ante-la-escasez-movimiento-medioambiental/>
- Beltrán Rico, M., and Marcilla Gomiz, A., 2012, Tecnología de Polímeros Procesado y Propiedades: *España, Publicaciones Universidad de Alicante*, p. 276.
- Careaga, A., "CAD/CAM: el procedimiento para la elaboración de un producto", Parque de Innovación (Comunicación y Difusión PIT-UAS) <http://innovacion.uas.edu.mx/cadcam-el-procedimiento-para-la-elaboracion-de-un-producto-2/>
- Díaz del Castillo, F., 2012, Conformado de materiales plásticos: *México, Universidad Nacional Autónoma de México*, p. 83.
- Frías, B., 2002, Manual de construcción de acero, IMCA 4ta Edición: *México, Ed. Limusa*, p. 492.
- Justo, I., "El proceso de reciclaje de una botella de plástico", <https://www.ecologiaverde.com/el-proceso-de-reciclaje-de-una-botella-de-plastico-152.html>
- López, A., and Alcalde A., 2020, Materiales. Una historia sobre la evolución humana y los avances tecnológicos: *Burgos, Ediciones de la Universidad de Burgos*, p. 147.
- Martínez Arroyo, M.A., Ruíz Suarez, L.G., and Gavilán García, A., 2020, "Panorama General de las Tecnologías de Reciclaje de Plásticos en México y en el Mundo", Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf
- Martínez Navarro, F., and Turegano García, J.C., 2020, "Los Polímeros y la Nanotecnología, Ciencias para el Mundo Contemporáneo", http://www3.gobiernodecanarias.org/aciisi/cienciasmc/web/pdf/u8_nuevos_materiales.pdf
- MAXIPET, "Características del Polietileno de Alta Densidad, MAXIPET", <https://maxipet.net/blog/caracteristicas-del-polietileno-de-alta-densidad>
- Mott, R.L., 2009, Resistencia de Materiales: *México, PEARSON Educación*, p. 797.
- Mott, R.L., 2006, Diseño de elementos de máquinas, 4ta Edición: *México, Ed. PEARSON Educación*, p. 475.
- Redes, L., "¿Por qué es importante reciclar plástico?", <https://www.leonardo-gr.com/es/blog/por-qu-es-importante-reciclar-el-pl-stico>

Roca Girón, I.E., "Tipos de Reciclaje del Polietileno de Alta Densidad", ROYMAPALST, S. L., <https://roymaplast.com/tipos-reciclaje-del-polietileno-alta-densidad/>
Sinchi Guerrero, J.L., 2018, Experimentación de los plásticos HDPE y PP reciclados como materia prima para la

generación de mobiliario: Ecuador, Universidad del Azuay, p. 160.

Página legal y créditos

CIENCIA NICOLAITA, Año 30 No. 86, diciembre 2022, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo a través de la Coordinación de la Investigación Científica, Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36, 443 327 23 66, y 443 322 35 00, <http://www.cic.cn.umich.mx>, ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx. Editor: Dr. Pedro Corona Chávez. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2013-072913082200-203, ISSN: 2007-7068, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Coordinación de la Investigación Científica, Edificio C-2., Av. Francisco J. Mújica, s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Tel. 443 316 74 36 y Fax 443 327 23 66. Responsable de la última actualización de este Número, Área de Tecnologías y Procesos de Información de la Coordinación de la Investigación Científica, Hugo César Guzmán Rivera, fecha de última modificación, **21 de septiembre de 2022**.

Ciencia Nicolaita 86 fue formada y preparada para su versión electrónica, en el Área Editorial del Departamento de Comunicación de la Ciencia de la Coordinación de Investigación Científica. Edificio C-2, Ciudad Universitaria, Morelia.

Fotografía de la portada: *Mariposa Monarca*, de Chris F.; fotografía gratuita del sitio pexels.com.

Derechos de uso

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio web implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP