



ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 45 • Número 174 • Págs. 1-352 • Enero - Marzo de 2021 • Bogotá - Colombia



0 ————— 5 cm



ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980


REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

Vol. 45 • Número 174 • Págs. 1-352 • Enero - Marzo de 2021 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora





 Elizabeth Castañeda, Ph. D.
editor@accefyn.org.co
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Asistente editorial Carolina Acosta



Grupo de apoyo Marta Renza, correctora de estilo
Johanna Morales, diagramadora
Bibiana Dimate, Publindex
César Moreno

Editores asociados







Ciencias Biomédicas

-  Luis Fernando García, M.D., M. Sc.
Profesor emérito, Universidad de Antioquia,
Medellín, Colombia
-  Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
-  Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
-  Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
-  Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
-  John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
-  Gloria Patricia Cardona Gómez, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
-  Ángela Restrepo Moreno, Ph. D.
Corporación para Investigaciones Biológicas,
Medellín, Colombia
-  Helena Groot de Restrepo, M.Sc.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias del Comportamiento

- Guillermo Páramo, M.Sc.
Universidad Central, Bogotá, Colombia
-  Rubén Ardila, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
-  Ana María Groot de Mahecha, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Ciencias Físicas

-  Pedro Fernández de Córdoba, Ph. D.
Universidad Politécnica de Valencia, España
-  Diógenes Campos Romero, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
-  Román Eduardo Castañeda, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
-  María Elena Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali
-  Gabriel Téllez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
-  Jairo Roa-Rojas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

- 15 Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Carlos Duque, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias Químicas

- 15 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Myriam Sánchez de Gómez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Carmenza Duque Beltrán, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Ligia Sierra García, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- 15 Luz Marina Jaramillo Gómez, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Ciencias Naturales

- 15 José Luis Fernández Alonso, Ph. D.
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Madrid, España
- 15 Jaime Cantera, Doctorat d'Etat
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.
Universidad Católica de Oriente, Rionegro,
Antioquia, Colombia
- 15 Sandra Baena Garzón, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 Néstor Hernando Campos Campos, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Sede Caribe, Colombia
- 15 Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia
- 15 Juan Manuel Díaz Merlano, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Gerardo A. Aymard C, Ph. D.
Universidad Nacional de los Llanos Ezequiel Zamora,
Venezuela
- 15 Néstor Julio García, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

- 15 Arturo Acero, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Santa Marta, Colombia
- 15 Elizabeth Hodson de Jaramillo, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia
- 15 German Domingo Amat, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 John Donato, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Martha R. Campos, M. Sc.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Clara Inés Orozco, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carolina Romero, M. Sc.
Herbarium, Missouri Botanical Garden, Estados Unidos
- 15 Eduardo Flórez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
- 15 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Alexander Correa, Ph. D.
Instituto de Geología, Universidad Nacional
Autónoma de México, Mexico
- 15 Ligia Estela Urrego, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Camilo Montes, Ph. D.
Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia
- 15 Germán Bayona, Ph. D.
Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia
- 15 Hernando Dueñas Jiménez, Ph. D.
BIOSS SAS, Antioquia, Colombia

Matemáticas

- Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Luis Español González, Ph. D.
Universidad de la Rioja, España
- 15 Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Clara Elena Sánchez, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Fernando Zalamea Traba, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- 15 Carlos Enrique Mejía, Ph. D.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- 15 Francisco Marcellán, Ph. D.
Escuela Politécnica Superior, Madrid, España

Comité científico internacional

- Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España
- Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile
- Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College,
Claremont, CA, EEUU
- Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, EEUU
- José Rubens Pirani Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brazil
- Federico Ardila, Ph. D.
San Francisco State University, San
Francisco, CA, EEUU
- Juan Alfredo Tirao, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Córdoba,
Argentina
- Pedro Romero, Ph. D.
Instituto Ludwig de la Universidad de
Lausana en Suiza
- Ulrich Paessler, Ph. D.
Academia de Ciencias de Berlín-
Brandenburgo, RFA
- Maria Sagrario Millán, Ph. D.
Universidad Tecnológica de Tarrasa,
España
- Zbigniew Jaroszewicz
Centro de Fotónica Aplicada, Instituto
Tele y Radiotécnico, Instituto Nacional
de Telecomunicaciones, Polonia
- José Luis Moran López, Dr. rer. nat.
Academia Mexicana de Ciencias,
México
- Jean-Pierre Galaup
Universidad de París Saclay, Francia
- Helena Nader, Ph. D.
Academia Brasileira de Ciencias, Brasil
- Roberto JJ Williams, Ph. D.
Academia Nacional de Ciencias Exactas,
Físicas y Naturales, Argentina
- Walter Fernández Rojas, Ph. D.
Presidente Academia Nacional de
Ciencias, Costa Rica
- Alex Held, Ph. D.
Commonwealth Scientific and Industrial
Research Organisation (CSIRO), Australia
- Rafael Radi, M.D.
Academia de Ciencias de Uruguay

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana
Agris
Dialnet
EBSCO
Historia Mathematica

Index Kewensis
Latindex
Mathematical Reviews
MathSciNet (on line data base)
OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA
Publindex, Colciencias
SciELO, Colombia
Zentralblatt für Mathematik
Zoological Record

Publindex, Colciencias (convocatoria 768 de 2018), categoría B

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936



Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

La Academia no es responsable de las opiniones aquí expresadas.

Reservados todos los derechos. El contenido de la presente publicación no puede ser reproducido, ni transmitido por ningún procedimiento electrónico, mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética, ni registrado por ningún sistema de recuperación de información, en ninguna forma, ni por ningún medio, sin la previa autorización por escrito del titular de los derechos de explotación de la misma.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra solo puede ser realizada con la autorización previa de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Cra. 28 A no. 39A - 63 Bogotá D.C., Colombia, CP 111311 • **PBX:** +57(1)555-0470
Sitio web: www.racefyn.co • **Correo electrónico:** revista@accefyn.org.co



ACADEMIA COLOMBIANA
DE CIENCIAS EXACTAS,
FÍSICAS Y NATURALES

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 45 • Número 174 • Págs. 1-352 • Enero - Marzo de 2021 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Editorial	COVID-19 y salud pública: visión de un epidemiólogo Covid-19 and Public Health: an epidemiologist's perspective <i>Fernando de la Hoz-Restrepo. M.D., Ph.D.</i> 8
	Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences
Ciencias Físicas Physical Sciences	Artículo original Análisis de algunas fechas radiocarbónicas de momias arqueológicas colombianas Analysis of some radiocarbon dates of archaeological mummies from Colombia <i>Felipe Cárdenas-Arroyo</i> 10
	Artículo original Soluciones exactas de agujeros negros en la teoría generalizada de Proca Exact black hole solutions in the generalized Proca theory <i>Sergio Manuel Cubides Pérez, Yeinzon Rodríguez García</i> 30
	Artículo original Propagación de Ondas de Alfvén Torsionales en una Atmósfera Solar Estratificada Torsional Alfvén Waves Propagation in a Stratified Solar Atmosphere <i>Paula C. Wandurraga, Anamaria Navarro, Fabio D. Lora-Clavijo</i> 52
	Original article On the coupling of vector fields to the Gauss-Bonnet invariant Sobre el acople de campos vectoriales al invariante de Gauss-Bonnet <i>Juan C. Bueno-Sánchez, John Bayron Orjuela-Quintana, César A. Valenzuela-Toledo</i> 67
Ciencias Naturales Natural Sciences	Review article Structural analysis of the $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) superconductor system Análisis estructural del sistema superconductor $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) <i>Carlos A. Parra-Vargas, Cesar Camilo Canarúa-Camargo, Jairo Roa-Rojas, José Albino-Aguilar</i> 83
	Artículo original Diversidad beta del bosque seco tropical en el norte del Caribe colombiano Beta-diversity of the tropical dry forest in the northern Colombian Caribbean <i>Hector García-Q., Eduino Carbonó-DelaHoz, Willinton Barranco-Pérez</i> 95

Artículo original	
Análisis de la producción de uchuva (<i>Physalis peruviana</i> L.) durante el ciclo de cosechas en invernadero con diferentes láminas de riego	
Analysis of the production of Cape gooseberry (<i>Physalis peruviana</i> L.) in the greenhouse with different irrigation levels during the harvest cycle	
<i>Javier Álvarez-Herrera, Gerhard Fischer, Javier Enrique Vélez</i>	109
Artículo original	
Biogeografía y riqueza de los líquenes de Colombia	
Biogeography and richness of lichens in Colombia	
<i>Edier Soto Medina, David Díaz, Javier Montaña</i>	122
Artículo original	
Avances en la producción de líneas de tomate <i>Solanum lycopersicum</i> Mill. con resistencia genética al perforador del fruto <i>Neoleucinodes elegantalis</i> (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae)	
Advances in the production of <i>Solanum lycopersicum</i> Mill. tomato lines with genetic resistance to the fruit borer <i>Neoleucinodes elegantalis</i> (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae)	
<i>Franco Alirio Vallejo Cabrera</i>	136
Artículo original	
Actualización nomenclatural y taxonómica del Catálogo de Líquenes de Colombia	
Nomenclatural and taxonomic update to the <i>Catálogo de Líquenes de Colombia</i>	
<i>Robert Lücking, Bibiana Moncada, Edier Soto-Medina, Diego Simijaca, Harrie J. M. Sipman</i>	147
Artículo original	
Caracterización florística y estructural como línea de base para la restauración ecológica de bosques en la microcuenca del río Barbas, Colombia	
Floristic and structural characterization as a baseline for ecological restoration processes in the Río Barbas watershed, Colombia	
<i>Clara Eugenia Roa-García, Alba Marina Torres-González</i>	190
Artículo original	
Hongos ingoldianos de la parte media del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia	
Ingoldian fungi of the middle section of the Gaira River, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia	
<i>Brayan Peñate-Carranza, Cesar E. Tamaris-Turizo, Jorge A. Luna-Fontalvo</i>	208
Artículo original	
Influencia de palizadas en la estructura del zooplancton en un embalse tropical	
Influence of logjams in the structure of zooplankton in a tropical dam	
<i>Yesica Velásquez-Duque, Silvia Lucía Villabona-González, Hilda Palacio-Betancur</i>	217
Artículo original	
Avifauna del interfluvio de la cuenca media Caquetá-Putumayo (Japurá-Içá), al sur de la Amazonia colombiana y su respuesta a la huella humana	
Avifauna of the Caquetá-Putumayo (Japura-Içá) middle interfluvial region in the southern Colombian Amazon and its response to the human footprint	
<i>Orlando Acevedo-Charry, Flor Ángela Peña-Alzate, Jurgen Beckers, Mónica Cabezas, Brayan Coral-Jaramillo, Ottavio Janni, David Ocampo, Sandra Milena Peñuela-Gomez, Diego Rocha-López, Jacob B. Socolar, Zuania Colón-Piñeiro</i>	229
Artículo original	
Efecto de las variables meteorológicas sobre la antracnosis (<i>Colletotrichum acutatum</i>) de la lima ácida Tahití en el piedemonte llanero, Colombia	
Effect of weather variables on the anthracnose (<i>Colletotrichum acutatum</i>) affecting Tahiti lime in the Colombian eastern foothill piedmont	
<i>Ángela María Mogollón-Ortiz, Nathali López-Cardona, Javier Orlando Orduz-Rodríguez</i>	250

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

Artículo original

¿En peligro o no? Distribución potencial de la hepática *Pleurozia paradoxa* en Colombia

Endangered or not? Potential distribution of the liverwort *Pleurozia paradoxa* in Colombia

Brayan David Aroca-Gonzalez, Robbert Gradstein, Lina Marcela González-Nieves 260

Original article

Regiospecific synthesis and electrochemical study of two water-soluble C₆₀ carboxylic derivatives

Síntesis regioespecífica y estudio electroquímico de dos derivados carboxílicos C₆₀ solubles en agua

Juan D. Villada, Álvaro Duarte-Ruiz, Manuel N. Chaur 272

Artículo original

Extracción de plaguicidas en el aguacate Hass (*Persea americana* Mill. cv.) mediante el uso de C₁₈ y arcillas funcionales como fase adsorbente en la metodología QuEChERS

Extraction of pesticides in Hass avocado (*Persea americana* Mill. cv.) using C₁₈ and functional clays as adsorbent phases in the QuEChERS methodology

Juan Pablo Betancourt-Arango, Cesar Augusto Ossa-Jaramillo, Gonzalo Taborda-Ocampo 286

Artículo original

Fotocatálisis heterogénea para la degradación de la orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina

Heterogeneous photocatalysis for ortho- and meta-nitroaniline degradation

Sandra Marcela Gómez-González, Jonhy Roberto Rodríguez-Pérez,

Nahury Yamile Castellanos-Blanco, Héctor Fabio Cortes-Hernández 300

Artículo de revisión

Desarrollo de los instrumentos de detección y de registro de señales sísmicas.

Metadatos de las redes sismológicas de la región de Latinoamérica y el Caribe

Development of instruments for the detection and recording of seismic signals.

Metadata of the seismological networks of the Latin American and Caribbean region

Erhard Wielandt, Alexander Caneva, Carlos A. Vargas 313

Comentario bibliográfico

Bibliographic commentary 333

Enfoque y alcance

Focus and Scope 339

**Ciencias
Químicas**
Chemical Sciences

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

Nuestra portada



En su artículo *Análisis de algunas fechas radiocarbónicas de momias arqueológicas en Colombia* Felipe Cárdenas-Arroyo retoma un valioso campo de estudio que ha quedado bastante relegado en Colombia, pero que ha sido objeto de sus reflexiones y aportes en varios momentos debido a su interés personal en la antropología biológica.

El autor señala que el estudio de las momias en el país brinda oportunidades de análisis en el campo de la Arqueología, incluso sabiendo que la mayoría de las momias registradas fueron excavadas por guaqueros, quienes destruyen los contextos en que pudieron haber estado y, por ende, su asociación con ellos. Su observación sobre el hecho de que los fardos que envuelven los cuerpos momificados constituyen por sí mismos un contexto cerrado es importante, pues constituyen “un universo de información” sobre el pasado, por lo que hace un llamado a desarrollar investigaciones “desde la paleopatología, la paleogenética, la paleoparasitología”.

En su análisis de algunas de las fechas radiocarbónicas adjudicadas a las momias, establece una posible relación de esta práctica funeraria con poblaciones humanas que tuvieron su asiento en la cordillera Oriental del país desde el siglo IV hasta el siglo XVII de nuestra era, puntualizando que fueron halladas en zonas habitadas en el momento de la conquista española por indígenas Chitareros, Guanés Laches, U’wa y Muiscas.

La carátula de este número de la Revista está ilustrada con un fardo de la momia de un niño o niña hallado en una cueva en Chiscas, Boyacá. Esta región corresponde al territorio étnico Lache o U’wa, donde el autor obtuvo tres dataciones por carbono 14: dos de ellas de momias, y la tercera de un fragmento de textil de un fardo. Estas tres fechas son las más tempranas de momias en Colombia, 340 a 650 calAD. La imagen escanografiada que el autor tomó de la momia del niño o niña muestra el esqueleto en perfecta posición anatómica y con sus órganos internos relativamente bien conservados. Estas observaciones sugieren que el proceso de momificación fue intencional y no responde a una acción natural. El fardo de telas que envuelve el cuerpo, así como los cordeles externos que lo amarran, son elementos de cultura material cuyo análisis contribuirá a dilucidar con mayor precisión la asociación cultural de esta momia.

En la discusión del artículo el autor hace una cuidadosa descripción de los tipos de momificación en Colombia: la momificación natural, la artificial mediante deshidratación al fuego y la artificial compleja con evisceración, así como los casos en que se elaboraron máscaras para cubrir el rostro.

Ana María Groot

Académica correspondiente
Editora asociada

Editorial

COVID-19 y salud pública: visión de un epidemiólogo

Después de un año de la pandemia causada por el virus SARS-CoV-2, su evolución ofrece un panorama mixto de incertidumbre y esperanza. Hasta el 16 de marzo de 2021 el virus pandémico había causado más de 120 millones de casos y 2,6 millones de muertes alrededor del mundo, y su impacto se ha dejado sentir no solo en los indicadores de enfermedad, sino también en los indicadores sociales de desarrollo y en la confianza del público en la capacidad de los gobiernos para manejar este tipo de crisis globales. Además, ha desnudado la fragilidad del sistema de alertas para enfermedades emergentes en el que descansa la posibilidad de reaccionar a tiempo y tomar decisiones acertadas para contrarrestarlas, propinándole un duro golpe a la credibilidad de las agencias internacionales creadas para este fin, como la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La emergencia planteada por el virus y la falta de elementos técnicos adecuados para combatirlo hicieron aflorar los viejos miedos al contagio, con la consiguiente proliferación de medidas irracionales de aislamiento indiscriminado de la población como respuesta a la falta de laboratorios y pruebas de diagnóstico que permitieran un seguimiento más detallado del avance del virus. Los cierres de los aeropuertos y de prácticamente todo el tráfico internacional, dictado de manera unilateral por casi todas las naciones, oscurecieron el mandato de la OMS que, por muchos años y en pandemias anteriores, había defendido la posición de que las cuarentenas no eran eficaces para detener el avance de los agentes infecciosos y solo contribuían a aumentar el sufrimiento de las poblaciones.

La rebatiña que se ha desatado en torno a los elementos esenciales para vigilar y controlar el virus, es decir, los reactivos de laboratorio, los elementos de protección, los medicamentos y las vacunas, aumentó la desconfianza del público en el postulado de que la globalización de bienes y capitales es el modelo de desarrollo capaz de resolver las necesidades de la población global. Con muy pocas excepciones -Nueva Zelanda y Australia, entre otros,- casi todos los gobiernos del mundo han sufrido en algún momento la crítica de sus ciudadanos por la forma en que han respondido a esta emergencia.

No hay duda de que el impacto se ha sentido más en aquellas regiones con los mayores desequilibrios sociales y económicos. Latinoamérica, la segunda región más desigual del mundo, ha sido golpeada fuertemente tanto por la capacidad patogénica del virus (Perú, Brasil, Colombia y México están entre los 20 países con mayor mortalidad por habitante) como por el aumento de la pobreza y el desempleo.

Colombia ha superado dos picos de transmisión del virus pandémico que han tenido un gran efecto negativo en los indicadores de salud (más de 60.000 muertes y 2,3 millones de casos confirmados), pero también en el personal de salud encargado de la primera línea de atención de la pandemia (altos niveles de estrés, 227 muertes y más de 50.000 casos entre profesionales de la salud) y en los indicadores sociales (desempleo, pobreza, pérdida de la confianza en lo que puede hacer el Estado, y abusos de autoridad en los niveles locales y nacionales).

La falta de credibilidad de la ciencia en amplios sectores de la población ha quedado patente en la proliferación de mensajes en las redes sociales que recomiendan todo tipo de sustancias y dan indicaciones absurdas para combatir el virus, poniendo en tela de juicio los avances mediados por la ciencia, como las vacunas y el uso de ciertos medicamentos. La falta de coherencia de algunas de las medidas adoptadas por las autoridades sanitarias introduce más confusión y refuerza la percepción de que estas, a veces, se toman según el afectado. Por ejemplo, el poco interés que se ha notado en el gobierno por abrir los colegios es verdaderamente vergonzoso y una afrenta a las futuras generaciones, sobre todo considerando que ha corrido a celebrar días sin IVA y a esforzarse porque se abran restaurantes y bares, sitios que son mucho más peligrosos que un colegio o una universidad.

La amenaza de las nuevas cepas del virus se ha enfrentado con medidas igualmente incoherentes. ¿Cómo puede uno explicarle a la población de Leticia –la cual depende de los viajes aéreos- que su aeropuerto permanecerá cerrado indefinidamente, en tanto que a los viajeros internacionales, que pueden venir infectados con variantes más peligrosas, se les dejan de exigir las pruebas por el afán de no perjudicar la aviación y el turismo? Este tipo de medidas deja la sensación de que a ciertas poblaciones se les castiga doblemente en la pandemia: por vivir lejos, en fronteras poco atendidas y gobernadas por dirigencias incapaces, y por pertenecer a minorías.

En cuanto a las oportunidades, la pandemia ha abierto, por lo menos un poco, el camino para la innovación. El desarrollo de vacunas en tiempo récord ha sido un hito científico y tecnológico y ha demostrado que, bien financiada, la ciencia puede contribuir a la solución de los problemas. Sin embargo, aun en este campo prometedor hay sombras como la falta de solidaridad de los países industrializados con el resto del mundo y la avaricia y el interés de las empresas comercializadoras de las vacunas de buscar únicamente su propio beneficio. El mundo rico y desarrollado ha acumulado muchas más vacunas de las que necesita mientras que en los países menos favorecidos los programas de vacunación avanzan con gran dificultad, si es que en algo avanzan.

En Colombia cabe destacar la ampliación de la capacidad de los laboratorios para hacer pruebas diagnósticas, que ha alcanzado una cifra diaria de más de 50.000 pruebas moleculares gracias a una amplia red de laboratorios que se ha ido conformando y combina las fortalezas de los grupos de investigación y los de vigilancia en salud pública. Debe señalarse, sin embargo, que la mayor parte de estos laboratorios se concentra en unos pocos lugares, en tanto que vastas zonas del país tienen capacidades limitadas para el diagnóstico.

Asimismo, merece mencionarse el aumento del número de camas en las unidades de cuidados intensivos en muchas ciudades, aunque la calidad de la atención varía ampliamente entre ellas. Cabe señalar, además, el esfuerzo del Ministerio de Ciencia para organizar en un tiempo récord convocatorias científicas de apoyo a proyectos encaminados a generar conocimiento e intervenciones para superar o mitigar la emergencia. Sin embargo, transcurrido un año, pocos de estos estudios han dado resultados que puedan ser incorporados a la respuesta institucional, aunque vale la pena mencionar algunas excepciones: 1) el estudio serológico de infección en varias ciudades del país liderado por el Instituto Nacional de Salud; 2) la evaluación de la idoneidad del plasma hiperinmune en el tratamiento de la enfermedad grave, cuya eficacia no fue convincente, y 3) el desarrollo de tecnologías informáticas para rastrear el avance del virus y suplir algunos de los vacíos de los indicadores de vigilancia.

Pese a estos avances, Colombia sigue teniendo debilidades importantes en áreas que son fundamentales para el éxito de las medidas de control y la normalización de la vida, como es la capacidad de secuenciación genómica de agentes infecciosos. Solo unos pocos centros pueden hacerla y, por ello, el conocimiento que tenemos sobre la circulación de diferentes variantes es limitado, como lo es la posibilidad de reaccionar rápidamente con medidas inteligentes, a la emergencia de los nuevos linajes y variantes.

La recuperación de lo que se ha perdido en la economía y el desarrollo social va a tomar varios años, naturalmente siempre y cuando pueda detenerse la transmisión de este virus. A corto plazo parece poco probable que esto suceda espontánea y completamente, dada la capacidad que ha demostrado para generar variantes y linajes aptos para evadir, por lo menos parcialmente, la respuesta inmunitaria desarrollada por la infección natural y por algunas vacunas.

A mediano y largo plazo la pandemia nos deja la lección de que, para enfrentar desastres globales de esta envergadura, los países deben no solo fortalecer sus capacidades técnicas y científicas en salud y en investigación básica, sino también fortalecer la resiliencia social a través de mecanismos innovadores de desarrollo.

© **Fernando de la Hoz-Restrepo. M.D., Ph.D.**

Profesor titular, Departamento de Salud Pública
Universidad Nacional de Colombia

Ciencias del Comportamiento

Artículo original

Análisis de algunas fechas radiocarbónicas de momias arqueológicas colombianas

Analysis of some radiocarbon dates of archaeological mummies from Colombia

 Felipe Cárdenas-Arroyo

Arqueólogo independiente

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de 23 fechas de radiocarbono obtenidas en muestras de momias arqueológicas de Colombia y se comparan con fechas obtenidas mediante excavaciones arqueológicas en sitios estratificados con cerámica, con el fin de contextualizar la información radiocarbónica de las momias en contextos alterados y muchas veces ‘guaqueados’. El ejercicio ayudó a relacionar la antigüedad de la momificación en Colombia con los esquemas cronológicos establecidos para las sociedades indígenas que ocuparon la cordillera Oriental desde el siglo IV hasta el siglo XVII de nuestra era, a demostrar que la momificación antropogénica en el país tiene una antigüedad de más de 1.600 años y que se continuaba practicando aún en tiempos de la conquista y la colonia temprana.

Palabras clave: Cordillera Oriental; Momias; Cronología; Cerámica.

Abstract

This article presents the results of 23 radiocarbon dates obtained from samples taken from archaeological mummies in Colombia. These were compared to radiocarbon dates obtained through archaeological excavations in stratified ceramic sites in order to contextualize the radiocarbon information from the mummies in altered or sacked sites. This approach helped to relate the antiquity of mummification in Colombia with chronological frameworks established for native indigenous societies that inhabited the Eastern Cordillera between the 4th and 17th centuries of the current era showing that anthropogenic mummification in the country was practiced for more than 1.600 years and was still done during the conquest and early colonial times.

Keywords: Eastern Cordillera; Mummies; Chronology; Ceramics.

Citación: Cárdenas-Arroyo F. Análisis de algunas fechas radiocarbónicas de momias arqueológicas colombianas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):10-29, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1226>

Editor: Ana María Groot

***Correspondencia:**

Felipe Cárdenas-Arroyo;
felipeca2@aol.com

Recibido: 25 de mayo de 2020

Aceptado: 1 de diciembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

En arqueología es necesario obtener fechas que permitan contextualizar los hallazgos de excavaciones arqueológicas dentro de un marco temporal y espacial. Sin ellas, difícilmente podríamos entender los sucesos y los procesos que tuvieron lugar en el pasado. Más que fechas, los arqueólogos buscamos construir cronologías a partir de las cuales inferir el desarrollo sociopolítico y socioeconómico de las sociedades que estudiamos. Pero llegar a este punto requiere de muchas investigaciones y de muchas fechas que se obtienen especialmente mediante el método de radiocarbono. Sin embargo, las fechas por sí solas no nos dicen mucho si no están asociadas a contextos arqueológicos sistemáticamente excavados y no provienen de muestras cuyo contenido de materia orgánica sea suficiente para producir una fecha radiocarbónica confiable. De hecho, el método sigue siendo hoy bastante interpretativo –a pesar de los avances tecnológicos–, lo que equivale a decir que las fechas que recibimos de los laboratorios no se deben considerar definitivas. En el mejor de los casos pueden aceptarse como “confiables”, lo

que siempre deja un margen para la interpretación. Pero cuando se trabaja con periodos tan extensos, de siglos o milenios, tal vez es mejor tratar de entender esos procesos de desarrollo social en rangos de tiempo amplios.

El estudio de las momias arqueológicas en Colombia ejemplifica esto mejor que cualquier otro caso. De las 23 fechas de radiocarbono procesadas en muestras de momias o de textiles asociados con momias que se analizan aquí, ninguna tiene un contexto arqueológico completo. Para algunas tenemos descripciones someras del lugar donde fueron halladas, pero no levantamientos arqueológicos en planos, dibujos o fotografías. Sabemos el lugar de procedencia de algunas, pero de otras solo podemos especular sobre su origen. Dicho esto, queda el hecho de que las momias son registros extraordinarios de nuestro pasado aborigen y que, aun con limitaciones interpretativas, suministran información importante sobre las sociedades a las que pertenecieron, sobre su estado de salud o enfermedad y sobre las regiones geográficas donde fueron halladas. Las 23 fechas que se presentan no son una cronología de la momificación en Colombia. Apenas son un conjunto de datos radiocarbónicos que ofrecen un marco de espacio y tiempo de la momificación indígena en el país. He tratado de compararlas con fechas obtenidas por otros investigadores en sus excavaciones sistemáticas de las áreas geográficas cercanas al lugar de donde provienen las momias con la idea de suministrar algún tipo de marco cronológico de su presencia en la cordillera Oriental. Las cronologías construidas por los arqueólogos que han estudiado el altiplano cundiboyacense se basan en tipologías cerámicas y en excavaciones estratificadas controladas (**Boada & Cardale de Schrimppf, 2017**), pero las momias carecen totalmente de esas asociaciones con la cerámica. Incluso en los pocos casos en los que se dice que las momias venían acompañadas de cierto ajuar de piezas de cerámica, es muy difícil estar seguros de que, efectivamente, era la que se hallaba con la momia cuando algún guaquero la encontró. Sin embargo, conociendo por lo menos su origen, se puede intentar el ejercicio de observarlas a través del lente que ofrecen las fechas provenientes de excavaciones científicas para darnos una idea de su importancia en el estudio de las sociedades de esas áreas.

Por otro lado, la interpretación de las fechas de las momias es más confiable cuando se estudian aspectos puntuales de esos cuerpos. Por ejemplo, en los casos de las enfermedades diagnosticadas en algunas de estas momias, la fecha asociada con ellas constituye una información válida para paleopatólogos, que buscan entender la antigüedad de una enfermedad; lo es también el tipo de textil decorado que envuelve a una momia y, a veces, las momias mismas se hallan en un contexto cerrado constituido por varios artefactos, como en el caso del fardo de la momia D9 del Museo del Oro hallada en Pisba, que, además de sus mantas, tiene una calabaza llena de objetos asida fuertemente entre los brazos, una bola de algodón introducida en el ano, un trozo de tela en la boca y un gorro (**Cárdenas-Arroyo, 1990b**). Todas estas cosas son elementos que forman un contexto arqueológico y, como tal, es válido conocer su antigüedad. Un solo fardo funerario es fuente de un universo de información sobre el pasado que puede estudiarse con tecnologías modernas como la paleopatología, la paleogenética, o la paleoparasitología e, incluso, a partir de enfermedades como la aterosclerosis en momias que nos hacen replantearnos el origen de las enfermedades cardiovasculares, por dar solo un ejemplo. En este trabajo se subrayan claramente las limitaciones de la muestra y se busca llegar a una idea general sobre el tiempo en el que los indígenas de la cordillera Oriental de Colombia practicaron la momificación. Los datos que se presentan aquí ponen al día una lista anterior publicada por **Aufderheide (2002)**.

Materiales y métodos

Se presentan 23 fechas de radiocarbono tomadas en momias arqueológicas colombianas pertenecientes a diferentes colecciones. Dieciséis de estas (69,6 %) se procesaron a partir de muestras de cuerpo humano (hueso, músculo, pelo) y siete (30,4 %), de textiles hallados en ellos. De estas siete, en cinco los textiles eran de los fardos que, estamos seguros,

envolvían a las momias, por lo que su asociación con ellas es directa, en tanto que en las dos restantes eran fragmentos de textiles provenientes del piso de las cuevas donde se hallaron momias enfardeladas, es decir, una asociación indirecta. En la **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2985>, se especifican todos los detalles pertinentes a las muestras. Las muestras analizadas aquí fueron procesadas en seis laboratorios isotópicos de Estados Unidos y Europa de reconocida trayectoria en el campo de la radiocronología arqueológica, cuyos datos, así como los nombres de los investigadores responsables de las muestras y las referencias del caso, se incluyen en la misma tabla. En los casos en los que las fechas publicadas presentaban inconsistencias o errores, se contactó directamente a los laboratorios para aclararlos y solicitar el reenvío de los resultados originales obtenidos por ellos. Gracias a ello, las fechas en las que se basó el estudio fueron doblemente confirmadas y cualquier inconsistencia se corrigió.

Se empleó la terminología establecida para reportar fechas de radiocarbono recomendada internacionalmente, la cual es una convención que en Colombia casi siempre se ignora, lo que da pie a equivocaciones y mucha confusión. En el pasado, e incluso hoy, las fechas de radiocarbono se reportan en nuestro país haciendo referencia al año 0 BP (cero antes de presente), es decir, 1950. Estas también se incluyen en la **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2985>, aunque sugiero observar las fechas calibradas con atención, ya que las calibraciones demuestran diferencias importantes entre las fechas referidas a 0 BP y las calibradas como calBC/AD. De hecho, este valor varía para toda la muestra en un promedio de 120,21 años más que el tradicional AD-1950. Aquí usaré la convención internacional en años BP (antes del presente) para las fechas convencionales de radiocarbono, calAD para las fechas calibradas en años después de Cristo, y ca.AD para fechas sin calibrar en años aproximados AD referidas a 1950. Las fechas se calibraron con la curva SHCal-13 para el hemisferio sur (**Hogg, et al., 2013**) usando el programa OxCal v.4.3 de la *Oxford Radiocarbon Acceleration Unit*. La **tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2986>, detalla la procedencia y los contextos donde se hallaron las momias de este estudio.

Resultados

De las 23 muestras estudiadas, hay seguridad de que 19 son de momias o textiles que se encontraron en la cordillera Oriental. Las otras cuatro corresponden a máscaras de preparación compleja cuyo origen no está precisado como se explicará en la discusión, aunque podrían provenir también de esta área. En general, el rango cronológico de toda la muestra va de 340 calAD hasta 1.600 calAD, lo que ubica los dos puntos extremos de la antigüedad de las momias en la cordillera Oriental. Sin embargo, es posible hacerse una mejor idea si se consideran estas fechas según los posibles grupos étnicos, o de los territorios en los que fueron halladas las momias. Este ejercicio es interesante, aunque debo subrayar que con los pocos datos disponibles no es posible trabajar en términos estadísticos. Además, en algunos casos dicha asociación no es posible. Según la proveniencia geográfica de las momias de nuestra muestra, se pueden establecer cinco etnias indígenas que ocupaban estas regiones de la cordillera Oriental en el momento de la conquista. Es evidente que no podemos asumir que esas mismas etnias ya existían en tiempos más tempranos y menos que ocuparan el mismo espacio que ocupaban en el siglo XVI. De hecho, en Santander **Moreno (2012)** sugiere la existencia de una sociedad preguane y los investigadores especializados en el tema de los muisca han construido una cronología que empieza en el período Herrera, pasando luego por el Muisca temprano y el tardío (**Boada & Cardale de Schrimppf, 2017**). La información etnohistórica es la base sobre la que trataremos de definir territorios que por ahora designaremos con los nombres de etnias tardías. Esperamos que en investigaciones futuras se vayan precisando mejor los momentos en que tales etnias se desarrollaron, asentándose y ocupando territorios específicos. La información cronológica proveniente de excavaciones arqueológicas que sirven para establecer los períodos de las poblaciones aborígenes de la cordillera Oriental también es de gran ayuda

y a ella haré referencia más adelante. Para definir las etnias y los espacios me basé en el juicioso trabajo etnohistórico de **Morales** (1984), el cual establece que la región estaba ocupada por las etnias guane, muisca, lache, chitarero y yareguí (esta última por fuera del área donde se hallaron las momias de este estudio). Nosotros hemos agregado la etnia u'wa (o tuneba). El mapa que elaboré (**Figura 1**) se basa en el de Morales con algunas modificaciones. No coloqué en él las momias enmascaradas porque no hay ninguna seguridad de que provengan de la cordillera Oriental. En trabajos anteriores (**Sotomayor & Correal, 2003; Cárdenas-Arroyo, 2009**) se han detallado las características de estas máscaras, por lo que no es necesario repetirlas.

Territorio lache o u'wa

El primer grupo, el más antiguo, está compuesto por tres momias de Chiscas (Boyacá). Las tres fechas que tenemos para este grupo son las más tempranas para momias en Colombia: 340-650 calAD. Una es de un niño o niña de apenas 6 meses conservado dentro de un fardo de telas (**Figura 2a**). Como lo muestran las imágenes escanográficas, está en perfecta posición anatómica sin fragmentos sueltos (**Figura 2b**) y con sus órganos internos relativamente bien conservados, lo que sugiere que se trata de una momia antropogénica y no natural. La otra momia fechada es de una mujer mayor de 25 años. La cabeza fue separada del tronco *post mortem*, pero el estado del tejido muscular está muy bien conservado, no está apergaminado ni friable, cosa que sí ocurre en las momias naturales. El tejido muscular que conserva cierta flexibilidad después de miles de años indica que el proceso

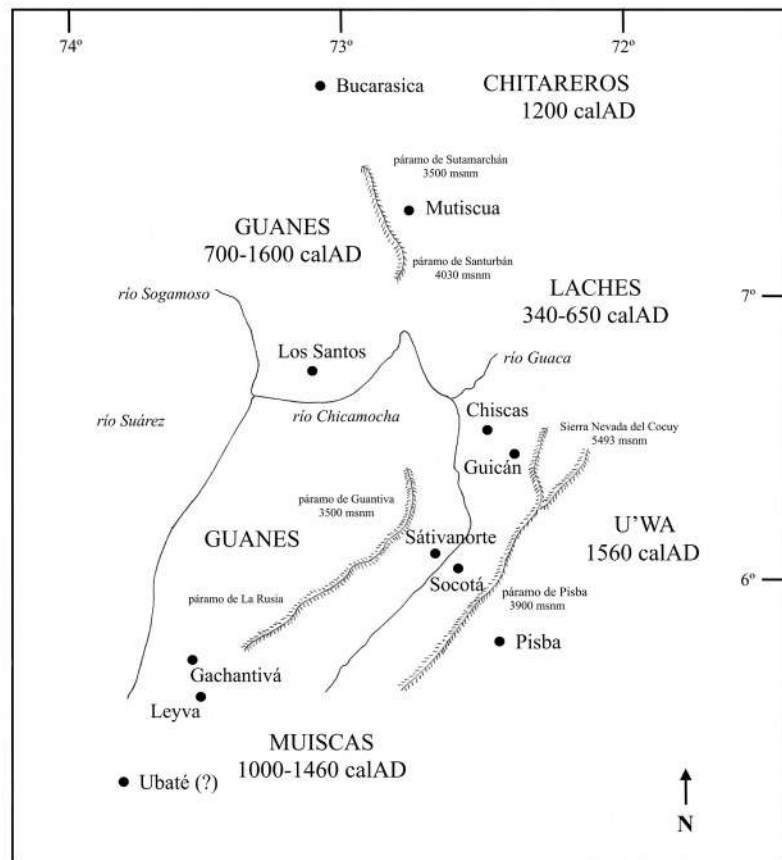


Figura 1. Mapa de territorios étnicos definidos según documentos etnohistóricos del siglo XVI. Las momias halladas en estos territorios con fechas más tempranas no necesariamente se pueden asociar a estas etnias. Dibujado con modificaciones con base en **Morales** (1984: 71). Las fechas mostradas corresponden a las momias en la muestra de este trabajo.

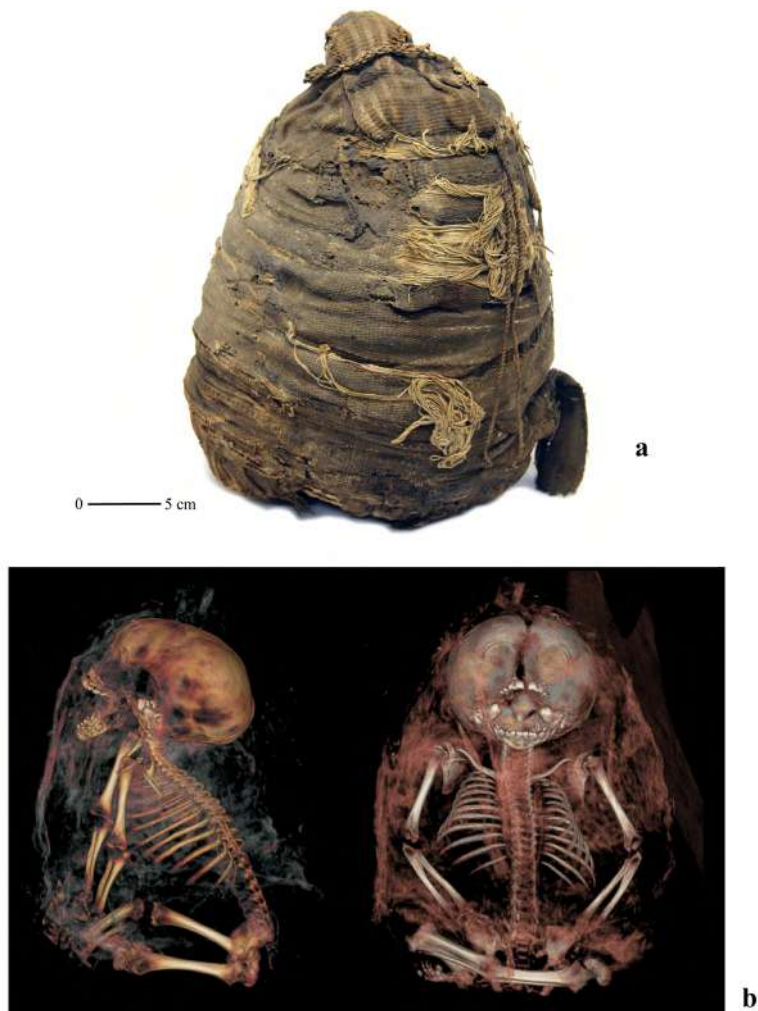


Figura 2. (a) Fardo de la momia de un niño o niña hallado en una cueva en Chiscas, Boyacá. Dimensiones: 33 cm x 25 cm. (b) Reconstrucción tridimensional que muestra el cuerpo en perfecta articulación anatómica

de deshidratación ocurrió velozmente, por lo que colegimos que se trata de una momia antropogénica. En esta momia se diagnosticó un cálculo biliar (Cárdenas-Arroyo & Martina, 2019), lo que sitúa la antigüedad de esta enfermedad en Colombia en 650 calAD. Ambas fueron halladas en cuevas (Hernández de Alba, 1943). La tercera fecha proviene de un textil de fardo que envolvía a una momia. La muestra fue un fragmento de textil tomado por Silva-Celis (1945), quien infortunadamente no identificó la momia, excepto su procedencia. Con estos datos, en términos de tiempo se puede decir que la momificación antropogénica ya se practicaba en la cordillera Oriental en el siglo IV de la era actual con buenos resultados. Significa que seguramente era una práctica más antigua aún, puesto que para lograr este grado de éxito ya debía haberse acumulado una experiencia considerable.

Pérez (1999) suministra tres fechas de radiocarbono que confirman la edad temprana de las poblaciones que ocuparon esta área de la cordillera Oriental y que reproducimos en la **tabla 1**. Las fechas provienen de sus excavaciones arqueológicas en el municipio de Chita, sitio Arboloco, y son muy consistentes con las tres fechas tempranas de las momias halladas en Chiscas. Dada la cercanía geográfica entre estas dos localidades, es interesante pensar en su contemporaneidad. El mismo autor sugiere que su cerámica indica "... probablemente a una comunidad del período Formativo Final" y que posteriormente el

Tabla 1. Fechas de radiocarbono obtenidas por Pérez (1999) en excavaciones arqueológicas en Boyacá, región de Chita

Sitio	Laboratorio y número	Fechas convencionales BP	Fechas calibradas cal BC/AD	ca. BC/AD (1950)	Fuente
Arboloco, Chita	Beta-125264	2060±80	215BC-110AD	110 BC	Pérez 1999
Arboloco, Chita	Beta-125263	1690±90	130-560AD	260 AD	Pérez 1999
Arboloco, Chita	Beta-129236	1620±40	365AD-540AD	330 AD	Pérez 1999

entorno del sitio "... fue habitado por los Laches o U'wa", tal vez a partir de los siglos VI o VII de nuestra era. Por el contrario, una momia hallada en Pisba tiene una fecha muy tardía (1389-1673 calAD). La fecha de referencia en años calibrados para esta momia es de 1520 calAD, cuando los europeos estaban por llegar al altiplano. En un trabajo anterior (Cárdenas-Arroyo, 1990b) se hizo la descripción completa de esta momia. Vale la pena recordar que tiene aferrada entre los brazos una especie de totuma partida y "remendada" y las escanografías identificaron una bola de textil introducida en el conducto anal y un fragmento de tela firmemente apretado entre los dientes. El textil más externo del fardo es una malla que recuerda aquellas que envuelven algunas de las momias halladas por Silva-Celis (1945) en Chiscas e ilustradas por ese investigador. Es una momia muy elaborada y de compleja fabricación. La gran diferencia temporal de 1200 años entre las momias de Chiscas, las fechas de Arboloco y la momia de Pisba no es fácil de interpretar. Tratándose de una momia tardía (siglo XVI AD), la momia de Pisba podría tentativamente asociarse con la etnia u'wa, llamada a veces tunebo. Ann Osborn, sin embargo, es categórica en afirmar que la denominación correcta es u'wa: "... su nombre, afirmo, es U'wa, y no Tunebo..." (Osborn, 1985). Considero los argumentos de la autora sobre el origen posiblemente colonial del término tunebo muy valiosos. Según sus estudios y el criterio de Silva Celis en la década de 1940, es muy probable que los u'wa fuesen los mismos laches. Continúa explicando que el término "lache" es una españolización de un nombre u'wa aparentemente ceremonial, *Chitauwa*, que según Osborn significa "Los Laches". Pérez (1999) confirma lo anterior y en su trabajo se refiere a esta etnia como "Lache o U'wa". Las fechas tempranas de Pérez son muy sugerentes y sería ideal comparar su cerámica con algunos de los restos culturales de las cuevas. Sin embargo, Silva Celis escribió que, "No se encontró ningún elemento que exteriormente acompañara a las momias. Tampoco registramos fragmentos de cerámica ni utensilios domésticos" (Silva-Celis, 1945). Lo que sí había era textiles, cuyo estudio pormenorizado podría ayudar a resolver esta incógnita. Asimismo, un análisis paleogenético comparativo entre las momias tempranas y las tardías podría aclarar un poco este rompecabezas.

Territorio chitarero

El segundo grupo es el de los chitarero, representado por una sola fecha (1046-1272 calAD). Esta momia fue hallada en Mutiscua y no proviene de excavaciones arqueológicas sistemáticas. Está bastante deteriorada, sobre todo en la parte del cráneo, que ya no tiene tejidos blandos, y se trata de una momia natural. No se cuenta con fechas de excavaciones arqueológicas en esta región para comparar.

Territorio preguane y guane

El tercer grupo está representado por cinco fechas con un rango de 700 a 1600 calAD. Todas son del área de la Mesa de Los Santos. Lo que llama la atención de este grupo de fechas es la amplitud del rango, sobre todo la más tardía. Se trata de la momia de un niño (Icanh 41-III-2536), cuyos tejidos suaves se conservaron muy bien pero el cuerpo en general está fragmentado por actividades *post mortem*. Los 900 años que separan a la momia más antigua de la más reciente de este grupo pueden ser una indicación del uso continuo de estas

cuevas como cementerios. Los informes verbales de las personas que visitaron estos lugares concuerdan en que había muchos cuerpos, muchos huesos diseminados. **Schottelius** (1946) indicó que existían varias capas de enterramientos y la foto tomada por Héctor Acebes en la Serranía de Perijá en la década de 1940 (**Figura 3**) refuerza la idea de que las cuevas usadas como cementerios contenían muchos cuerpos que se iban acumulando a lo largo de decenios o siglos. **Cadavid** (1984) deduce de sus excavaciones en la Mesa de Los Santos que la población era considerable por la gran cantidad de fragmentos cerámicos hallados. En sus excavaciones en la vereda Los Teres obtuvo una fecha de radiocarbono del siglo IX de nuestra era, en tanto que **Sutherland** (1972) encontró algunas correspondientes a los siglos XII a XV, y **Lleras** (1986) a los siglos XII y XIII (**Tabla 2**). Según las fechas de radiocarbono obtenidas por estos investigadores, podría decirse que la ocupación de la etnia guane se registra por lo menos a partir del siglo XII AD (**Lleras**, 1986) y cuatro de las cinco fechas de las momias de este grupo concuerdan con este supuesto. La quinta (700 calAD) tendría que explicarse de otro modo: según **Moreno** (2012), antes del siglo XI AD el territorio en cuestión estuvo ocupado por una etnia preguane. Con base en este razonamiento, se podría afirmar que la etnia guane ya momificaba a sus muertos por lo menos desde el siglo XIII AD, pero la momificación antropogénica se practicaba desde mucho antes en esa región de la cordillera Oriental.



Figura 3. Foto tomada en la región de Perijá por Héctor Acebes, década de 1940. Obsérvese la cantidad de fardos funerarios en la cueva y bajo parte del abrigo rocoso.

Tabla 2. Fechas de radiocarbono obtenidas en excavaciones arqueológicas por Lleras, Cadavid y Sutherland en Santander, territorio guane. El promedio de antigüedad de las momias halladas en territorio guane es de 1250 calAD. Rango 700–1600 calAD

Sitio	Laboratorio y número	Fechas convencionales BP	Fechas calibradas calAD ^{SHCal-13}	Referencia a calAD	Fuente
Palogordo	Beta-15985	1030±60	902-1190	1100	Lleras (1986)
Los Teres	Beta-9371	790±190	879-1508	1300	Cadavid (1985)
Oiba	Ivic-560	780±60	1181-1390	1280	Sutherland (1972)
Los Santos	Ivic-159	765±85	1154-1407	1280	Sutherland (1972)
Palogordo	Beta-12072	740±50	1228-1391	1280	Lleras (1986)
Guapotá	Ivic-559	630±70	1285-1441	1300	Sutherland (1972)

Territorio muisca

El cuarto grupo es el de los muiscas, representado por seis fechas en momias que tienen un rango de 1000-1460 calAD. Aquí es importante hacer referencia al trabajo de Boada y Cardale de Schrimppff, quienes han propuesto una nueva clasificación para los períodos culturales muiscas para la Sabana de Bogotá con base en su estudio de la cerámica (**Boada & Cardale de Schrimppff, 2017**). Según esa nueva clasificación, el período Muisca temprano abarca desde el siglo XI hasta mediados del XIV de nuestra era (1000-1350 AD) y el Muisca tardío, desde la segunda mitad del siglo XIV hasta el XVII (1350-1600 AD). Esta cronología ofrece un marco de referencia importante porque los datos de las investigaciones arqueológicas con base en las cuales las autoras citadas construyeron su cronología –datos obtenidos de excavaciones estratificadas– son un respaldo arqueológico para las fechas de las momias provenientes de contextos alterados. Como veremos en la discusión, varias noticias de cronistas presenciales que estuvieron en el altiplano cundiboyacense confirman la práctica de la momificación antropogénica entre los muiscas. Sin embargo, las momias que asociamos aquí a la etnia muisca no se encontraron en la Sabana de Bogotá: dos son del área general de Villa de Leiva, una de Socotá, una del triángulo formado entre Sátivanorte, Sátivasur y Socotá, y dos de procedencia incierta, pero que según Silva Celis son “chibchas” (**Silva-Celis, 1945**). Dos momias del Museo del Oro son de origen incierto y con fechas tardías (siglos XVI y XVIII), cosa que no es extraña, dado que la momificación se siguió practicando muchas décadas después de la invasión española.

Algunas áreas geográficamente cercanas a los lugares donde se hallaron estas momias cuentan con excavaciones arqueológicas sistemáticas y buenos estudios cronológicos. Como referencia general, menciono algunas de estas fechas obtenidas en el valle de Samacá, en Busbanzá y en Tiguasú. Sobre estas hay que recalcar que la mayoría de los errores estándar son bastante amplios, lo que afecta bastante la curva de calibración. Sin embargo, creo que nos ofrecen buenas fechas obtenidas en excavaciones controladas. La momia hallada en el Cantón de Leiva tiene una fecha de 1000 calAD y la de Gachantivá es de 1270 calAD, ambas coincidentes con las fechas calibradas que aparecen en la **tabla 3**. Para la momia de Sátivanorte (1400 calAD) no hay fechas de excavaciones en

Tabla 3. Fechas de radiocarbono obtenidas en excavaciones arqueológicas en Boyacá, territorio muisca, por Archila, Boada, Salamanca y Langebaek

Sitio	Laboratorio y número	Fechas convencionales BP	Fechas calibradas calAD ^{SHCal-13}	Referencia a calAD*	Fuente
Busbanzá	Beta-15706	1110±60	791-1148	900	Archila (1986)
Siquianeca (Samacá)	Beta-10108	930±140	882-1391	1200	Boada, et al. (1988)
Infiernito (Leyva)	GX-14494	915±105	981-1379	1035	
Asomada (Sutamarchán)	GX-14491	900±145	893-1395	1050	
Churuvita II (Samacá)	GC-14493	780±75	1160-1395	1170	
Marín (Samacá)	Beta-22667	700±80	1223-1422	1320	
Tapias I (Samacá)	GX-14490	660±105	1187-1463	1350	
Peñitas (Samacá)	GX-14492	645±165	1045-1642	1350	
Marín (Samacá)	Beta-22668	600±100	1043-1673	1350	
El Venado III (Samacá)	GX-14489	560±105	1278-1627	1400	

las cercanías que permitan comparar, en tanto que las dos momias de la colección del Icanh (38-I-776 y 777) carecen de procedencia precisa, aunque sus fechas caen dentro de este rango. La cronología del área muisca es muy compleja y la intención aquí es solo suministrar un marco de referencia para las momias. Remito a los lectores a los trabajos de **Boada & Cardale de Schrimppff** (2017) y de **Langebaek** (1995, 2001) quienes manejan a profundidad el tema de la cronología de la región.

En términos generales, las dos momias muiscas más tempranas (Leiva y Gachantivá) corresponderían al período Muisca temprano, lo mismo que las dos momias del Icanh ya mencionadas, cuya procedencia no se conoce. La momia de Sátivanorte y la de Ubaté (o Sibaté) corresponderían al período Muisca tardío. Con excepción de la momia eviscerada hallada en Gachantivá, todas las otras momias muiscas reflejan un grado bien desarrollado de la técnica de deshidratación. Parece seguro afirmar que para esa época (siglos XI a XV), los diferentes grupos que ocupaban el territorio muisca tenían siglos de experiencia en esta actividad.

El promedio de antigüedad de las momias halladas en territorio muisca es de 1280 calAD, rango 1000–1650 calAD. **Langebaek** (2001) y **Salamanca** (2001) reportan dos fechas para la de Tiguasú (municipio de Sáchica) en los años 690±80 AD y 850±50 AD, pero no suministran las fechas convencionales en años BP ni sus calibraciones, aunque si están referidas a 0-BP, podrían encontrarse en un rango de alrededor 678 a 986 calAD y 885 a 1138 calAD, respectivamente.

Máscaras y momias

Este grupo de momias recibe la denominación de momias artificiales complejas porque se caracterizan por tener una máscara hecha de alguna resina dura. **Sotomayor & Correal** (2003) presentan tres análisis químicos de esta resina. Dos de sus muestras indicaron constituyentes minerales y la tercera indica que sus constituyentes son vegetales. Las máscaras que hemos fechado tienen un rango de 1390-1520 calAD, lo que indica que son el grupo más reciente, con apenas unos 150 años de diferencia entre la más antigua y la más reciente, y que su fabricación supuso un trabajo extraordinario. Su origen y asociación étnica son desconocidos, pero son, sin duda, ejemplos de un procedimiento artístico singular.

Discusión

Las momias humanas son relativamente escasas en la arqueología colombiana, a pesar de que muchas sociedades prehispánicas tuvieron dicha práctica. Las referencias y noticias sobre esta actividad se encuentran en las crónicas de la conquista y en varios documentos de los siglos XVI y XVII en los que se describe en algún detalle el contexto sociopolítico y socio-religioso de aquellas sociedades, y se da alguna información sobre la manera en que se realizaba el proceso de momificación. Los trabajos de varios colegas suministran información muy valiosa sobre las momias en Colombia desde varias perspectivas como la paleopatología, la paleogenética, la paleodieta, la vida ritual y ceremonial, y los textiles (**Cardale de Schrimppff**, 1989; **Cárdenas-Arroyo**, 1989, 1990; **Correal**, 1990; **Monsalve, et al.**, 1996; **Rodríguez**, 2006, 2020; **Sotomayor, et al.**, 2010). Pero son pocos los cuerpos momificados que han llegado hasta nuestros días y casi en todos los casos carecemos de la información sobre los contextos arqueológicos en que se encontraron, ya que prácticamente todas fueron halladas por gaaquería, con la excepción de las excavadas por Eliécer Silva Celis en Chiscas, Boyacá (**Silva-Celis**, 1945), de las cuales dejó una relación y algunas fotografías del sitio. Una idea general de cómo eran estos contextos arqueológicos de momias halladas en cuevas viene del trabajo de Justus Wolfran Schottelius en Santander en la década de 1940 y, aunque las encontró ya saqueadas, al menos dejó la información del aspecto general de las cuevas de Los Indios y de La Loma y pudo excavar un entierro que aún estaba intacto (**Schottelius**, 1946). Estos dos trabajos, más una breve descripción de dos cuevas en la vereda La Purnia, municipio de Los Santos (Santander), hecha por el señor Humberto Castellanos a Marianne Cardale a finales de 1980 (**Cardale de Schrimppff**, 1987), y los datos anotados en el registro del Museo Británico en Londres de dos momias

halladas en el siglo XIX en cuevas del área de Villa de Leyva (**Cárdenas-Arroyo**, 1989), además de una fotografía extraordinaria tomada por Héctor Acebes en la misma década de 1940 en la región de Perijá (**Figura 3**) permiten entrever, al menos en parte, cómo pudieron ser estos lugares de entierro desde la perspectiva arqueológica. **Reichel-Dolmatoff** (1946) también menciona el entierro de momias en cuevas de la región del Catatumbo, en el sitio Molino de Los Condes, municipio de Convención, pero no suministra detalles. La otra fuente de información proviene de crónicas y documentos de los siglos XVI a XVIII y de algunos viajeros del siglo XIX que escribieron descripciones muy breves de entierros prehispánicos en cuevas, por ejemplo, Élisée Reclus, Jean Baptiste Boussignault y John Potter Hamilton.

La narración que hace Pascual de Andagoya de sus entradas por el Darién en el primer cuarto del siglo XVI y las observaciones de Gonzalo Fernández de Oviedo en aquellos mismos años –ambos cronistas presenciales– ilustran bien que la práctica de la momificación era bastante extendida en la región de Urabá, pero es claro que la humedad de esa área no favoreció la conservación de los cuerpos. Estas narraciones son importantes porque fueron de las primeras que se refirieron al tratamiento que los nativos le daban al cuerpo del difunto. Así lo describía Andagoya en 1541 en texto que copio directamente de la transcripción hecha por Martín Fernández de Navarrete en 1794:

“... y el hijo heredero que ya era señor con toda la casa de su padre, y principales de la tierra, se juntaban aquel día, y colgaban al señor con unos cordeles medio estado y ponían a la redonda del muchos braseros de carbon que con el calor del fuego se enjugase y se derritiese, y debaxo del cuerpo tenían otras dos vasijas de barro en que caía la grasa del cuerpo; y despues que estaba enjuto lo colgaban en su palacio”. (**Andagoya**, 1541, AGI-folio 148).

Esta y muchas otras descripciones hablan de varios cuerpos momificados colocados en orden en casas y templos, pero lamentablemente ninguno de ellos se ha conservado. Preservar el cuerpo de personas de jerarquía tenía entonces una motivación política, como la tiene hoy, y se trataba de una práctica milenaria. Los hallazgos de Correal en la Sabana de Bogotá en el sitio Aguazuque (**Correal**, 1990), al suroccidente de Bogotá, demuestran cuán antigua era la acción de realizar entierros humanos múltiples simultáneos en los que se enterraban cuerpos completos, otros decapitados, y varios huesos largos y craneos decorados con líneas y diseños circulares. Todo aquello ocurrió 3000 años antes de nuestra era y exigió un tratamiento previo de descarnar y tajar los cuerpos, secar los huesos y preparar las superficies óseas para pintarlas. La momificación cultural o antropogénica y todas estas formas de tratamiento complejo del cuerpo humano seguramente tenían alguna relación con el estatus sociopolítico de los individuos, aunque no era una regla. El caso de los yukos de la serranía de Perijá muestra que el complejo proceso de enfardelamiento, el ceremonial y el entierro secundario eran para todos, no solamente para las personas de mayor jerarquía o importancia social.

En el contexto suramericano, las momias prehispánicas halladas en Colombia son relativamente tardías. Las más antiguas, no solo del continente sino del mundo, son las momias de la cultura Chinchorro, que se asentó en la costa pacífica de Chile y Perú, desde Antofagasta hasta Ilo (**Arriaza**, 2015), y cuyas fechas radiocarbónicas se remontan a 8970 ± 255 BP y fueron obtenidas directamente de tejido humano de un cuerpo momificado naturalmente (**Aufderheide, et al.**, 1993; **Muñoz, et al.**, 1993). Esta fecha calibrada resulta en un rango de 8808-7531 calBC (calibrada con SHcal13). En el Perú la fecha más antigua hasta ahora asociada directamente a un cuerpo naturalmente momificado sería la obtenida en la Cueva Tres Ventanas, en Chilca, donde Federico Engel obtuvo una serie de fechas a partir del octavo milenio BC. Específicamente, la fecha que nos interesa como referencia es la obtenida en el fardo funerario de un bebé hallado en la Cueva I, fechado en 6290 ± 120 BP (**Vallejos**, 1982), fecha que ya calibrada resulta con un rango de 5482-4961 calBC. En estos lugares los arqueólogos obtuvieron otra serie de fechas de radiocarbono en materiales como carbón proveniente de fogones en pisos de habitación (como en el caso de Acha-2), y de esteras y piel de camélido (como en la Cueva Tres Ventanas) que confirman por asociación la antigüedad de los restos momificados encontrados (**Wann, et al.**, 2015).

Tipos de momificación indígena en Colombia

Aunque en Colombia no tenemos fechas tan tempranas para restos momificados, esto no significa que los antiguos habitantes de lo que hoy es nuestro territorio no practicaran la momificación, o que no se hubieran preservado cuerpos humanos espontáneamente milenios atrás. En futuros estudios se deberá determinar en qué momento los aborígenes observaron el fenómeno de la deshidratación de los cuerpos y las razones por las cuales comenzaron a deshidratarlos exprofeso. Por el momento, hemos dicho que la momia más antigua que tenemos en Colombia hasta el momento proviene de la región de Chiscasy está fechada en 340 calAD. Es importante explicar los tipos básicos de momificación que existieron en Colombia y con base en ello proponer tres tipos de momificación: 1) momificación natural; 2) momificación artificial mediante deshidratación al fuego, y 3) (a) momificación artificial compleja con evisceración y (b) momificación artificial compleja con máscaras para los muertos.

Momificación natural

Llamada también espontánea, esta requiere un medio ambiente seco que minimice la actividad de organismos descomponedores. En la **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2985>, la momia natural más antigua en colecciones colombianas, es la de Mutiscua (Santander), con 1200 calAD. Por lo general, los cuerpos momificados de este modo no se encuentran en buen estado (**Figura 4a**) y sus órganos internos están muy descompuestos y casi siempre son difíciles de identificar. Esto se debe a que siempre permanece un porcentaje de humedad en los órganos y vísceras que contri-



Figuras 4. Momia natural de procedencia desconocida. Obsérvese el contraste entre los tejidos bien conservados de una momia antropogénica (Figura 5) y esta cuyos tejidos están muy deteriorados (MO-D14)

buye a su deterioro después de la muerte (**Figura 4b**). La parte externa, sin embargo, se conserva hasta cierto punto, sobre todo si el cuerpo ha sido envuelto en mantas o cueros que lo protegen de agentes externos tales como los animales carroñeros o los roedores. De hecho, un buen número de fardos funerarios no eran enterrados bajo tierra sino colocados en cuevas a donde estos animales pueden tener acceso y dañar los fardos. En el caso de ser inhumados en fardo en tumbas de pozo y bóveda, los cuerpos tenían mejores posibilidades de conservación.

Momificación artificial mediante deshidratación al fuego

Llamada también intencional, cultural o antropogénica, es la práctica de deshidratar el cuerpo expofeso. Las más antiguas que tenemos en colecciones colombianas son dos provenientes de Chiscas (340 calAD y 650 calAD). En Colombia esto se conoce por las crónicas de la conquista y por la observación directa de los cuerpos que forman parte de las colecciones de museo y que ya hemos anotado en la primera parte de este trabajo. Esta deshidratación se llevaba a cabo aplicando el calor producido por el fuego como lo describe Andagoya en el texto ya citado. Esta era la manera más corriente de producir una momia y así lo reiteran otros cronistas presenciales, por ejemplo, Cieza de León al hablar del área de Ancerma: "... tomando el cuerpo... a todas partes ponen fuego grande..." (**Cieza de León**, 1962[1553]), y Fernández de Oviedo al referirse a Panamá (o Castilla de Oro), donde sentaban el cuerpo para secarlo: "... é assiéntanle en una piedra o leño... tienen muy grand fuego é muy continuo, tanto que toda la grasa é humedad le sale por las uñas de los pies é de las manos..." (**Fernández de Oviedo**, 1853[1532]). También los cronistas secundarios reiteran el procedimiento, por ejemplo, López de Gómara refiriéndose a las tierras del cacique Comogre, cerca de Acla (hoy costa suroriental de Panamá, cerca del golfo de Urabá): "... desecan los cuerpos de los reyes y señores al fuego poco a poco... Ásanlos, en fin, después de muertos, y aquello es embalsamar." (**López de Gómara**, 1991[1552]). La evidencia directa proviene de las momias en las colecciones. La momia identificada con el número de catálogo del Icanh 39-I-776 es de origen desconocido, aunque Silva Celis sugirió que, así como otras momias de la colección, podría provenir "... del territorio chibcha" (**Silva Celis**, 1945). Esta momia presenta un área quemada en el costado derecho del tórax a la altura de las costillas 9 a 12 (**Figura 5**), producto de su cercanía al fuego. Era

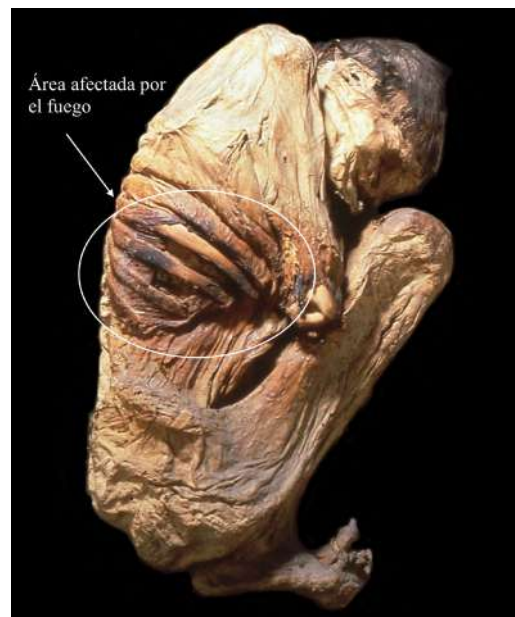


Figura 5. Momia antropogénica muy bien conservada. Obsérvese el área quemada en el costado derecho del tronco debido a su cercanía al fuego durante el proceso de momificación (Icanh 38-I-776)

una persona joven, de 14 a 16 años, en el momento de morir, lo que se determinó radiográficamente por la sutura incompleta de las epífisis de los huesos largos. Otro ejemplo es el de una momia identificada con el número de catálogo del Ican 00-OS-001. Es un niño o niña de unos 3 años en el momento de morir según se determinó radiográficamente por el grado de desarrollo de los dientes. Son observables los huesos del cráneo a la altura del parietal y temporal derechos modificados, de color blanco, por acción del fuego (**Figura 6**). Estos dos ejemplos confirman las descripciones de las crónicas y documentos del siglo XVI en el sentido de que los cuerpos eran desecados al fuego.



Figura 6. (a) Momia de un niño o niña de procedencia desconocida. El cráneo muestra claras señas de calcinación por efecto del fuego usado en el proceso de deshidratación del cuerpo. Parte del orificio que abarca el parietal y temporal derechos fue hecho para extraer el cerebro. La sección más baja ha sufrido fractura *post mortem* por la fragilidad de los huesos que se vuelven quebradizos al calcinarse. (b) Detalle del pequeño collar que tiene entre la mano izquierda (Icanh 00-OS-0001)

Momificación artificial compleja con evisceración y con máscaras para los muertos

Una variante de la momificación cultural que se practicó en la Colombia prehispánica es menos frecuente. Algunos cronistas describieron que los cuerpos se abrían mediante una incisión larga desde el tórax al abdomen para extraer las vísceras. Esto implica un paso más complejo en la preparación de un cuerpo que su simple exposición al fuego. Anotaron, además, que estos cuerpos eviscerados eran rellenos con objetos votivos, algodones en los que se envolvían seguramente piezas de orfebrería o de cerámica, o cualquier otro tipo de objeto votivo que podían ser simplemente hojas, ramitas o piedrecillas. Las noticias de cronistas en este sentido son muy escasas, pero hay una de un testigo ocular en el Nuevo Reino, autor anónimo del Epítome, que escribió refiriéndose a los señores principales: “Métenlos e(n)tre unas mantas muy liados sacándoles primero las tripas y lo demás de las barrigas y hinchendoselas de su oro y esmeraldas...” (Anónimo, 1995[ca.1544]). De este tipo de momias solo conozco un ejemplo que confirmaría esta práctica en Colombia, aunque dudo que la evisceración se hiciera con el fin específico de preservar el cuerpo, sino más bien para preparar la cavidad torácica para servir de recipiente y santuario. La momia en cuestión a la que me refiero es de una persona adulta encontrada en Gachantivá (área de Villa de Leyva) y llevada a Inglaterra en el siglo XIX. Hoy hace parte de la colección del Museo Británico (BM 1842-11-12-1) y su fecha es 1270 calAD. Sobre este mismo tema, cronistas e historiadores escribieron que los indígenas prehispánicos de nuestro territorio embalsamaban los cuerpos con una sustancia resinosa a la que llamaban *moque*. En realidad, este es un término que hace referencia a la acción de sahumar, una práctica corriente en rituales de diversa índole, entre ellos los rituales funerarios. En un trabajo anterior (Cárdenas-Arroyo, 1990a) he abordado el tema explicando que los cronistas e historiadores confundieron la sustancia vegetal usada para sahumar con un producto para embalsamar. De esto último no hay evidencia en momias colombianas, por lo menos hasta el momento.

Seguramente las momias de fabricación más compleja en Colombia son los cuerpos a los que, además de haber sido deshidratados al fuego, se les fabricó una máscara de resina negra o carmelita que les cubre toda la cara (Figura 7). Algunas de estas máscaras pertenecen a la colección del Instituto Colombiano de Antropología que cuenta con ocho cabezas con máscara, otra está en la colección del Museo del Oro, dos están en la colección de la Galería Cano de Bogotá, dos en una colección privada en Europa (Zech, et al., 2020) y otra en otra colección privada en Filadelfia, Estados Unidos. Esta lista solo incluye las máscaras que he visto y con las que he podido trabajar. Hay otras en colecciones colombianas que aún no han sido estudiadas, por lo que el número total seguramente es superior a 14. De estos 14 ejemplares, dos tienen la cabeza unida al cuerpo: una es de la colección del Icanh (00-OS-0006) y otra pertenece a la Galería Cano, lo que confirma que el complicado proceso de fabricar las máscaras no se hizo cercenando la cabeza del tronco sino estando el cuerpo completo. No cabe duda de que esto aumentaba la dificultad y la complejidad del trabajo. Sus fechas van de 1390–1520 calAD.

En este punto es importante hacer una precisión sobre el origen de estas máscaras. Durante muchos años se pensaba que habían sido producidas por los indígenas yuko de la Serranía de Perijá, es decir, que eran de origen etnográfico. Tres de estas cabezas estaban marcadas “yuko” con tinta negra. Estas cabezas marcadas “yuko” pertenecían al Departamento de Antropología de la Universidad de Los Andes, que las donó al Instituto Colombiano de Antropología a finales de la década de 1990. En el momento no tengo información si el Icanh les ha cambiado esa marca, que resulta confusa. En un trabajo de Sotomayor & Correal (2003) se presentan estas máscaras como de filiación yuko, asociación que hacen con base en trabajos previos de Chávez (1977, 1990). Según la descripción de Chávez, estas máscaras se hacían como parte del ritual del entierro secundario, es decir, se fabricaban al desenterrar a los muertos como era costumbre entre ellos. No sabemos si el investigador estuvo presente durante un ritual de desentierro, si vio personalmente la manufactura de estas máscaras, o si tomó fotografías. Infortunadamente,

el relato, aunque extraordinario sin duda, no viene sustentado con evidencia de primera mano. Como se puede ver en la **tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2985>, las cuatro fechas de radiocarbono tomadas directamente de muestras de hueso de los cráneos con máscara confirman su origen arqueológico (rango 395–616BP, o 1300–1600calAD), es decir, no eran de los yukos de las décadas de 1960 o 1970 cuando Chávez escribió sus notas. Leyendo detenidamente los trabajos de etnólogos que trabajaron con los yukos, ninguno reportó esta práctica cultural tan asombrosa. Todos se detienen a hablar de las prácticas funerarias de los yukos, sobre el sahulado del fardo y el ritual del entierro secundario del que incluso Reichel-Dolmatoff tomó fotografías porque estuvo presente en ese momento; pero ninguno hace mención de estas máscaras. Reichel-Dolmatoff no habría pasado por alto unos objetos de tal factura y, sin embargo, no existe en ninguno de sus tres trabajos sobre los yukos referencia alguna a estas máscaras. Héctor Acebes, que tomó algunas fotos extraordinarias entre estos indígenas en la década de 1940, tampoco. En las conversaciones que tuve con él en los años 90, le pregunté sobre estas máscaras y le mostré las de la colección del Icanh. Nunca las había visto ni oído mencionar en territorio yuko. Alejándonos un poco de la serranía de Perijá, algunos mamos kággaba piensan que esas máscaras eran chimilas (**Cadavid**, com. pers.), y es interesante constatar que tanto los kággaba como los iktá aún usan máscaras de madera parecidas en rituales muy sagrados y secretos, las cuales son bien conocidas gracias a los trabajos de Preuss y de Reichel-Dolmatoff sobre la Sierra Nevada de Santa Marta. Sobre su uso actual tengo noticia directa por conversaciones en la Sierra con Mamo Kingama y Mamo Gregorio Izquierdo en el 2019, ambos iktá, quienes me informaron que usan máscaras en ceremonias muy sagradas y privadas y que las guardan en las kankúruas, algunas de ellas muy antiguas (*Kankúruas* son los templos o casas sagradas de los iktá. Hay una masculina y otra femenina en cada lugar donde se decide construirlas. El término no solo hace referencia a la estructura como tal, sino al área donde se encuentran acompañadas



Figura 7. Momia con máscara de resina. La cabeza sigue unida anatómicamente al tronco. Estas no son cabezas trofeo, cuyo contexto es uno de combate y adquisición de prestigio. Son máscaras que tuvieron algún significado importante en la vida religiosa o política, difícil de interpretar a falta del contexto arqueológico completo (Icanh 00-OS-0006).

de otras edificaciones menores que forman parte del contexto sagrado). Sin embargo, otra información sobre la proveniencia de estas momias enmascaradas no se origina en una fuente científica sino que viene de un guaquero, el Sr. Cano, de la galería que lleva su nombre. Según su descripción, las momias enmascaradas de la galería fueron halladas en la región de Guicán, Sierra Nevada del Cocuy. Como hipótesis no deja de ser interesante porque sabemos que en esta región se han hallado muchos cuerpos momificados, desde Boyacá hasta Santander, y Guicán se encuentra justo en medio de esta área, rodeado de sitios arqueológicos con restos de momias, fardos y otros entierros hallados en Socotá, Chita, Chiscas, Úbita, etc. Sin embargo, al revisar las crónicas tempranas del siglo XVI, fray Pedro Aguado dedica el capítulo tercero del libro cuarto de su obra a la entrada que hizo Hernán Pérez de Quesada en 1538 o 1539 al área del Cocuy pasando por pueblos como "... Ura, Chita, Cocuy, Panqueba, Guacamayas..." (**Aguado**, 1956 [ca. 1582]), y otros, sin mencionar máscaras. Silva Celis, quien como ya hemos dicho, realizó varias excavaciones arqueológicas en toda la región, no habla de las máscaras, y Ann Osborn, en uno de los trabajos más detallados y serios sobre el territorio u'wa, tampoco las menciona (**Osborn**, 1985). Una referencia a máscaras para los muertos la encontramos en Cieza de León, pero en el otro extremo del país: en el Valle, en tierras del cacique Petecuy (en las crónicas, Valle de Lile, cerca de Cali). Hablando de los hombres muertos, escribió que "... hacíanles rostros de cera con sus propias cabezas... de tal manera que parecían hombres vivos" (**Cieza de León**, 1962 [1553]). Por el momento queda por resolver el dilema de su procedencia.

Conclusiones

Las fechas de radiocarbono obtenidas en momias arqueológicas colombianas indican que la práctica de la momificación antropogénica se conocía por lo menos desde el año 350 calAD (siglo IV de nuestra era). Para la momificación natural, hasta ahora la fecha más antigua es de 1200 calAD (siglo XIII de nuestra era). Con toda seguridad se hallarán momias naturales mucho más antiguas. El buen estado de conservación en que se encuentran las momias antropogénicas hoy, más de mil seiscientos años después, demuestra que el sistema empleado de deshidratación al fuego fue eficaz. Además, hay que tener en cuenta otra variable: el ambiente de baja humedad relativa que existe en las cuevas. Ambos factores determinaron que estos cuerpos se conservaran. Los indígenas que prepararon estas momias entendían que no bastaba con secar el cuerpo, sino que su conservación dependía del medio ambiente en el cual las colocaban. El contraste entre este tipo de enterramiento, las inhumaciones realizadas directamente en bóvedas cavadas en la tierra, y las cremaciones y entierros secundarios, seguramente indica alguna particularidad de orden social o jerárquico. Ann Osborn ya observaba esta diferenciación en su trabajo en la región del Cocuy y escribió que "La existencia de sitios de entierro con tan diferentes métodos funerarios, es un tema intrigante que merece un estudio particular" (**Osborn**, 1985). Sobre este punto, llama la atención la momificación de niños. ¿Indica esto que pertenecían a la élite y por ello merecieron ser momificados?

En nuestra muestra de estudio las momias antropogénicas no complejas ocupan un rango temporal de aproximadamente 800 años. Entre 1163–1389 calAD hay un cuerpo que fue eviscerado, una práctica que presenta cierta dificultad técnica para preservar un cuerpo. Es imposible especular con base en un solo ejemplo sobre el momento en que apareció esta práctica. Por lo que se puede ver en esta momia, parte de las vísceras no fueron extraídas y permanecen secas en la cavidad abdominal, lo que sugiere un trabajo anatómico más bien deficiente. Solo queda esperar que el hallazgo de otras momias objeto de esta técnica permita hacerse una idea más precisa sobre el procedimiento que usaron los indígenas para desocupar las cavidades corporales. En el caso de las máscaras, muchas muestran claramente que el cerebro fue extraído mediante una abertura artificial en la base del occipital, casi siempre incluyendo el foramen magnum. Es probable que esta acción se hiciera en parte para facilitar el acceso de las manos a la cavidad craneal para poder fabricar las máscaras anclándolas por dentro, pero queda también la duda de si la extracción del cerebro se

hizo para realizar algún ritual de canibalismo ceremonial. **Rodríguez** (2020) relata que los guayupes tenían la costumbre de triturar partes de los cuerpos, y mezclarlas con cenizas y alguna bebida que luego ingerían. De hecho, esta práctica es confirmada por un ilustrísimo testigo ocular en el Amazonas a comienzos de la década de 1850, Alfred Rusell Wallace, quien vivió esta experiencia en comunidades tarianas y tukanas. Dice que después de un mes “... desentierran el cuerpo, que para entonces ya está muy descompuesto, que colocan en una gran sartén, u horno, sobre el fuego, hasta que todas las partes volátiles se eliminan con un hedor espantoso, quedando solamente una masa carbonizada negra que se golpea hasta [hacerla] un polvo que se mezcla en varias vasijas grandes... de caxirí; esto lo beben todos los ahí reunidos hasta terminarlo; creen, por tanto, que las virtudes del muerto pasan a quienes beben...” (**Wallace**, 1853). Sugerimos que la fabricación de estas máscaras venía acompañada de un contexto ritual muy complejo que seguramente duraba varios días, como lo enseñan los casos etnográficos. Estas máscaras ocupan el rango temporal más reciente de todas las momias de nuestra muestra: 1390-1600 calAD.

En términos generales, nuestro estudio permite proponer lo siguiente: 1) la momificación antropogénica en Colombia tiene por lo menos 1600 años de antigüedad; 2) las momias naturales en Colombia tienen por lo menos 1200 años de antigüedad, y seguramente mucho más; 3) las momias de preparación compleja con evisceración se conocen por lo menos desde el siglo XIII AD, y seguramente esta práctica era más antigua; 4) las momias de preparación compleja con máscaras fabricadas con resinas naturales se conocen por lo menos a partir del siglo XIV de nuestra era (tal vez antes) y sus artesanos siguieron haciéndolas en tiempos de la conquista, y 5) algunas fechas obtenidas mediante excavaciones sistemáticas en la cordillera Oriental en Santander y Boyacá ayudan a contextualizar cronológicamente algunas momias que no tienen contexto arqueológico completo.

Para comprender mejor la práctica de la momificación en términos de tiempo arqueológico transcurrido, es importante tratar de asociarla con las cronologías desarrolladas por la arqueología para las sociedades indígenas que ocuparon la cordillera Oriental. Si existen fragmentos de cerámica o piezas de cerámica que acompañaban a estas momias como parte de ajuares funerarios, valdría la pena someter esa cerámica a estudios de termoluminiscencia y cotejarla, además, con los datos provenientes de excavaciones sistemáticas estratificadas. De este modo, la serie de fechas obtenidas en momias podría contextualizarse cronológicamente con momentos de desarrollo sociopolítico en los Andes orientales de Colombia.

Queda por estudiar con mayor detenimiento el área del valle del río Cauca y la región del Darién. Las noticias en las crónicas hablan de un gran número de sociedades que practicaban el canibalismo, aparentemente a gran escala, según se colige del número y frecuencia de estas narraciones, que incluía a veces rellenar las pieles de las víctimas con cenizas (**Cieza de León**, 1962 [1553]). Sin duda son impactantes las imágenes que se forma el lector de estas crónicas y son muchos los autores que se han concentrado en el tema. Lo cierto es que como bien lo anota Betancourt, hasta la fecha no se han hallado restos arqueológicos que confirmen estas noticias (**Betancourt**, 2018) y los textos de los siglos XVI a XVIII no se pueden leer sin un filtro histórico crítico. Es verdad que muchas noticias sobre momificación que hemos mencionado arriba han sido corroboradas por datos arqueológicos, descripciones de testigos directos o, incluso, por fotografías. Ejemplos etnográficos modernos en otros lugares del mundo también muestran que los rituales de momificación y el uso ritual de algunas partes del cuerpo humano son ciertos, como lo documentaron hace poco en Papua, Nueva Guinea, Lohmann, Beckett y Nelson. Los mencionados investigadores presentaron un documental audiovisual durante el IX Congreso Mundial de Estudios sobre Momias celebrado en Lima, Perú, en agosto de 2016, que muestra todo el proceso de momificación de un jefe tribal en Nueva Guinea, organizado por él mismo en vida. También nos enseñan que hay que prestar mucha atención antes de hacer inferencias directas sobre la jerarquización social o las diferencias de poder político y religioso cuando hablamos de momias. El caso de los yuko es un buen ejemplo de cómo una sociedad realiza un proceso muy complejo de entierro que se aplica

a todos los miembros de la sociedad, sin distinción de jerarquías. Otros, por el contrario, como el citado caso en Nueva Guinea, muestran que el entierro complejo está reservado para individuos de cierta jerarquía y que ser momificado es una señal de prestigio político.

No deben extrañarnos estas prácticas rituales que a los ojos de Occidente parecen salidas de un libro de cuentos; pero son ciertas. De todos modos, como lo enfatiza Betancourt, en ciencia solo vale la evidencia empírica y en eso debemos empeñarnos en nuestros estudios sobre momias en Colombia.

Información suplementaria

Figura 1S. Mapa general de las áreas y lugares donde se practicó la momificación en Colombia y donde se han hallado, o se sabe por documentos etnohistóricos que se practicaba la momificación, o donde existió algún tipo de procedimiento para conservar cuerpos, cabezas, pieles o partes de cuerpos humanos por motivos de prestigio político o militar, o por razones sagradas. Vea la figura 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2984>

Tabla 1S. Fechas de radiocarbono en momias arqueológicas de Colombia. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2985>

Tabla 2S. Procedencia y contextos de las momias en este estudio. Vea la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1226/2986>

Agradecimientos

Agradezco a Cristina Martina por la reconstrucción volumétrica de la momia de la **figura 2b**. A Roberto Lleras y la Subdirección técnica del Museo del Oro por facilitarme las fechas para las momias de Mutiscua y de dos momias de la colección sin proveniencia exacta. A Marianne Cardale de Schrimppf y a Gonzalo Correal por precisar la información sobre sus fechas de Los Santos. A Sanne Palstra del *Center for Isotope Research* de la Universidad de Groningen y a Karl Håkansson del *Tandem Laboratory* de la Universidad de Uppsala por reenviarme los resultados de radiocarbono de Los Santos y de Sátivanorte, respectivamente. A Bernardo Arriaza mi agradecimiento por su buena sugerencia para la calibración de las fechas y por confirmar las fechas más antiguas de las momias chinchorro. Al Museo del Oro de Bogotá por facilitarme el acceso a su colección y por autorizar la reproducción de la fotografía de la **figura 4b** de Clark M. Rodríguez. Igualmente, un agradecimiento póstumo a mi buen amigo Héctor Acebes por compartir conmigo sus maravillosas fotos (**Figura 3**) y las anécdotas de sus viajes. Los dos mapas y todas las otras fotos son de mi autoría.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses para la elaboración de este trabajo.

Referencias

- Aguado, P.** (1956 [ca.1582]). Recopilación Historial. Tomo I. Bogotá, Colombia: Biblioteca de la Presidencia de Colombia, No. 31. 672 p.
- Andagoya, P.** (1541). Relación muy circunstanciada de los sucesos de Pedrarias Dávila en el Reyno de Tierra Firme etc. Sevilla, España: Transcripción de Martín Fernández de Navarrete. Manuscrito original del Archivo General de Indias, Sevilla. Leg. 25, Expediciones 1519 a 1697. 100 p.
- Anónimo.** (1995 [ca.1544]). Epítome de la conquista del Nuevo Reino de Granada. En: Hermes Tovar Pinzón (Ed), Relaciones y visitas a los Andes SXVI (Tomo III) (121-143). Bogotá, Colombia: Colcultura-ICCH. 501 p.
- Archila, S.** (1986). Nuevo aporte cronológico para el área muisca. Bol. Arq. **1** (2): 35-38.
- Arriaza, B. T.** (2015). Cultura Chinchorro. Las momias artificiales más antiguas del mundo. Santiago, Chile: Editorial Universitaria. 310 p.
- Aufderheide, A. C.** (2002). The Scientific Study of Mummies. Cambridge: Cambridge University Press. 608 p.

- Aufderheide, A. C., Muñoz, I., Arriaza, B.** (1993). Seven Chinchorro Mummies and the Prehistory of Ancient Chile. *Am. J. Phys. Anthro.* **91**: 189-201.
- Betancourt, D.M.** (2019). Momias y cabezas rituales. ¿Ritual funerario, veneración de ancestros o trofeos de guerra? Bogotá: Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia. 86 p.
- Boada-Rivas, A. M. & Cardale de Schrimpf, M.** (2017). Cronología de la sabana de Bogotá. Pittsburgh, Estados Unidos. Comparative Archaeology Database, University of Pittsburgh. Fecha de consulta: 12 de marzo de 2020. Disponible en: <http://www.cadb.pitt.edu>. 199 p.
- Boada-Rivas, A.M., Mora-Camargo, S., Therrien-Johannesson, M.** (1988). La arqueología: cultivo de fragmentos cerámicos. *Rev. An. Arqueo.* **IV** (2): 161-197.
- Cadavid-Camargo, G.** (1984). Investigaciones arqueológicas en el área guane. En: Investigaciones etnohistóricas y arqueológicas en el área guane (75-163). Bogotá: Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales, Banco de La República. 163 p.
- Cardale de Schrimpf, M.** (1987). Informe preliminar sobre el hallazgo de textiles y otros elementos perecederos conservados en cuevas en Purnia, Mesa de Los Santos. *Boletín de Arqueología.* **2**: 3-23.
- Cárdenas-Arroyo, F.** (2009). Overmodeled Skulls from Colombia. En: A. C Aufderheide (Ed), Overmodeled Skulls (243-265). Duluth, Estados Unidos: Heide Press. 360 p.
- Cárdenas-Arroyo, F.** (1994). Colombia Mummified Human Burials—Comentario en *Archaeometry Datelist 12*. *Archaeometry.* **36**: 370-371.
- Cárdenas-Arroyo, F.** (1990a). Moque, momias y santuarios: una planta en contexto ritual. *Rev. Antrop. Arqueo.* **VI**: 39-58.
- Cárdenas-Arroyo, F.** (1990b). La momia de Pisba, Boyacá. *Bol. Mus. Oro.* **27**: 3-13.
- Cárdenas-Arroyo, F.** (1989). La momificación indígena en Colombia. *Bol. Mus. Oro.* **25**: 121-123.
- Cárdenas-Arroyo, F., Martina, M.C.** (2019). Two Findings of Gallstones in Archaeological Mummies from Colombia. *Int. J. Paleo.* **24**: 53-59.
- Cieza de León, P.** (1962 [1553]) *La Crónica del Perú*. Madrid, España: Espasa-Calpe. 294 p.
- Correal-Urrego, G.** (1990). Aguazuque. Evidencias de cazadores, recolectores y plantadores en la altiplanicie de la cordillera oriental. Bogotá, Colombia: Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales, Banco de La República. 319 p.
- Correal-Urrego, G. & Flórez, I.** (1992). Estudio de las momias guanés de la Mesa de los Santos (Santander, Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **18**: 283-290.
- Chávez M, A.** (1977). Máscara precolombina. Bogotá, Colombia. Ediciones Zazacuabi, pp. 49, 51.
- Chávez M. A.** (1990). La máscara, ritual y mito. Periódico “A La Zaga de la América Oculta”. Bogotá: Universidad Javeriana, Noticias (6).
- Fernández de Oviedo, G.** (1853 [1532]). *Historia general y natural de las Indias, islas y tierra-firme del mar océano*. Madrid, España: Real Academia de la Historia (Tomo II de la 2a Parte, 3º de la obra). 544 p.
- Giraldo-Jaramillo, G.** (1941). El cementerio indígena de Los Santos (informe). *Bol. Hist. Ant.* **XXVIII**: 308-322.
- Hedges, R.E.M., Housley, R.A., Law, I.A., Bronk, C.R.** (1989). Radiocarbon Dates from the Oxford AMS System: *Archaeometry Datelist 9*. *Archaeometry.* **31**: 207-234.
- Hernández de Alba, G.** (1943). Momias de Chiscas (Boyacá). *Bol. Mus. Arqueol. Colom.* **1** (1): 3-9.
- Hogg, A. G., Hua, Q., Blackwell, P. G., Niu, M., Buck, C. E., Guilderson, T. P., Heaton, Timothy J., Palmer, J. G., Reimer, P. J., Reimer, R. W., Turney, C., Zimmerman, S.** (2013). SHCal13 southern hemisphere calibration, 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon.* **55**: 1889-1903.
- Holden, T.** (1989). Preliminary Work on South American Mummies Held at the British Museum. *Paleopathology Newsletter.* **65**: 5-9.
- Langebaek, K.K.** (1995). Arqueología regional en el territorio muisca. Estudio de los valles de Fúquene y Susa. Pittsburgh, Estados Unidos: University of Pittsburgh Department of Anthropology / Universidad de Los Andes, Departamento de Antropología. 215 p.
- Langebaek, K.H.** (2001). Antecedentes: la secuencia arqueológica en los Andes orientales. En: K.H. Langebaek (Ed), *Arqueología regional en el valle de Leiva: procesos de ocupación humana en una región de los Andes orientales de Colombia* (13-17). Bogotá, Colombia: Informes Arqueológicos del Instituto Colombiano de Antropología No. 2. 91 p.
- Lleras-Pérez, R.** (1986). Palogordo: una aldea guane temprana. *Bol. Arq.* **1** (2): 44-47.
- López de Gómara, F.** (1991 [1552]). *Historia general de las Indias y vida de Hernán Cortés*. Caracas, Venezuela: Biblioteca Ayacucho. 355 p.
- Monsalve, M. V; Cárdenas-Arroyo, F; Guhl, F; Delaney, A. D; Devine, D.** (1996). Phylogenetic Analysis on mtDNA Lineages in South American Mummies. *Ann. Hum. Gen.* **60**: 293-303.

- Morales-Gómez, J.** (1984). Etnohistoria guane: territorio e identidad étnica. En: Investigaciones etnohistóricas y arqueológicas en el área guane (9-72). Bogotá, Colombia: Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales, Banco de La República. 163 p.
- Moreno-González, L.** (2012). Arqueología del nororiente colombiano. Los Teres: un sitio de asentamiento de las culturas prehispánicas preguane y guane. *An. Hist. Reg. Fron.* **17**: 315-342.
- Muñoz, I. & Chacama, J.** (1993). Patrón de asentamiento y cronología de Acha-2. En: I. Muñoz, B. Arriaza y A.C. Aufderheide (Eds), Acha-2 y los orígenes del poblamiento humano en Arica (21-46). Arica, Chile: Ediciones Universidad de Tarapacá. 169 p.
- Osborn, A.** (1985). El vuelo de las tijeretas. Bogotá, Colombia: Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales. 153 p.
- Pérez-Riaño, P.F.** (1999). Arqueología en el suroccidente de la Sierra Nevada del Cocuy o Chita (Departamento de Boyacá). Bogotá, Colombia: Fundación de Investigaciones Arqueológicas Nacionales, Banco de La República. 203 p.
- Reichel-Dolmatoff, G.** (1946). Informe sobre las investigaciones preliminares de la Comisión Etnológica al Catatumbo. *Bol. Arqueol.* **2**: 381-394.
- Rodríguez, J.V.** (2020). Momias y cabezas rituales. La fascinación por la muerte. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia (presentación en línea).
- Rodríguez, J.V.** (2006). Las enfermedades en las condiciones de vida prehispánica en Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 300 p.
- Salamanca, M.F.** (2001). Tiguasú, el caso de un asentamiento Herrera-Muisca temprano en el valle de Leiva. En: K.H. Langebaek (Ed), Arqueología regional en el valle de Leiva: procesos de ocupación humana en una región de los Andes orientales de Colombia (60-68). Bogotá, Colombia: Informes Arqueológicos del Instituto Colombiano de Antropología No. 2. 91 p.
- Schottelius, J. W.** (1946). Arqueología de la Mesa de Los Santos. *Bol. Arqueol.* **2**: 213-225 (+ 5 láminas)
- Silva Celis, E.** (1945). Contribución al conocimiento de la civilización de los lache. *Bol. Arqueol.* **1**: 369-402 (+ 5 láminas)
- Sotomayor-Tribín, H., Correal Urrego, G.** (2003). Las calaveras enmascaradas de las momias yuko-yukpa (motilonos). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **27**: 5-14.
- Sotomayor H., Martínez, A.F., Valverde, A.M., Bello, S.E., Azuero, C.** (2010). Momias prehispánicas de Colombia: un estudio. Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria de Ciencias de la Salud. 466 p.
- Sutherland, D.** (1972). Preliminary investigations into the prehistory of Santander, Colombia. Tulane, Estados Unidos: Tesis de postgrado.
- Vallejos, Miriam A.** (1982). El hombre preagrícola de las Cuevas Tres Ventanas de Chilca Perú: Textilería. *Zonas Áridas.* **II**: 21-32.
- Vogel, J.C., Lerman, J. C.** (1969). Groningen Radiocarbon Dates VIII. *Radiocarbon* **11**: 351-390.
- Wallace, A.R.** (1853). A Narrative of Travels on the Amazon and Rio Negro with an Account of the Native Tribes, and Observations on the Climate, Geology, and Natural History of the Amazon Valley. Londres, Inglaterra: Reeve and Co. 541 p.
- Wann, S., Lombardi, G., Ojeda, B., Benfer, R.A., Rivera, R., Finch, C. E., Thomas, G. S., Thompson, R. C.** (2015). The Tres Ventanas Mummies of Peru. *The Anatomical Record.* **298**: 1026-1035.
- Zesch, S., Alterauge, A., Cárdenas-Arroyo, F., Rosendahl, W.** (2020). A Remarkable Face: Two Overmodeled Skulls from Colombia (en prensa en Alemania).

Artículo original

Soluciones exactas de agujeros negros en la teoría generalizada de Proca

Exact black hole solutions in the generalized Proca theory

✉ Sergio Manuel Cubides Pérez¹, ✉ Yeinzon Rodríguez García^{1,2,3}

¹Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander

²Centro de Investigaciones en Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Antonio Nariño

³Simons Associate at The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics

Resumen

Con el fin de restringir la teoría generalizada de Proca y de determinar su compatibilidad con las futuras observaciones en el ámbito astrofísico, se estudiaron soluciones de agujeros negros en el marco de esta teoría. Para ello, en primer lugar, se determinaron las ecuaciones de campo gravitacional y de campo vectorial correspondientes a la acción generalizada de Proca para, posteriormente, obtener sus versiones adaptadas a agujeros negros estáticos y esféricamente simétricos. Posteriormente se encontraron soluciones de las ecuaciones de campo para diferentes tipos de acoplamientos dentro de esta teoría las cuales, debido a las condiciones establecidas para las funciones métricas, difieren de las soluciones de Reissner-Nordström y de Schwarzschild tan sólo en las funciones que describen al campo vectorial dependiendo del acoplamiento estudiado. A juzgar únicamente por este resultado, la teoría de la Relatividad General luce más atractiva que la teoría generalizada de Proca.

Palabras clave: Agujeros negros, gravedad modificada, teorías vector-tensor.

Abstract

In order to constrain the generalized Proca theory and determine its compatibility with the future astrophysical observations, we have studied black holes solutions in the framework of this theory. To this end, in the first place, we have obtained the gravitational field and vector field equations from the generalized Proca action to subsequently obtain its adapted versions to static and spherically symmetric black holes. Later, exact solutions were found for different couplings in this theory. Due to established conditions for the metric functions, these solutions differ from the Schwarzschild and Reissner-Nordström solutions only in the functions that describe the vector field, depending on the studied coupling. Judging only from this result, General Relativity looks more attractive than the generalized Proca theory.

Keywords: Black holes, modified gravity, vector-tensor theories.

Introducción

Pese a que el modelo estándar cosmológico Λ CDM es compatible con las observaciones (Aghanim, N., *et al.*, 2020), éste no logra darle una explicación física consistente a los problemas de la cosmología moderna como lo son la actual expansión acelerada del universo (energía oscura) (Riess, A. G., *et al.*, 1998; Perlmutter, S., *et al.*, 1999) y la existencia de materia oscura (Bertone, G. & Hooper, D., 2018). Debido a esto y en un intento por explicar físicamente el problema del sector oscuro, se han construido gran cantidad de teorías que modifican la gravedad. Una de las ramas más importantes de estas teorías es aquella que comprende todos los modelos en los cuales se asume la presencia de un campo acoplado de forma no mínima con la gravedad que puede ser escalar (Deffayet, C., *et al.*, 2011; Nicolis, A., *et al.*, 2009; Deffayet, C., *et al.*, 2009a, 2009b; Horndeski, H. W., 1974; Deffayet, C., & Steer, D., 2013; Gleyzes, J. *et al.*, 2015; Crisostomi, M., *et al.*, 2017; Ben Achour, J., *et al.*, 2016; Crisostomi, M., *et al.*, 2016; Langlois, D., & Noui, K., 2016), vectorial (Heisenberg, L., 2014; Tasinato, G., 2014a, 2014b; Allys, E., *et al.*, 2016a, 2016c; Beltrán Jiménez,

Citación: Cubides Pérez SM, Rodríguez García Y. Soluciones exactas de agujeros negros en la teoría generalizada de Proca. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):30-51, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1276>

Editor: María Elena Gómez

***Correspondencia:**

Sergio Manuel Cubides Pérez;
sergioma11@hotmail.com

Recibido: 27 de julio de 2020

Aceptado: 9 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

J., & Heisenberg, L., 2016; Rodríguez, Y., & Navarro, A., 2017; Heisenberg, L., et al, 2016; Gallego Cadavid, A., & Rodríguez, Y., 2019; Kimura, R., et al, 2017; Allys, E., et al, 2016b; Beltrán Jiménez, J., & Heisenberg, L., 2017) o tensorial (**de Rham, C., et al, 2011; Hinterbichler, K., 2012; de Rham, C., 2014; Hassan, S. F., & Rosen, R. A., 2012; Hinterbichler, K., & Rosen, R. A., 2012; de Rham, C. & Gabadadze, G., 2010**). Este gran número de teorías existentes ofrece una amplia variedad en cosmología, brindándonos herramientas para poner a prueba y descartar aquellas teorías que no sean compatibles con las observaciones.

Un candidato natural para atacar el problema del sector oscuro es un campo escalar acoplado de forma no mínima a la gravedad (**Deffayet, C., et al, 2011; Nicolis, A., et al, 2009; Deffayet, C., et al, 2009a, 2009b; Horndeski, H. W., 1974; Deffayet, C., & Steer, D., 2013; Gleyzes, J. et al, 2015; Crisostomi, M., et al, 2017; Ben Achour, J., et al, 2016; Crisostomi, M., et al, 2016; Langlois, D., & Noui, K., 2016**); sin embargo, las teorías basadas en esta idea (teorías escalar-tensor) han sufrido fuertes restricciones a raíz de la observación de la onda gravitacional GW170817 y su contraparte electromagnética GRB 170817A (**Abbott, B. P., et al, 2017b, 2017a, 2017c; Baker, T., et al, 2017; Creminelli, P. & Vernizzi, F., 2017; Sakstein, J. & Jain, B., 2017; Ezquiaga, J. M. & Zumalacárregui, M., 2017; Wang, H., et al, 2017; Kase, R. & Tsujikawa, S., 2019**). Otra alternativa (teorías vector-tensor) surge de acoplar de forma no mínima un campo vectorial a la gravedad, lo que es motivado, en particular, por la existencia de campos de gauge en el Modelo Estándar de la física de partículas como campos mediadores de las interacciones fundamentales. Un aspecto que parece ser negativo concerniente al uso de campos vectoriales es el hecho de que éstos generan anisotropía en la expansión del universo, lo cual no los erige como candidatos naturales para dar cuenta del fenómeno de la energía oscura; no obstante, esta característica podría, naturalmente, explicar aquellas anomalías relacionadas con una posible dirección privilegiada en dicha expansión (**Cai, R. G., et al, 2013; Rodrigues, D. C., 2008; Beltrán Jiménez, J. & López Maroto, A., 2007; Campanelli, L., et al, 2006**). Un caso particular de estas teorías vector-tensor es el de la teoría generalizada de Proca (o teoría de Galileones vectoriales) (**Heisenberg, L., 2014; Tasinato, G., 2014a, 2014b; Allys, E., et al, 2016a, 2016c; Beltrán Jiménez, J., & Heisenberg, L., 2016; Rodríguez, Y., & Navarro, A., 2017**) en la cual la acción se construye a partir del campo vectorial y su primera derivada de tal manera que tanto las ecuaciones de campo de la teoría completa como las de la respectiva teoría en el límite de desacoplamiento contienen derivadas de orden no mayor a dos. Lo anterior impide el desarrollo de la conocida inestabilidad de Ostrogradski (**Ostrogradski, M., 1850; Woodard, R. P., 2007; Woodard, R. P., 2015**).

Así cómo sucedió con las teorías escalar-tensor, es necesario hacer uso de las observaciones de los fenómenos astrofísicos para determinar la factibilidad de las teorías vector-tensor. Una de las alternativas empleadas últimamente para este fin ha sido el estudio de las soluciones de agujeros negros, en vista de las recientes observaciones de ondas gravitacionales (**Abbott, B. P., et al, 2017b, 2017a, 2017c; Abbott, R., et al, 2020**). Esto se debe a que estas últimas transportan información acerca de los objetos que las producen, lo que permite conocer más sobre la física de los agujeros negros y los alrededores de los mismos así como comparar las características de estas ondas con aquellas predichas por las diferentes teorías de gravedad para estos objetos astrofísicos. Dicho enfoque ya ha sido recientemente explorado en las teorías escalar-tensor mediante el análisis perturbativo de las soluciones de agujeros negros (**Kobayashi, T., et al, 2012, 2014; Ganguly, A., et al, 2018**) y el cálculo de los modos quasinormales de las ondas gravitacionales provenientes de este tipo de objetos (**Tattersall, O. J. & Ferreira, P. G., 2018; Dong, R., et al, 2017**). También se ha explorado la estabilidad de las respectivas soluciones en las teorías vector-tensor, en especial en la teoría generalizada de Proca (**Kase, R., et al, 2018; Heisenberg, L., et al, 2018**).

En este trabajo se han encontrado, como primera aproximación y con base en el artículo de la Ref. (**Heisenberg, L., et al, 2017**), soluciones exactas de agujeros negros estáticos y esféricamente simétricos en la teoría generalizada de Proca. Esto se llevó a cabo, en primer lugar, determinando las ecuaciones de campo gravitacional y de campo vectorial de la teoría. Posteriormente se determinó el perfil de la métrica y del campo vectorial acoplado a la

gravidad para cada acoplamiento presente en la acción generalizada de Proca. Finalmente se establecieron las condiciones necesarias para obtener soluciones exactas para cada tipo de acoplamiento.

Teoría generalizada de Proca

Considérese, en primer lugar, un espaciotiempo plano. Es sabido que cualquier vector, debido al teorema de Helmholtz, puede expresarse como la suma de una parte sin divergencia y una sin rotacional de la siguiente manera:

$$A_\mu = \mathcal{A}_\mu + \partial_\mu \pi, \quad (1)$$

con \mathcal{A}_μ siendo la parte sin divergencia y π , siendo un campo escalar que se identifica con el grado de libertad longitudinal asociado a A_μ . Entonces, si se desea que las ecuaciones de campo, tanto para A_μ como para su componente longitudinal π no sean de orden superior a dos, con el fin de evitar la inestabilidad de Ostrogradski (Ostrogradski, M., 1850; Woodard, R. P., 2007; Woodard, R. P., 2015), la acción del campo vectorial puede incluir, únicamente, al campo mismo y a sus primeras derivadas espaciotemporales $\partial_\mu A_\nu$ (Rodríguez, Y., & Navarro, A., 2017).

Para construir la acción de la teoría generalizada de Proca (o acción de Galileones vectoriales) (Rodríguez, Y., & Navarro, A., 2017; Heisenberg, L., 2014; Beltrán Jiménez, J., & Heisenberg, L., 2016; Allys, E., *et al*, 2016a, 2016c; Tasinato, G., 2014a, 2014b) se deben identificar, en primer lugar, todos los posibles invariantes de Lorentz construidos a partir de la contracción de campos vectoriales y derivadas espaciotemporales de primer orden con los invariantes primitivos del grupo de Lorentz $SO(3, 1)$: el tensor métrico y el tensor de Levi-Civita. Una vez se han identificado estos términos, se agrupan en una combinación lineal general. A continuación, se establecen relaciones entre los coeficientes de la combinación lineal de tal manera que no se propaguen más de tres grados de libertad, en consonancia con la estructura del grupo de Poincaré, lo cual se establece mediante la ligadura primaria proveniente de la condición Hessiana $\mathcal{H}^{0\nu} = 0$ (Heisenberg, L., 2014; Errasti, V., *et al*, 2020a, 2020b), en donde

$$\mathcal{H}^{\mu\nu} \equiv \frac{\partial^2 \mathcal{L}}{\partial(\partial_0 A_\mu) \partial(\partial_0 A_\nu)}. \quad (2)$$

Como último paso, se realiza el reemplazo $A_\mu \rightarrow \partial_\mu \pi$ y se remueven los términos cuya acción resultante no corresponda a la de un Galileón escalar (o acción de Horndeski (Deffayet, C., & Steer, D., 2013; Nicolis, A., *et al*, 2009; Horndeski, H. W., 1974; Deffayet, C., *et al*, 2009a, 2009b)).

De todo lo anterior resulta que la acción para el Galileón vectorial que generaliza la acción Abeliada de Proca es

$$S = \int \left[-\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m^2 A^2 + \sum_{N=2}^6 \mathcal{L}_{N,A}^{Gal} \right] d^4x, \quad (3)$$

en donde (Beltrán Jiménez, J., & Heisenberg, L., 2016; Allys, E., *et al*, 2016c)

$$\mathcal{L}_{2,A}^{Gal} = f_2(A_\mu, F_{\mu\nu}, \tilde{F}_{\mu\nu}), \quad (4)$$

$$\mathcal{L}_{3,A}^{Gal} = f_3(A^2) S_\mu^\mu, \quad (5)$$

$$\mathcal{L}_{4,A}^{Gal} = f_4(A^2) [(S_\mu^\mu)^2 - S_\rho^\sigma S_\sigma^\rho], \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{5,A}^{Gal} = f_5(A^2) [(S_\mu^\mu)^3 - 3S_\mu^\mu S_\rho^\sigma S_\sigma^\rho + 2S_\rho^\sigma S_\sigma^\gamma S_\gamma^\rho] \\ + g_5(A^2) \tilde{F}^{\alpha\mu} \tilde{F}_\mu^\beta S_{\alpha\beta}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathcal{L}_{6,A}^{Gal} = g_6(A^2) \tilde{F}^{\alpha\beta} \tilde{F}^{\mu\nu} S_{\alpha\mu} S_{\beta\nu}, \quad (8)$$

siendo $F_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$, $\tilde{F}_{\mu\nu} \equiv \frac{1}{2} \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} F^{\rho\sigma}$, y $S_{\mu\nu} \equiv \partial_\mu A_\nu + \partial_\nu A_\mu$, en donde $\varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma}$ es el tensor de Levi-Civita.

La versión para espacio tiempo curvo se obtiene promoviendo las derivadas parciales a derivadas covariantes y añadiendo los contratérminos requeridos para evitar la aparición de derivadas de orden mayor a dos en las ecuaciones de campo asociadas al modo longitudinal (Deffayet, C., *et al*, 2009a). De esta forma se obtiene (Heisenberg, L., 2014; Tasinato, G., 2014a, 2014b; Allys, E., *et al*, 2016a, 2016c; Beltrán Jiménez, J., & Heisenberg, L., 2016; Rodríguez, Y., & Navarro, A., 2017)

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(F + \sum_{i=2}^6 \mathcal{L}_i \right), \tag{9}$$

en donde g es el determinante de la métrica, $F \equiv -F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}/4$, y

$$\mathcal{L}_2 = G_2(X, F_{\mu\nu}, \tilde{F}_{\mu\nu}), \tag{10}$$

$$\mathcal{L}_3 = G_3(X) \nabla_\mu A^\mu, \tag{11}$$

$$\mathcal{L}_4 = G_4(X)R + G_{4,X}(X) \left[(\nabla_\mu A^\mu)^2 - \nabla_\mu A_\nu \nabla^\nu A^\mu \right], \tag{12}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_5 = & G_5(X)G_{\mu\nu}\nabla^\mu A^\nu - \frac{1}{6}G_{5,X}(X) \left[(\nabla_\mu A^\nu)^3 \right. \\ & \left. - 3\nabla_\mu A^\mu \nabla_\rho A_\sigma \nabla^\sigma A^\rho + 2\nabla_\rho A_\sigma \nabla^\nu A^\rho \nabla^\sigma A_\nu \right] \\ & + g_5(X) \tilde{F}^{\alpha\mu} \tilde{F}^\beta_\mu \nabla_\alpha A_\beta, \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_6 = & G_6(X)L^{\mu\nu\alpha\beta} \nabla_\mu A_\nu \nabla_\alpha A_\beta \\ & + \frac{1}{2}G_{6,X}(X) \tilde{F}^{\alpha\beta} \tilde{F}^{\mu\nu} \nabla_\alpha A_\mu \nabla_\beta A_\nu, \end{aligned} \tag{14}$$

siendo $X \equiv -A_\mu A^\mu/2$, R el escalar de Ricci, $G_{\mu\nu}$ el tensor de Einstein, $G_{i,X} \equiv \partial G_i/\partial X$, y $L_{\mu\nu\rho\sigma}$ es el tensor doble dual de Riemann

$$L^{\mu\nu\alpha\beta} \equiv \frac{1}{4} \varepsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} R_{\rho\sigma\gamma\delta}. \tag{15}$$

Soluciones exactas de agujeros negros estáticos y esféricamente simétricos

Se emplearán a continuación las ecuaciones de campo gravitacional y vectorial de la teoría generalizada de Proca presentadas en el apéndice. Se empleará, además, el siguiente ansatz para la métrica y el campo vectorial de la teoría en coordenadas (pseudo)esféricas:

$$\begin{aligned} \mathbf{g} = & -f(r) dt \otimes dt + h^{-1}(r) dr \otimes dr + r^2 d\theta \otimes d\theta \\ & + r^2 \sin^2 \theta d\phi \otimes d\phi, \end{aligned} \tag{16}$$

$$\mathbf{A} = A_0(r) dt + A_1(r) dr. \tag{17}$$

Estos perfiles para los campos son compatibles con un espaciotiempo estático y esféricamente simétrico.

Solución de Reissner-Nordström en Relatividad General

Como preparación, en primer lugar, se usará el acomplamiento

$$G_4 = \frac{m_p^2}{2}, \quad G_2 = G_3 = G_5 = g_5 = G_6 = 0, \tag{18}$$

en donde m_p es la masa reducida de Planck, el cual conduce a las siguientes ecuaciones de campo vectorial y gravitacional, respectivamente,

$$0 = \nabla_\beta F^{\alpha\beta}, \tag{19}$$

$$\frac{m_p^2}{2} G_{\mu\nu} = \frac{1}{2} \left(F_{\mu\alpha} F_\nu^\alpha - \frac{1}{4} g_{\mu\nu} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} \right), \tag{20}$$

en donde la única componente diferente de cero para el tensor de esfuerzos, para el perfil estático esféricamente simétrico, es la siguiente:

$$F_{01} = \partial_0 A_1 - \partial_1 A_0 = -A'_0 = -F_{10}. \tag{21}$$

En la expresión anterior y en las subsiguientes, una prima significa una derivada con respecto a r .

Así, las ecuaciones de campo no triviales obtenidas son

$$-\frac{h}{fr}A'_0 + \frac{hfA'_0}{4f^2} - \frac{h'A'_0}{4f} - \frac{hA''_0}{2f} = 0, \tag{22}$$

$$\frac{m_p^2}{2r^2}f - \frac{m_p^2fh}{2r^2} - \frac{1}{4}hA_0'^2 - \frac{m_p^2fh'}{2r} = 0, \tag{23}$$

$$\frac{m_p^2}{2r^2} - \frac{m_p^2}{2hr^2} + \frac{A_0'^2}{4f} + \frac{m_p^2f'}{2fr} = 0, \tag{24}$$

$$\begin{aligned} &\frac{m_p^2rh'}{4} - \frac{hr^2A_0'^2}{4f} + \frac{m_p^2hfr'}{4f} - \frac{m_p^2hf'r^2}{8f^2} \\ &- \frac{m_p^2f'h'r^2}{8f} + \frac{m_p^2hf''r^2}{4f} = 0. \end{aligned} \tag{25}$$

Si se multiplica la ecuación (23) por $(hf)^{-1}$ y se suma a la ecuación (24) se obtiene como resultado

$$f = const * h, \tag{26}$$

y, al considerarse un comportamiento asintóticamente plano es claro que $f(r) = h(r) = 1$ cuando $r \rightarrow \infty$, por lo tanto $const. = 1$ y

$$f = h. \tag{27}$$

Posteriormente, al reemplazar (27) en la expresión (22) se llega a la ecuación diferencial

$$\frac{A'_0}{r} + \frac{A''_0}{2} = 0, \tag{28}$$

la cual tiene como solución

$$A_0 = P + \frac{Q}{r}, \tag{29}$$

en donde P y Q son constantes de integración. Luego, sustituyendo las ecuaciones (27) y (29) en la ecuación (23) se obtiene que la función métrica f es

$$f = 1 - \frac{2M}{r} - \frac{Q^2}{2m_p^2r^2}, \tag{30}$$

en donde Q es la carga asociada al campo vectorial y $-2M$ es la constante de integración que, una vez se lleva al límite Newtoniano, se identifica como la masa del agujero negro. La solución obtenida es, por lo tanto, la de Reissner-Nordström:

$$f = h = 1 - \frac{2M}{r} - \frac{Q^2}{2m_p^2r^2}, \tag{31}$$

$$A_0 = P + \frac{Q}{r}. \tag{32}$$

Estas soluciones satisfacen también la ecuación (25) ya que usando la condición (27), y posteriormente las soluciones (31) y (32), se obtiene la ecuación

$$rA_0'^2 - 2m_p^2(2f'r + f'') = 0, \tag{33}$$

la cual se satisface idénticamente.

Sumado a todo lo anterior, cabe resaltar que la componente longitudinal A_1 corresponde a un modo de gauge no físico ya que este valor está indeterminado por las ecuaciones (22)-(25). Asimismo, la constante P es una constante arbitraria sin significado físico alguno.

Campo masivo de Proca

También cabe revisar el campo masivo de Proca en Relatividad General, el cual está dado por las funciones

$$G_4 = \frac{m_p^2}{2}, \quad G_2 = \mu^2 X, \quad G_3 = G_5 = g_5 = G_6 = 0, \quad (34)$$

en donde μ es la masa del campo vectorial.

Las ecuaciones de campo gravitacional y vectorial para esta configuración están dadas por

$$\mu^2 A^\alpha = \nabla_\beta F^{\alpha\beta}, \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_p^2}{2} G_{\mu\nu} = & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4} g_{\mu\nu} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} - F_{\mu\alpha} F_\nu{}^\alpha \right) + \frac{1}{2} \mu^2 A_\mu A_\nu \\ & + \frac{1}{2} \mu^2 X g_{\mu\nu}, \end{aligned} \quad (36)$$

las cuales llevan al siguiente sistema de ecuaciones diferenciales para los perfiles de la métrica y el campo vectorial que se están teniendo en consideración:

$$\frac{\mu^2}{f} A_0 - \frac{h}{rf} A'_0 - \frac{h}{2f} A''_0 - \frac{h'}{4f} A'_0 + \frac{hf'}{4f^2} A'_0 = 0, \quad (37)$$

$$-\mu^2 A_1 h = 0, \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_p^2 f}{2r^2} - \frac{m_p^2 fh}{2r^2} - \frac{m_p^2 fh'}{2r} - \frac{1}{4} h A_0'^2 - \frac{1}{4} \mu^2 A_0^2 \\ - \frac{1}{4} \mu^2 fh A_1^2 = 0, \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} - \frac{m_p^2 f}{2r^2} + \frac{m_p^2}{fh} + \frac{m_p^2 hf'}{2r} + \frac{1}{4} h A_0'^2 - \frac{1}{4} \mu^2 A_0^2 \\ - \frac{1}{2} \mu fh A_1^2 = 0, \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \frac{m_p^2 hf'r}{4f} - \frac{m_p^2 hf'^2 r^2}{8f^2} + \frac{1}{4} m_p^2 h'r + \frac{m_p^2 f'h'r^2}{8f} \\ - \frac{hr^2}{4f} A_0'^2 + \frac{m_p^2 hf''r^2}{4f} - \frac{\mu^2 r^2}{4f} A_0^2 + \frac{1}{4} \mu^2 hr^2 A_1^2 = 0, \end{aligned} \quad (41)$$

$$-\frac{1}{2} \mu^2 A_0 A_1 = 0. \quad (42)$$

A partir de la ecuación (38), y observando que $\mu \neq 0$, se tiene que $A_1 = 0$, lo que implica que la ecuación (42) se satisface idénticamente. Reemplazando $A_1 = 0$ en las ecuaciones (39) y (40) y sumándolas se llega a la expresión

$$m_p^2 (f'h - fh') = \mu^2 A_0^2 r, \quad (43)$$

que al multiplicar por h^{-2} se convierte en

$$m_p^2 \frac{(f'h - fh')}{h^2} = \frac{\mu^2 A_0^2 r}{h^2}, \quad (44)$$

i.e.,

$$\left(\frac{f}{h} \right)' = \frac{\mu^2 A_0^2 r}{m_p^2 h^2}. \quad (45)$$

Considerando el comportamiento asintótico del lado izquierdo de esta expresión se sabe que, con el fin de que r_h sea el horizonte de eventos, $f \rightarrow 0$ y $h \rightarrow 0$ cuando $r \rightarrow r_h$. Es necesario también que $f(r) > 0$ y $h(r) > 0$ para $r > r_h$ con el objetivo de que la métrica sea Lorentziana. Debido a esto, las funciones métricas se pueden expandir alrededor del horizonte de la forma

$$f = \sum_{i=1} f_i (r - r_h)^i, \quad h = \sum_{i=1} h_i (r - r_h)^i, \quad (46)$$

por lo tanto, si $r \rightarrow r_h$, el lado izquierdo de la ecuación (45) tiende a un valor finito en tal límite. Asimismo, al analizar el comportamiento del lado derecho, se requiere que A_0 tienda a cero con el fin de que la expresión sea consistente. De otra parte, considerando el comportamiento asintótico para $r \rightarrow \infty$, se sabe que en este límite $f = h = 1$. De esta manera, el límite de la expresión (44) conduce a

$$\lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{f'h - fh'}{h^2} \right) = \lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{\mu^2 A_0^2(r)r}{m_p^2 h^2} \right),$$

i.e.,

$$0 = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\mu^2 A_0^2(r)r}{m_p^2}, \quad (47)$$

y siendo $\mu \neq 0$ se concluye que $A_0 \rightarrow 0$ cuando $r \rightarrow \infty$.

Ahora bien, para determinar el comportamiento predicho por la ecuación (37) para valores de $r \gg r_h$, se reescribe esta ecuación empleando la expresión (45):

$$-h \left(\frac{A_0''}{2} + \frac{A_0'}{r} \right) + \frac{\mu^2 A_0^2 A_0'}{4m_p^2 f} + \mu^2 A_0 = 0. \quad (48)$$

Ya que A_0 se hace muy pequeño para $r \gg r_h$, se descartan los términos cuadráticos de éste obteniéndose así la ecuación diferencial

$$-\frac{A_0''}{2} - \frac{A_0'}{r} + \mu^2 A_0 = 0, \quad (49)$$

cuya solución es

$$A_0(r) = c_1 \frac{e^{-\sqrt{2}\mu r}}{r} + c_2 \frac{e^{\sqrt{2}\mu r}}{r}, \quad (50)$$

siendo c_1 y c_2 constantes de integración. De otra parte, teniendo en cuenta que la ecuación (47) predice que $A_0(r \rightarrow \infty) = 0$, la ecuación (49) conduce a

$$A_0 \propto \frac{e^{\mu r}}{r}. \quad (51)$$

Este comportamiento comienza a ser dominante cuando $r > \frac{1}{\mu}$. Además, debido a que se debe tener que $A_0 \rightarrow 0$ cuando $r \rightarrow \infty$, se concluye que $\mu = 0$. Por lo tanto no hay solución de agujero negro estático y esféricamente simétrico para un campo vectorial de Proca debido a que dicha solución existe solamente si $\mu = 0$, reduciéndose así a la solución de Reissner-Nordström.

Soluciones exactas para el acoplamiento cuártico G_4

Para este caso se considera el acoplamiento

$$G_4 = \frac{m_p^2}{2} + \frac{X}{4}, \quad (52)$$

el cual reduce las ecuaciones de campo a las expresiones

$$\begin{aligned} \frac{m_p^2}{2} G_{\mu\nu} = & \frac{1}{2} \left[F_{\mu\alpha} F_{\nu}{}^{\alpha} - \frac{F^2}{4} g_{\mu\nu} \right] - \frac{1}{4} \left[\frac{1}{2} g_{\mu\nu} (\nabla_{\alpha} A^{\alpha})^2 \right. \\ & - 2A_{(\mu} \nabla_{\nu)} \nabla_{\alpha} A^{\alpha} - 2\nabla_{\alpha} A_{(\mu} \nabla_{\nu)} A^{\alpha} \\ & + \frac{1}{2} g_{\mu\nu} \nabla_{\alpha} A_{\beta} \nabla^{\beta} A^{\alpha} + \nabla_{\alpha} (A_{(\mu} \nabla^{\alpha} A_{\nu)}) \\ & + A_{(\mu} \nabla_{\nu)} A^{\alpha} - A^{\alpha} \nabla_{(\mu} A_{\nu)} + g_{\mu\nu} A_{\beta} \nabla^{\beta} \nabla^{\alpha} A_{\alpha} \\ & \left. - \frac{1}{2} (A_{\mu} A_{\nu} R - A^2 G_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} \square A^2 + \nabla_{\mu} \nabla_{\nu} A^2) \right], \end{aligned} \quad (53)$$

$$\nabla_{\beta} F^{\beta\alpha} = -\frac{1}{2} G^{\beta\alpha} A_{\beta}, \quad (54)$$

en donde la simetrización se define como $M_{(\alpha\beta)} \equiv \frac{1}{2} (M_{\alpha\beta} + M_{\beta\alpha})$.

La forma explícita de estas ecuaciones, para la configuración del campo y métrica que se está estudiando, es la siguiente:

$$0 = -2A_0 f(-1 + h + rh') + r [A_0'(hrf' - f(4h + rh')) - 2hrA_0''], \quad (55)$$

$$0 = A_1 h(f(h - 1) + hrf'), \quad (56)$$

$$\begin{aligned} 0 = & -2hr^2 A_0'^2 + A_0^2(-1 + h + rh') \\ & - f [A_1 h^2 (A_1 + 4rA_1') + 4m_p^2 (rh' - 1) \\ & + h(4m_p^2 + A_1^2(1 + 3rh'))], \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} 0 = & 4A_0 A_0' fhr + A_0^2 [f(h - 1) - hrf'] \\ & + f [f(-4m_p^2 + (4m_p^2 - A_1^2)h + 3A_1^2 h^2) \\ & + hr(2rA_0'^2 + (4m_p^2 + 3A_1^2 h)f')], \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} 0 = & 4A_0 f [-2hf'rA_0' + f(rA_0'h' + 2h(A_0' + rA_0''))] \\ & + A_0^2 [3hf'^2 r + 2f^2 h' - f(rf'h' + 2h(f' + rf''))] \\ & + f [4A_1 f h^2 A_1' (2f + rf') + 4m_p^2 (-hrf'^2 + 2f^2 h' \\ & + f(rf'h' + 2h(f' + rf'')))] + A_1^2 h [-hrf'^2 + 6f^2 h' \\ & + f(2rf'h' + 2h(f' + rf''))], \end{aligned} \quad (59)$$

$$0 = A_0 A_1 [f(h - 1) + hrf']. \quad (60)$$

En primer lugar, la ecuación (60) admite una solución en donde $A_0 = 0$ o $A_1 = 0$. Por lo tanto, considerando $A_0 = 0$ y $A_1 \neq 0$, la ecuación (56) establece la siguiente relación entre las funciones métricas:

$$h = \frac{f}{f + f'r}. \quad (61)$$

Entonces, al reemplazar esta relación en la ecuación (58) se obtiene:

$$0 = A_1^2 f^2, \quad (62)$$

lo que inevitablemente lleva a la inconsistencia $A_1 = 0$. En segundo lugar, si se considera $A_0 \neq 0$ y $A_1 = 0$, el sistema de ecuaciones diferenciales tiene solución únicamente si $A_0 = 0$, lo que resulta, de nuevo, en una inconsistencia. La conclusión es que tanto A_0 como A_1 son iguales a cero y, por lo tanto, la solución es de tipo Schwarzschild.

Ahora bien, si se considera la rama en la cual A_0 y A_1 son diferentes de cero, de la ecuación (60) se obtiene la relación (61). Reemplazando esta relación y su derivada en la ecuación (58) se obtiene

$$A_1 = \pm \frac{\sqrt{r^2(A_0 A_0' f - frA_0'^2 + A_0^2 f')}}{f}. \quad (63)$$

Al reemplazar esta expresión en las ecuaciones (55) y (57) y resolver el sistema, se obtiene la solución dada por

$$A_0 = P + \frac{Q}{r}, \tag{64}$$

$$f = C - \frac{2M}{r}, \tag{65}$$

en donde P , $2M$ y Q son constantes de integración. De otra parte, dado que en el límite $r \rightarrow \infty$ se debe tener espaciotiempo plano, se deduce que $C = 1$. Insertando estas expresiones en (61) y (63) se obtiene la solución

$$h = f = 1 - \frac{2M}{r}, \tag{66}$$

$$A_0 = P + \frac{Q}{r}, \tag{67}$$

$$A_1 = \frac{\sqrt{2P(MP + Q)r + Q^2}}{r - 2M}. \tag{68}$$

Por consiguiente, las soluciones para el presente acoplamiento cumplen las siguientes condiciones:

$$f = h, \tag{69}$$

$$X = -\frac{A_\mu A^\mu}{2} = X_c, \tag{70}$$

con X_c constante, las cuales serán usadas de aquí en adelante con el fin de encontrar soluciones exactas. Esta última condición se traduce en que

$$A_1 = \pm \frac{\sqrt{A_0^2 - 2fX_c}}{f}. \tag{71}$$

En contraste, para un acoplamiento general $G_4 = G_4(X)$, las ecuaciones de campo vectorial están dadas por

$$A_0 \{G_{4,XX} A_1^2 h^2 f' r + f [G_{4,X} + h(-G_{4,X} + G_{4,XX} A_1 h(A_1 + 2rA_1')) + (-G_{4,X} + G_{4,XX} A_1^2 h) r h']\} + \frac{r}{8} [A_0'^2 (h f' r - f(4h + r h')) - 2f h r A_0''] = 0, \tag{72}$$

$$A_1 \left\{ \left[f(G_{4,X} - G_{4,X} h + G_{4,XX} A_1^2 h^2) + 2G_{4,XX} A_0 \frac{h}{f} A_0' r \right] - \frac{h}{f} [G_{4,XX} A_0^2 + f(G_{4,X} - G_{4,XX} A_1^2 h)] r f' \right\} = 0. \tag{73}$$

Para que la última expresión se satisfaga existen dos posibilidades, $A_1 = 0$ y $A_1 \neq 0$, que serán estudiadas a continuación.

$A_1 \neq 0$

Al proponer que la segunda derivada del acoplamiento G_4 evaluada en X_c cumpla la condición

$$G_{4,XX}(X_c) = 0, \tag{74}$$

se observa que la ecuación (73) establece la siguiente relación entre las funciones métricas h y f :

$$h = \frac{f}{f + f'r}, \tag{75}$$

de la cual, haciendo uso de la condición (69), se obtiene que la función métrica f viene dada por

$$f = 1 - \frac{2M}{r}. \tag{76}$$

Dicha solución lleva a que la ecuación (72) se reduzca a la expresión

$$2A_0' + rA_0'' = 0, \tag{77}$$

cuya solución ya fue obtenida previamente. Esta solución es

$$A_0 = P + \frac{Q}{r}, \tag{78}$$

la cual, a causa de la condición (70), lleva a que la componente longitudinal del campo tenga la forma

$$A_1 = \pm \frac{\sqrt{-2X_c \left(1 - \frac{2M}{r}\right) + \left(P + \frac{Q}{r}\right)^2} r}{r - 2M}. \tag{79}$$

Así, insertando las expresiones de f , h , A_0 y A_1 en la ecuación de campo gravitacional de componente $(\mu, \nu) = (0, 0)$,

$$\begin{aligned} 0 = & hr^2 A_0'^2 - 4G_{4,X}(-1 + h + rh') \\ & + 4f \left[G_{4,X} A_1 h^2 (A_1 + 2rA_1') + G_4(rh' - 1) \right. \\ & \left. + h(G_4 + 2G_{4,X} A_1^2 r h') \right], \end{aligned} \tag{80}$$

se obtiene

$$G_{4,X}(X_c) = \frac{1}{4}. \tag{81}$$

De manera análoga, realizando el mismo procedimiento anterior en la ecuación de componente $(\mu, \nu) = (1, 1)$,

$$\begin{aligned} 0 = & 4f^2 \left[-G_4 + (G_4 - G_{4,X} A_1^2)h + 2G_{4,X} A_1^2 h^2 \right] \\ & - 4G_{4,X} A_0^2 h f' r + f h r \left[8G_{4,X} A_0 A_0' \right. \\ & \left. + r A_0'^2 + 4(G_4 + 2G_{4,X} A_1^2 h) f' \right], \end{aligned} \tag{82}$$

y reemplazando (81) en la misma, se logra determinar el valor de X_c en términos de las constantes de integración. Este valor es

$$X_c = \frac{P^2}{2}. \tag{83}$$

Esto último indica que la función que describe a la componente longitudinal del campo está dada por

$$A_1 = \frac{\sqrt{Q^2 + 2P(MP + Q)}r}{r - 2M}. \tag{84}$$

De lo anterior se infiere que la función $G_4(X)$, que obedece a las condiciones (74) y (81), está dada por

$$G_4(X) = G_4(X_c) + \frac{1}{4}(X - X_c) + \sum_{n=3} b_n (X - X_c), \tag{85}$$

en donde $X_c = P^2/2$ y todas las b_n son constantes. El modelo $G_4(X) = m_p^2/2 + X/4$ es el caso especial de la última expresión (85), es decir, $G_4(X_c) = m_p^2/2 + X_c/4$ y todos los $b_n = 0$ para $n \geq 3$. La solución de arriba es una solución de Schwarzschild con componente vectorial longitudinal diferente de cero.

Aunque la carga P en un espaciotiempo de Reisner-Nordström no tiene significado físico, en este caso es una carga que controla el perfil longitudinal $A_1(r)$, mas no su geometría. Nótese que se puede apagar la carga Q y dejar la carga P encendida en presencia de un agujero negro masivo, caracterizando así un perfil longitudinal no trivial. En este sentido, P representa una carga adicional para la configuración, además de la masa y la carga eléctrica. Sin embargo, esta carga no es observable aplicando la ley de Gauss -ya que el campo no contribuye a $F_{\mu\nu}$ - y por lo tanto, estrictamente hablando, esta configuración no viola la conjetura de no pelo (Carter, B., 1971; Robinson, D. C., 1975).

$$A_1 = 0$$

Si se impone $A_1 = 0$ y la condición (70), se tiene que $A_0^2 = 2fX_c$ a partir de (71). Bajo la condición (69), la ecuación (73) se anula y la ecuación (72) se reduce a

$$8G_{4,X}(X_c)(f - f^2 - frf') + \left(\frac{1}{2}r^2 f'^2 - fr^2 f'' - 2ff'r\right) = 0. \tag{86}$$

Si se toma $1 - f - rf' = 0$, su solución

$$f = 1 - \frac{2M}{r}, \tag{87}$$

no satisfaría la ecuación (86). Entonces, se debe considerar

$$\frac{1}{2}r^2 f'^2 - f''fr^2 - 2rf f' = 0, \tag{88}$$

con $G_{4,X}(X_c) = 0$. Escribiendo a la función métrica f como

$$f(r) = e^{\lambda(r)}, \tag{89}$$

la ecuación (88) se transforma en una nueva ecuación diferencial para la función $\lambda(r)$, la cual es

$$4\lambda' + r\lambda'^2 + 2r\lambda'' = 0. \tag{90}$$

Esta expresión se puede reescribir como

$$r^2\lambda'^2 + 2(\lambda'r^2)' = 0, \tag{91}$$

cuya solución, $\forall M < r$, es

$$\lambda = \ln \left(\frac{C_2 - Cr}{r} \right)^2, \tag{92}$$

en donde C_2 y C son constantes. En consecuencia, la función f queda representada por la siguiente expresión:

$$f = \left(C - \frac{M}{r} \right)^2, \tag{93}$$

en donde $M = C_2$. Además, se deduce que $C = 1$ ya que la función métrica debe tender a 1 cuando $r \rightarrow \infty$. Así,

$$f = \left(1 - \frac{M}{r} \right)^2. \tag{94}$$

Con todo lo anterior, al usar la ecuación de campo gravitacional de componente $(\mu, \nu) = (0, 0)$, se tiene que

$$G_4(X_c) = \frac{X_c}{2}. \tag{95}$$

Este resultado implica, adicionalmente, que las ecuaciones de campo resultantes se satisfagan idénticamente. Así, se tiene que un acoplamiento $G_4(X)$ que cumpla todo lo anterior debe ser de la forma

$$G_4(X) = \frac{X_c}{2} + \sum_{n=2} b_n (X - X_c)^n. \tag{96}$$

La solución exacta resultante es, por lo tanto,

$$\begin{aligned} f &= h = \left(1 - \frac{M}{r}\right)^2, \\ A_0 &= P - \frac{MP}{r}, \\ A_1 &= 0, \end{aligned} \tag{97}$$

en donde $P = \pm\sqrt{2X_c}$. Esto corresponde a una solución de agujero de Reissner-Nordström con una carga eléctrica igual a la masa del agujero negro.

Soluciones exactas de agujeros negros para acoplamientos generales

Se procede ahora con la deducción de soluciones exactas de agujeros negros en la presencia de los acoplamientos $G_3(X)$, $G_5(X)$, $G_6(X)$, $g_5(X)$ y $G_2(X, F) = -2g_4(X)F$. Este último corresponde al modo vectorial intrínseco que fue originalmente introducido en \mathcal{L}_4 en la forma $g_4(X)(\nabla_\rho A_\sigma \nabla^\rho A^\sigma - \nabla_\rho A_\sigma \nabla^\sigma A^\rho)$, en donde $g_4(X) = \text{const} * G_{4,X}$. Para este análisis se toma en cuenta el término de Einstein-Hilbert, es decir, $G_4(X) = m_p^2/2$. De manera similar a lo realizado en las secciones anteriores, se imponen las condiciones (69) y (70) en el desarrollo siguiente.

Acoplamiento cúbico $G_3(X)$

Para este caso, la ecuación de campo vectorial de componente $\alpha = 1$ es

$$G_{3,X} (A_0 r (2f A_0' - A_0 f') + A_1^2 f^2 (4f + r f')) = 0, \tag{98}$$

la cual da paso a dos posibilidades: $G_{3,X}(X_c) = 0$ y $G_{3,X}(X_c) \neq 0$.

(i) $G_{3,X}(X_c) = 0$

Para este caso, las ecuaciones para el campo vectorial A_0 y las de campo gravitacional de componentes $(\mu, \nu) = (0, 0)$ y $(\mu, \nu) = (2, 2)$ son, respectivamente,

$$0 = \frac{A_0'}{r} + \frac{A_0''}{2}, \tag{99}$$

$$0 = -2m_p^2 + r^2 A_0'^2 + 2m_p^2 (f + r f'), \tag{100}$$

$$0 = -r^2 A_0'^2 + m_p^2 (2r f' + r^2 f''), \tag{101}$$

ya que la ecuación de componente $(\mu, \nu) = (1, 1)$ es igual a la de componente $(\mu, \nu) = (0, 0)$, siendo las demás triviales.

A partir de la solución a la ecuación (99), la cual fue obtenida en secciones anteriores, se concluye que la componente en dirección temporal del campo está dada por

$$A_0 = P + \frac{Q}{r}, \tag{102}$$

en donde P y Q son constantes de integración. Adicionalmente, si inserta este resultado en la ecuación (100), se obtiene la expresión

$$0 = -2m_p^2 + \frac{Q^2}{r^2} + 2m_p^2 (f + r f'), \tag{103}$$

cuya solución para f viene dada por

$$f = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{2m_p^2 r^2}. \tag{104}$$

Por lo tanto, para este caso se tiene una solución de Reissner-Nordström con la componente longitudinal del campo diferente de cero gracias a la condición (70):

$$\begin{aligned} A_1 &= \pm \frac{2m_p^2 r}{2m_p^2 (r^2 - 2Mr) + Q^2} [m_p^2 (P^2 - 2X_c) r^2 \\ &\quad + 2m_p^2 (PQ + 2MX_c) r + Q^2 (m_p^2 - X_c)]^{1/2}. \end{aligned} \tag{105}$$

Por consiguiente, una función que lleve a esta solución debe estar dada por

$$G_3(X) = G_3(X_c) + \sum_{n=2} b_n (X - X_c)^n, \quad (106)$$

en donde los b_n son constantes.

(ii) $G_{3,X}(X_c) \neq 0$

Combinando las expresiones (69), (70) y (98) se obtiene

$$f' = \frac{rA_0A_0' + 2A_0^2 - 4fX_c}{X_cr}. \quad (107)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación de campo vectorial para $\alpha = 0$ se obtiene $rA_0'' + 2A_0' = 0$, lo cual lleva a la solución $A_0 = P + Q/r$ con dos constantes P y Q . Entonces, insertando esta solución en la ecuación (107) se obtiene

$$\begin{aligned} f' &= -\frac{4f}{r} + \frac{Q^2}{X_cr^3} + \frac{2PQ}{X_cr^2} + \frac{2P^2}{X_cr}, \\ 4fr^3 + r^4f' &= \frac{Q^2r}{X_c} + \frac{2PQr^2}{X_c} + \frac{2P^2r^3}{X_c}, \\ (r^4f)' &= \frac{Q^2r}{X_c} + \frac{2PQr^2}{X_c} + \frac{2P^2r^3}{X_c}, \\ r^4f &= \frac{Q^2r^2}{2X_c} + \frac{2PQr^2}{3X_c} + \frac{P^2r^4}{2X_c} + C, \\ f &= \frac{1}{X_c} \left(P + \frac{Q}{r} \right)^2 + \frac{C}{r^4}, \end{aligned} \quad (108)$$

en donde C es una constante. Para satisfacer que la métrica sea asintóticamente plana, f debe tender a 1 cuando $r \rightarrow \infty$, lo que conduce a que $P^2 = 2X_c$. Así las ecuaciones de campo gravitacional se satisfacen únicamente si $C = 0$ y $P = \sqrt{2}m_p$. Además, de la ecuación de componente $(\mu, \nu) = (0, 1)$ se tiene que $A_1 = 0$. Entonces, para $M = \pm Q/(\sqrt{2}m_p)$ se obtiene la solución (94) con el modo A_1 igual a cero.

Acoplamiento de quinto orden $G_5(X)$

Para este acoplamiento, las ecuaciones de campo vectorial de componentes $\alpha = 0$ y $\alpha = 1$ vienen dadas por

$$\begin{aligned} 0 &= A_0r + \frac{1}{2}A_0''r^2 + G_{5,XX}A_0A_1^2(fA_1' + A_1f') \\ &\quad + \frac{1}{f}G_{5,X}A_0(-(-1+f)fA_1' + A_1(1-2f)f'), \end{aligned} \quad (109)$$

$$\begin{aligned} 0 &= G_{5,X} \left(A_0^2(f-1)\frac{f'}{f^2} - 2A_0(f-1)\frac{A_0'}{f} + A_1^2(1-3f)f' \right) \\ &\quad + G_{5,XX}A_1^2(2A_0A_0'f + (A_1^2f^2 - A_0^2)f'). \end{aligned} \quad (110)$$

Aplicando la condición (70) en ambas ecuaciones, multiplicando la ecuación (109) por $2A_1f$ y restándola de la ecuación (110) multiplicada por A_0 , se obtiene la ecuación diferencial

$$0 = 2A_0' + rA_0''. \quad (111)$$

Adicionalmente, la ecuación (110), bajo la condición (70), adopta la forma

$$\begin{aligned} 0 &= -G_{5,X}(X_c) [A_0A_0'(f-1) - f'(X_c + A_0^2 - 3X_cf)] \\ &\quad + G_{5,XX}(X_c)(A_0^2 - 2X_cf)(A_0A_0' - X_cf'). \end{aligned} \quad (112)$$

De la ecuación (111) se obtiene, por supuesto, que $A_0 = P + Q/r$, con P y Q constantes. Si

la ecuación (112) se satisface para (i) $A_0 A'_0 = X_c f'$ o (ii) $A_0^2 = 2f X_c$.

Para la primera rama se tiene la expresión

$$f' = \frac{A_0 A'_0}{X_c} = -\frac{(Pr + Q)Q}{X_c r^3}, \quad (114)$$

cuya integración da como resultado

$$f = h = C - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{2X_c r^2}, \quad (115)$$

con $M = -PQ/(2X_c)$. En el límite asintótico cuando $r \rightarrow \infty$, se debe tener que $f = h = 1$, lo cual indica que $C = 1$. De otra parte, se tiene que las ecuaciones de campo gravitacional de componentes $(\mu, \nu) = (0, 0)$, $(\mu, \nu) = (1, 1)$ y $(\mu, \nu) = (2, 2)$ son, respectivamente,

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{1}{2fr^2} \{-m_p^2(-1 + rf' + f) - r^2 A_0'^2\} \\ & + \frac{1}{4r^2} G_{5,XX} a_1^2 \{2f [A_0 A_1 A'_0 + (A_0^2 - A_1^2 f^2) A'_1] \\ & + A_1 (A_0^2 - A_1^2 f^2) f'\}, \end{aligned} \quad (116)$$

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{f}{2r} \{m_p^2(-1 + rf' + f) + r^2 A_0'^2\} \\ & + \frac{1}{4r^2} G_{5,XX} A_1^3 f^2 [2A_0 A'_0 f + (-A_0^2 + A_1^2 f^2) f'], \end{aligned} \quad (117)$$

$$0 = -2r A_0'^2 + m_p^2 (2f' + r f''). \quad (118)$$

Insertando la solución para A_0 y para f en la ecuación de componente $(\mu, \nu) = (2, 2)$ se obtiene que

$$X_c = m_p^2. \quad (119)$$

Lo anterior lleva a que se satisfagan idénticamente las ecuaciones de componentes $(\mu, \nu) = (0, 0)$ y $(\mu, \nu) = (1, 1)$. Por lo tanto las soluciones para este tipo de acoplamiento están dadas por

$$f = h = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{2m_p^2 r^2}, \quad (120)$$

$$A_0 = -\frac{2M m_p^2}{Q} + \frac{Q}{r}, \quad (121)$$

lo cual, usando la condición (70), conlleva a

$$A_1 = \pm \frac{2m_p^2 \sqrt{2(2M^2 m_p^2 - Q)} r^2}{Q [2m_p^2 r (2M - r) - Q^2]}. \quad (122)$$

La existencia de esta solución requiere que $2M^2 m_p^2 > Q^2$.

A partir de la ecuación (70), la segunda rama corresponde a $A_1 = 0$. El reemplazar esta condición en la ecuación (109) conduce a

$$-r^2 f'^2 + 2f(2rf' + r^2 f'') = 0, \quad (123)$$

la cual es la misma ecuación diferencial (88) cuya solución es

$$f = h = \left(1 - \frac{M}{r}\right)^2. \quad (124)$$

Por otra parte, de la ecuación (118) se tiene que

$$X_c = m_p^2, \quad (125)$$

lo que indica que la expresión para la componente temporal del campo vectorial, A_0 , está dada por

$$A_0 = \sqrt{2} \left(-m_p + \frac{Mm_p}{r} \right), \tag{126}$$

con la relación particular $Q^2 = 2M^2m_p^2$. De hecho esto puede ser visto como el caso de las soluciones de la rama anterior con la componente radial del campo siendo nula.

Es de anotar que un modo concreto de obtener las soluciones ya presentadas es mediante un acoplamiento $G_5(X)$ que esté descrito por la siguiente expresión:

$$G_5(X) = G_5(X_c) + \sum_{n=2} b_n(X - X_c)^2, \tag{127}$$

en donde $X_c = m_p^2$.

Acoplamiento de sexto orden $G_6(X)$

En presencia del acoplamiento general G_6 , la ecuación de campo vectorial de componente $\alpha = 1$ se reduce a

$$A_1 A_0'^2 [G_{6,X} (3f - 1) - G_{6,XX} A_1^2 f^2] = 0, \tag{128}$$

para la cual se requiere que $A_1 = 0$ o $A_0' = 0$.

(i) $A_0' = 0$

En este caso se tiene que

$$A_0 = P = const., \tag{129}$$

lo que implica que la componente $\alpha = 0$ de la ecuación de campo vectorial y la componente $(\mu, \nu) = (0, 1)$ de la ecuación de campo gravitacional se satisfagan idénticamente. De esta manera, las ecuaciones de campo gravitacional de componentes $(\mu, \nu) = (0, 0)$ y $(\mu, \nu) = (1, 1)$ llevan a la ecuación diferencial

$$-1 + f + r f' = 0, \tag{130}$$

cuya solución, obtenida previamente, es

$$f = h = 1 - \frac{2M}{r}, \tag{131}$$

la cual también hace que la ecuación de campo gravitacional de componente $(\mu, \nu) = (2, 2)$ se satisfaga idénticamente. Por lo tanto, usando la condición (70), se obtiene que el modo longitudinal del campo vectorial viene dado por

$$A_1 = \pm \frac{\sqrt{r(P^2 r + 4M X_c - 2r X_c)}}{r - 2M}. \tag{132}$$

Ya que $A_1 \rightarrow \pm \sqrt{P^2 - 2X_c}$ cuando $r \rightarrow \infty$, se requiere que $P^2 > 2X_c$ para garantizar la existencia de la solución.

0.0.1 (ii) $A_1 = 0$

Para este caso, en primer lugar, la ecuación de campo gravitacional de componente $(\mu, \nu) = (0, 1)$ se satisface idénticamente. Además, debido a la condición (70), $A_0^2 = 2f X_c$. Esto lleva a que las ecuaciones de campo gravitacional de componentes $(\mu, \nu) = (0, 0)$ y $(\mu, \nu) = (1, 1)$ se reduzcan, respectivamente, a

$$\frac{m_p^2}{2} f(r f'' + 2f') - \frac{X_c}{4} r f'^2 - X_c f f' f'' G_6 = 0, \tag{133}$$

$$\begin{aligned} & \left(r f'' + 2f' \right) - \frac{r f'^2}{2r f} - \frac{1}{r} \left[2f f'' + (f'^2 - 2f'') + \frac{f'^2}{f} \right] G_6 \\ & + 2X_c (f - 1) f'^2 G_{6,X} = 0. \end{aligned} \tag{134}$$

Para obtener soluciones exactas se tomarán las condiciones

$$G_6(X_c) = 0, \quad y \quad G_{6,X}(X_c) = 0. \tag{135}$$

De la ecuación (134) se obtiene la solución de Reissner-Nordström cuya carga es igual a la masa del agujero negro, es decir,

$$f = h = \left(1 - \frac{M}{r}\right)^2, \tag{136}$$

que al reemplazar en la ecuación (133) da como resultado que $X_c = m_p^2$. Además, la componente temporal del campo vectorial es $A_0 = P + Q/r$, en donde $P = \pm\sqrt{2}m_p$ y $Q = \sqrt{2}Mm_p$. Esto es equivalente a la solución obtenida para el acoplamiento de quinto orden $G_5(X)$ de la rama $A_0^2 = 2fX_c$.

Un modelo concreto que lleve a la solución obtenida para este caso debe ser de la forma

$$G_6(X) = \sum_{n=2} b_n(X - X_c), \tag{137}$$

en donde $X_c = m_p^2$.

Acoplamiento cuártico $g_4(X)$

Considérese el acoplamiento dado por

$$G_2(X, F) = -2g_4(X)F, \tag{138}$$

en donde $g_4(X)$ es una función de X . De esta manera, la ecuación de campo vectorial de componente $\alpha = 1$, usando las condiciones (69) y (70), es

$$g_{4,X}A_1A_0'^2 = 0. \tag{139}$$

Considérese ahora, por lo tanto, el caso en el cual se satisface la relación

$$g_{4,X}(X_c) = 0. \tag{140}$$

En estas circunstancias, la ecuación de campo vectorial de componente $\alpha = 0$ y la ecuación de campo gravitacional de componente $(\mu, \nu) = (0, 0)$ son, respectivamente,

$$rA_0'' + 2A_0' = 0, \tag{141}$$

$$2m_p^2(1 - f - rf') + (1 - 2g_4)r^2A_0'^2 = 0. \tag{142}$$

A partir de la primera ecuación, la componente temporal del campo vectorial es

$$A_0 = P + \frac{Q}{r}, \tag{143}$$

la cual, al reemplazar en la segunda ecuación, lleva a

$$f = h = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{Q^2}{2m_p^2r^2} [1 - 2g_4(X_c)], \tag{144}$$

con el modo longitudinal del campo dado por la expresión (71). Esto equivale a un solución de Reissner-Nordström con carga efectiva $Q_{eff} = Q\sqrt{1 - 2g_4(X_c)}$ que es diferente de Q a menos que $g_4(X_c) = 0$.

Así, un acoplamiento que lleve a estas soluciones viene dado por

$$g_4(X) = g_4(X_c) + \sum_{n=2} b_n(X - X_c). \tag{145}$$

Para el caso particular $g_4(X_c) = 1/2$ se obtiene la solución de Schwarzschild $f = h = 1 - 2M/r$ con A_0 indeterminado.

Por otra parte, la ecuación (139) también se satisface si (i) $A_1 = 0$ o (ii) $A'_0 = 0$. Para la rama (i), la ecuación de campo vectorial de componente $\alpha = 0$ y la ecuación de campo gravitacional de componente $(\mu, \nu) = (0, 0)$ vienen dadas, respectivamente, por

$$2A_0(f + g_{4,X}A_0A'_0r) + fA''_0r = 0, \tag{146}$$

$$2g_{4,X}A_0^2A_0'^2r^2 - f [2m_p^2(rf' + f - 1) + (1 - 2g_4)A_0'^2r^2] = 0. \tag{147}$$

Existe una solución exacta bajo las condiciones $g_{4,X}(X_c) = 0$ y $g_4(X_c) = 1/2$ la cual está dada por

$$f = h = 1 - \frac{2M}{r}, \quad A_0 = \pm \sqrt{2 \left(1 - \frac{2M}{r} X_c\right)},$$

$$A_1 = 0. \tag{148}$$

Esta solución existe para la función (145) con $g_4(X_c) = 1/2$.

Para la rama (ii), se obtiene la solución de Schwarzschild $f = h = 1 - 2M/r$ con $A_0 = const.$ y A_1 dado por la ecuación (71) para acoplamiento general $g_4(X)$.

Acoplamiento vectorial de quinto orden $g_5(X)$

Finalmente, se busca la solución exacta para el acoplamiento de quinto orden $g_5(X)$. Para este acoplamiento, la ecuación de campo vectorial de componente $\alpha = 0$ viene dada por

$$A_0'^2(g_5 - g_{5,X}(A_0^2 - 2fX_c)) = 0. \tag{149}$$

Para la rama $A'_0 = 0$, se obtiene la solución de Schwarzschild $f = h = 1 - 2M/r$ seguida del modo longitudinal del campo dado por la ecuación (71), con $A_0 = const.$, para acoplamiento $g_5(X)$ generales.

Para la otra rama, $f g_5 = (A_0^2 - 2fX_c)g_{5,X}$, existe solución exacta bajo la condición

$$g_{5,X} = 0. \tag{150}$$

Esto lleva a que la ecuación de campo vectorial de componente $\alpha = 0$ y la ecuación de campo gravitacional de componente $(\mu, \nu) = (0, 0)$ sean las de la solución de Reissner-Nördstrom en Relatividad General. De esta manera se obtiene la solución de Reissner-Nordström con A_1 dado por la ecuación (71).

Ya que $g_5(X_c) = 0$, un acoplamiento de quinto orden de la forma

$$g_5(X) = \sum_{n=2} b_n(X - X_c)^n, \tag{151}$$

da como resultado, en este caso, la solución de Reissner-Nordström con el modo longitudinal diferente de cero.

Conclusiones

En este trabajo se hizo uso de la acción (9) y a partir del método variacional se obtuvieron las ecuaciones de campo gravitacionales y vectoriales de la teoría generalizada de Proca. Posteriormente, se determinaron los perfiles del campo y del tensor métrico propios de un espaciotiempo estático y con simetría esférica. Con ello se establecieron condiciones para las funciones métricas y las funciones componentes del campo vectorial con el fin de obtener soluciones exactas. También se calculó la forma que deben tener los acoplamiento para llegar a dichas soluciones.

En primer lugar, al usar el acoplamiento $G_4 = m_p^2/2$, se recuperó la Relatividad General para un espaciotiempo de electrovacío. En éste se obtuvo la solución de Reissner-Nördstrom. Por otra parte, se corroboró la no existencia de soluciones en el caso de Proca masivo. La no

existencia se da como consecuencia de que la solución para el campo vectorial es incompatible con el comportamiento asintótico que deben tener las funciones métricas, tanto en el horizonte de eventos ($f(r_h) = h(r_h) = 0$) como en el infinito ($f(r \rightarrow \infty) = h(r \rightarrow \infty) = 1$). La incompatibilidad desaparece cuando la masa del campo μ es nula, lo cual corresponde a un espaciotiempo de Reissner-Nordström.

Seguidamente se encontró la solución para el acoplamiento $G_4 = m_p^2/2 + X/4$. Para esta solución se satisfacen las condiciones $f = h$ y $X = X_c = const.$, las cuales se usaron para encontrar soluciones exactas correspondientes a cada tipo de acoplamiento usado. En general, las soluciones obtenidas para todos los acoplamientos considerados en este documento no difieren de soluciones de Schwarzschild y Reissner-Nordström salvo en las funciones componentes del campo vectorial. Esto, en efecto, es consecuencia de las restricciones usadas con el objetivo de encontrar soluciones exactas. Entonces, el aliviar las condiciones puede conducir a soluciones más generales mediante métodos iterativos. Adicionalmente, en varias de las soluciones encontradas en este trabajo, el modo longitudinal del campo vectorial resultó ser diferente de cero con lo cual aparece una nueva carga P que no rompe la conjetura de no pelo dado que en las funciones métricas no se evidencia la presencia de esta carga. Sumado a esto, la carga P aparece como un modo de gauge no físico en la componente temporal del campo. Por otra parte, aunque se obtienen diversas expresiones para la componente longitudinal del campo vectorial, en los demás acoplamientos estudiados en este documento, las funciones métricas siguen siendo soluciones de Schwarzschild o Reissner-Nordström.

Es claro que al usar una teoría y obtener resultados que ya son predichos por una teoría más simple, se tiene mayor preferencia por esta última. En este caso, al usar la teoría generalizada de Proca, que es de mayor complejidad que la Relatividad General, se obtiene soluciones exactas que ya son predichas por esta última. Por consiguiente, en el marco de las soluciones exactas de agujeros negros estáticos y esféricamente simétricos, la teoría de Einstein luce más atractiva que la teoría generalizada de Proca.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por los siguientes proyectos de investigación: Patrimonio Autónomo - Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación Francisco José de Caldas (MINCIENCIAS - COLOMBIA) programa No. 110685269447 RC-80740-465-2020, proyecto 69553, Vicerrectoría de Ciencia, Tecnología, e Innovación - Universidad Antonio Nariño proyecto No. 2017239, Dirección de Investigación y Extensión de la Facultad de Ciencias - Universidad Industrial de Santander proyecto No. 2460, y Centro de Investigaciones - Universidad Santo Tomás de Aquino proyecto No. 1952392.

Contribución de los autores

SMC llevó a cabo todos los desarrollos presentados en este artículo bajo la continua supervisión y revisión de YR.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo.

References

- Abbott, B. P., *et al.* (2017a). Gravitational waves and gamma-rays from a binary neutron star merger: GW170817 and GRB 170817A. *Astrophys. J.*, **848**, L13.
- Abbott, B. P., *et al.* (2017b). GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 161101.
- Abbott, B. P., *et al.* (2017c). Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *Astrophys. J.*, **848**, L12.
- Abbott, R., *et al.* (2020). GW190412: Observation of a binary-black-hole coalescence with asymmetric masses. *Phys. Rev. D*, **102**, 043015.
- Aghanim, N., *et al.* (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys.*, **641**, A6.
- Allys, E., *et al.* (2016a). Generalized Proca action for an Abelian vector field. *JCAP*, **1602**, 004.

- Allys, E., et al.** (2016b). Generalized SU(2) Proca Theory. *Phys. Rev. D*, **94**, 084041.
- Allys, E., et al.** (2016c). On the 4D generalized Proca action for an Abelian vector field. *JCAP*, **1609**, 026.
- Baker, T., et al.** (2017). Strong constraints on cosmological gravity from GW170817 and GRB 170817A. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 251301.
- Beltrán Jiménez, J., & Heisenberg, L.** (2016). Derivative self-interactions for a massive vector field. *Phys. Lett B*, **757**, 405.
- Beltrán Jiménez, J. & López Maroto, A.** (2007). Cosmology with moving dark energy and the CMB quadrupole. *Phys. Rev. D*, **76**, 023003.
- Beltrán Jiménez, J., & Heisenberg, L.** (2017). Generalized multi-Proca fields. *Phys. Lett. B*, **770**, 16.
- Ben Achour, J., et al.** (2016). Degenerate higher order scalar-tensor theories beyond Horndeski and disformal transformations. *Phys. Rev. D*, **93**, 124005.
- Bertone, G. & Hooper, D.** (2018). History of dark matter. *Rev. Mod. Phys.*, **90**, 045002.
- Cai, R. G., et al.** (2013). Constraining the anisotropic expansion of the universe. *Phys. Rev. D*, **87**, 123522.
- Campanelli, L., et al.** (2006). Ellipsoidal universe can solve the cosmic microwave background quadrupole problem. *Phys. Rev. Lett.*, **97**, 131302.
- Carter, B.** (1971). Axisymmetric black hole has only two degrees of freedom. *Phys. Rev. Lett.*, **26**, 331.
- Creminelli, P. & Vernizzi, F.** (2017). Dark energy after GW170817 and GRB170817A. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 251302.
- Crisostomi, M., et al.** (2016). Extended scalar-tensor theories of gravity. *JCAP*, **1604**, 044.
- Crisostomi, M., et al.** (2017). Higher derivative field theories: degeneracy conditions and classes. *JHEP*, **1706**, 124.
- Deffayet, C., et al.** (2009a). Covariant Galileon. *Phys. Rev. D*, **79**, 084003.
- Deffayet, C., et al.** (2009b). Generalized Galileons: All scalar models whose curved background extensions maintain second-order field equations and stress tensors. *Phys. Rev. D*, **80**, 064015.
- Deffayet, C., et al.** (2011). From k-essence to generalized Galileons. *Phys. Rev. D*, **84**, 064039.
- Deffayet, C., & Steer, D.** (2013). A formal introduction to Horndeski and Galileon theories and their generalizations. *Class. Quantum Grav.*, **30**, 214006.
- de Rham, C.** (2014). Massive Gravity. *Living Rev. Relativ.*, **17**, 7.
- de Rham, C., et al.** (2011). Resummation of Massive Gravity. *Phys. Rev. Lett.*, **106**, 231101.
- de Rham, C. & Gabadadze, G.** (2010). Generalization of the Fierz-Pauli action. *Phys. Rev. D*, **82**, 044020.
- Dong, R., et al.** (2017). Quasinormal modes of black holes in scalar-tensor theories with nonminimal derivative couplings. *Phys. Rev. D*, **96**, 064048.
- Errasti, V., et al.** (2020a). Complete theory of Maxwell and Proca fields. *Phys. Rev. D*, **101**, 045008.
- Errasti, V., et al.** (2020b). Maxwell-Proca theory: Definition and construction. *Phys. Rev. D*, **101**, 045009.
- Ezquiaga, J. M. & Zumalacárregui, M.** (2017). Dark energy after GW170817: Dead ends and the road ahead. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 251304.
- Gallego Cadavid, A., & Rodríguez, Y.** (2019). A systematic procedure to build the beyond generalized Proca field theory. *Phys. Lett. B*, **798**, 134958.
- Ganguly, A., et al.** (2018). Black hole stability under odd-parity perturbations in Horndeski gravity. *Class. Quantum Grav.*, **35**, 145008.
- Gleyzes, J. et al.** (2015). New Class of Consistent Scalar-Tensor Theories. *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 211101.
- Hassan, S. F., & Rosen, R. A.** (2012). Bimetric gravity from ghost-free massive gravity. *JHEP*, **1202**, 126.
- Heisenberg, L.** (2014). Generalization of the Proca action. *JCAP*, **1405**, 015.
- Heisenberg, L., et al.** (2016). Beyond generalized Proca theories. *Phys. Lett. B*, **760**, 617.

- Heisenberg, L., et al.** (2017). Black holes in vector-tensor theories. *JCAP*, **1708**, 024.
- Heisenberg, L., et al.** (2018). Odd-parity stability of hairy black holes in U(1) gauge-invariant scalar-vector-tensor theories. *Phys. Rev. D*, **97**, 124043.
- Hinterbichler, K.** (2012). Theoretical aspects of massive gravity. *Rev. Mod. Phys.*, **84**, 671.
- Hinterbichler, K., & Rosen, R. A.** (2012). Interacting spin-2 fields. *JHEP*, **1207**, 047.
- Horndeski, H. W.,** (1974). Second-order-scalar-tensor field equations in a four-dimensional space. *Int. J. Theor. Phys.*, **10**, 363-384.
- Kase, R., et al.** (2018). Black hole perturbations in vector-tensor theories: the odd-mode analysis. *JCAP*, **1802**, 048.
- Kase, R. & Tsujikawa, S.** (2019). Dark energy in Horndeski theories after GW170817: A review. *Int. J. Mod. Phys. D*, **28**, 1942005.
- Kimura, R., et al.** (2017). Extended vector-tensor theories. *JCAP*, **1701**, 002.
- Kobayashi, T., et al.** (2012). Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations: The odd-parity sector. *Phys. Rev. D*, **85**, 084025.
- Kobayashi, T., et al.** (2014). Black hole perturbation in the most general scalar-tensor theory with second-order field equations. II. The even-parity sector. *Phys. Rev. D*, **89**, 084042.
- Langlois, D., & Noui, K.** (2016). Degenerate higher derivative theories beyond Horndeski: evading the ostrogradski instability. *JCAP*, **1602**, 034.
- Martin-Garcia, J.** (2019). *xact: Efficient tensor computer algebra for the wolfram language*. *Xact.es*.
- Nicolis, A., et al.** (2009). Galileon as a local modification of gravity. *Phys. Rev. D*, **79**, 064036.
- Ostrogradski, M.** (1850). Memoires sur les equations differentielles relatives au probleme des isoperimetres. *Mem. Ac. St. Petersburg VI*, **4**, 385.
- Perlmutter, S., et al.** (1999). Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae. *Astrophys. J*, **517**, 565.
- Riess, A. G., et al.** (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astronom. J*, **116**, 1009.
- Robinson, D. C.** (1975). Uniqueness of the Kerr black hole. *Phys. Rev. Lett.*, **34**, 905.
- Rodrigues, D. C.** (2008). Anisotropic cosmological constant and the CMB quadrupole anomaly. *Phys. Rev. D*, **77**, 023534.
- Rodríguez, Y., & Navarro, A.** (2017). Scalar and vector Galileons. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **831**, 012004.
- Sakstein, J. & Jain, B.** (2017). Implications of the neutron star merger GW170817 for cosmological scalar-tensor theories. *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 251303.
- Tasinato, G.** (2014a). Cosmic acceleration from Abelian symmetry breaking. *JHEP*, **1404**, 067.
- Tasinato, G.** (2014b). A small cosmological constant from Abelian symmetry breaking. *Class. Quantum Grav.*, **31**, 225004.
- Tattersall, O. J. & Ferreira, P. G.** (2018). Quasinormal modes of black holes in Horndeski gravity. *Phys. Rev. D*, **97**, 104047.
- Wang, H., et al.** (2017). The GW170817/GRB 170817A/AT 2017gfo Association: Some Implications for Physics and Astrophysics. *Astrophys. J.*, **851**, L18.
- Woodard, R. P.** (2007). Avoiding dark energy with $1/R$ modifications of gravity. *Lec. Notes Phys.*, **720**, 403.
- Woodard, R. P.** (2015). Ostrogradsky's theorem on Hamiltonian instability. *Scholarpedia*, **10**, 32243.

Apéndice: Ecuaciones de campo en la teoría generalizada de Proca

Como resultado de variar la acción (9) con respecto a la métrica, se obtuvieron las ecuaciones de campo gravitacional en la teoría generalizada de Proca, las cuales vienen dadas por:

$$\begin{aligned}
 0 = & -\frac{1}{2} (g_{\mu\nu}F + F_{\mu\alpha}F_{\nu}^{\alpha}) - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}G_2 - \frac{1}{2}G_{2,X}A_{\mu}A_{\nu} - \frac{1}{2}G_{2,F}F_{\mu\alpha}F_{\nu}^{\alpha} \\
 & + G_{2,Y}(2A^{\sigma}A_{(\mu}F_{\nu)}^{\alpha}F_{\sigma\alpha} - A^{\alpha}A^{\beta}F_{\beta\nu}F_{\mu\alpha}) + G_{3,X} \left[-\frac{1}{2}A_{\mu}A_{\nu}\nabla_{\alpha}A^{\alpha} \right. \\
 & \left. + A^{\alpha} \left(A_{(\mu}\nabla_{\nu)}A_{\alpha} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}A^{\beta}\nabla_{\alpha}A_{\beta} \right) \right] + G_4G_{\mu\nu} + G_{4,X} \left[\frac{1}{2}g_{\mu\nu}(\nabla_{\alpha}A^{\alpha})^2 \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}\nabla_{\alpha}A_{\beta}\nabla^{\beta}A^{\alpha} - 2A_{(\mu}\nabla_{\nu)}\nabla_{\alpha}A^{\alpha} + g_{\mu\nu}A_{\beta}\nabla^{\beta}\nabla^{\alpha}A_{\alpha} + \nabla_{\alpha}(A_{(\mu}\nabla^{\alpha}A_{\nu)}) \right. \\
 & \left. + A_{(\mu}\nabla_{\nu)}A^{\alpha} - A^{\alpha}\nabla_{(\mu}A_{\nu)} - 2\nabla_{\alpha}A_{(\mu}\nabla_{\nu)}A^{\alpha} - \frac{1}{2}(RA_{\mu}A_{\nu} + \nabla_{\mu}\nabla_{\nu}A^2 \right. \\
 & \left. - g_{\mu\nu}\square A^2) \right] + G_{4,XX} \left[\frac{1}{4}\nabla_{\mu}A^2\nabla_{\nu}A^2 - \frac{1}{4}g_{\mu\nu}\nabla^{\alpha}A^2\nabla_{\alpha}A^2 + A_{(\mu}\nabla_{\nu)}A^2\nabla_{\alpha}A^{\alpha} \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}A^{\beta}\nabla_{\beta}A^2\nabla_{\alpha}A^{\alpha} - \frac{1}{2}\nabla_{\alpha}A^2(A_{(\mu}\nabla^{\alpha}A_{\nu)} + A_{(\mu}\nabla_{\nu)}A^{\alpha} - A^{\alpha}\nabla_{(\mu}A_{\nu)}) \right] \\
 & + (\text{terminos correspondientes a } \mathcal{L}_5 \text{ y } \mathcal{L}_6). \tag{152}
 \end{aligned}$$

Debido a la gran extensión en la variación de los términos que conforman \mathcal{L}_5 y \mathcal{L}_6 , se optó por usar el paquete *xAct* del software *Mathematica* (Martín-García, J., 2019), con el fin de obtener los términos restantes de la expresión de arriba. Las ecuaciones propias para cada acoplamiento contenido en \mathcal{L}_5 y \mathcal{L}_6 fueron presentadas en la sección de soluciones exactas de agujeros negros estáticos y esféricamente simétricos.

De otra parte, las ecuaciones de campo vectorial, las cuales provienen de variar la acción de la teoría generalizada de Proca con respecto al campo vectorial, vienen dadas por

$$\begin{aligned}
 0 = & \nabla_{\beta}F^{\alpha\beta} - G_{2,X}A^{\alpha} + \nabla_{\beta}G_{2,F}F^{\beta\alpha} + G_{2,F}\nabla_{\beta}F^{\beta\alpha} - 4\nabla_{\beta}G_{2,Y}A^{\nu}A^{[\beta}F_{\nu}^{\alpha]} \\
 & - 2G_{2,Y} \left[A^{\mu}F_{\mu\lambda}F^{\alpha\lambda} + 2(\nabla_{\beta}A^{\nu})A^{[\beta}F_{\nu}^{\alpha]} - 2A^{\nu}\nabla_{\beta}A^{[\beta}F_{\nu}^{\alpha]} - 2A^{\nu}A^{[\beta}\nabla_{\beta}F_{\nu}^{\alpha]} \right] \\
 & + G_{3,X} \left(\frac{1}{2}\nabla^{\alpha}A^2 - A^{\alpha}\nabla_{\mu}A^{\mu} \right) + 2G_{4,X}G^{\beta\alpha}A_{\beta} - G_{4,XX} \left[A^{\alpha}(\nabla_{\mu}A^{\mu})^2 \right. \\
 & \left. - A^{\alpha}\nabla_{\mu}A_{\nu}\nabla^{\nu}A^{\mu} - \nabla_{\beta}A^2(g^{\alpha\beta}\nabla_{\mu}A^{\mu} - \nabla^{\alpha}A^{\beta}) \right] + G_{5,X} \left[\frac{1}{2}\nabla_{\beta}A^2G^{\beta\alpha} \right. \\
 & \left. - A^{\alpha}G_{\mu\nu}\nabla^{\mu}A^{\nu} + \frac{1}{2}\nabla_{\mu}A^{\mu}\nabla^{\alpha}\nabla_{\beta}A^{\beta} - \nabla_{\beta}(\nabla_{\mu}A^{\mu}\nabla^{\alpha}A^{\beta}) - \frac{1}{2}\nabla^{\alpha}(\nabla_{\rho}A_{\sigma}\nabla^{\sigma}A^{\rho}) \right] \\
 & + G_{5,XX} \left\{ \frac{1}{6}A^{\alpha} \left[(\nabla_{\mu}A^{\mu})^3 - 3\nabla_{\mu}A^{\mu}\nabla_{\rho}A_{\sigma}\nabla^{\sigma}A^{\rho} + 2\nabla_{\rho}A_{\sigma}\nabla^{\nu}A^{\rho}\nabla^{\sigma}A_{\nu} \right] \right. \\
 & \left. - \frac{1}{4} \left[\nabla^{\alpha}A^2(\nabla_{\mu}A^{\mu})^2 + \nabla^{\alpha}A^2\nabla_{\rho}A_{\sigma}\nabla^{\sigma}A^{\rho} + 2\nabla_{\beta}A^2\nabla_{\mu}A^{\mu}\nabla^{\alpha}A^{\beta} \right. \right. \\
 & \left. \left. - 2\nabla_{\beta}A^2\nabla^{\nu}A^{\beta}\nabla^{\alpha}A_{\nu} + 4A^2\nabla_{\beta}(\nabla^{\nu}A^{\beta}\nabla^{\alpha}A_{\nu}) \right] \right\} + g_5 \left[\nabla_{\beta}\tilde{F}^{\beta\mu}\tilde{F}^{\alpha}_{\mu} + \tilde{F}^{\beta\mu}\nabla_{\beta}\tilde{F}^{\alpha}_{\mu} \right. \\
 & \left. - 2\nabla_{\beta}\tilde{F}^{\sigma}_{\mu}\varepsilon^{\lambda\mu\alpha\beta}\nabla_{(\lambda}A_{\sigma)} - 2\tilde{F}^{\sigma}_{\mu}\varepsilon^{\lambda\mu\alpha\beta}\nabla_{\beta}\nabla_{(\lambda}A_{\sigma)} \right] \\
 & + g_{5,X} \left[A^{\alpha}\tilde{F}^{\gamma\mu}\tilde{F}^{\beta}_{\mu}\nabla_{\gamma}A_{\beta} + A_{\beta}\tilde{F}^{\sigma}_{\mu}\varepsilon^{\lambda\mu\alpha\beta}\nabla_{(\lambda}A_{\sigma)} - \frac{1}{2}\nabla_{\beta}A^2\tilde{F}^{\beta\mu}\tilde{F}^{\alpha}_{\mu} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -2G_6 [\nabla_\beta L^{\beta\alpha\gamma\sigma} \nabla_\gamma A_\sigma + L^{\beta\alpha\gamma\sigma} \nabla_\beta \nabla_\gamma A_\sigma] + G_{6,X} [\nabla_\beta A^2 L^{\beta\alpha\gamma\sigma} \nabla_\gamma A_\sigma \\
 & - \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} \nabla_\beta \tilde{F}^{\mu\nu} \nabla_\gamma A_\mu \nabla_\sigma A_\nu - \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} \tilde{F}^{\mu\nu} (\nabla_\beta \nabla_\gamma A_\mu) \nabla_\sigma A_\nu \\
 & - \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} \tilde{F}^{\mu\nu} \nabla_\gamma A_\mu \nabla_\beta \nabla_\sigma A_\nu - A^\alpha L^{\mu\nu\gamma\beta} \nabla_\mu A_\nu \nabla_\gamma A_\beta - \nabla_\beta \tilde{F}^{\mu\nu} \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} \nabla_\mu A_\gamma \nabla_\nu A_\sigma \\
 & - \tilde{F}^{\mu\nu} \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} (\nabla_\beta \nabla_\mu A_\gamma) \nabla_\nu A_\sigma - \tilde{F}^{\mu\nu} \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} \nabla_\mu A_\gamma \nabla_\beta \nabla_\nu A_\sigma - \nabla_\beta \tilde{F}^{\gamma\beta} \tilde{F}^{\mu\alpha} \nabla_\gamma A_\mu \\
 & - \tilde{F}^{\gamma\beta} \nabla_\beta F^{\mu\alpha} \nabla_\gamma A_\mu - \tilde{F}^{\gamma\beta} \tilde{F}^{\mu\alpha} \nabla_\beta \nabla_\gamma A_\mu] + \frac{G_{6,XX}}{2} [\nabla_\beta A^2 \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} \tilde{F}^{\mu\nu} \nabla_\gamma A_\mu \nabla_\sigma A_\nu \\
 & - A^\alpha \tilde{F}^{\gamma\beta} \tilde{F}^{\mu\nu} \nabla_\gamma A_\mu \nabla_\beta A_\nu + \nabla_\beta A^2 \tilde{F}^{\mu\nu} \varepsilon^{\gamma\sigma\beta\alpha} \nabla_\mu A_\gamma \nabla_\nu A_\sigma + \nabla_\beta A^2 \tilde{F}^{\gamma\beta} \tilde{F}^{\mu\alpha} \nabla_\gamma A_\mu].
 \end{aligned}
 \tag{153}$$

Artículo original

Propagación de Ondas de Alfvén Torsionales en una Atmósfera Solar Estratificada

Torsional Alfvén Waves Propagation in a Stratified Solar Atmosphere

Paula C. Wandurraga, Anamaria Navarro, Fabio D. Lora-Clavijo*

Grupo de Investigación en Relatividad y Gravitación, Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Resumen

Existen observaciones que indican que el campo magnético en la atmósfera solar tiene *twist*, esto cumple un papel muy importante en diferentes fenómenos solares como la reconexión magnética, las fulguraciones solares, entre otros. Sin embargo, su influencia en este tipo de fenómenos aún no es clara. Con esa motivación, en este artículo se estudia, mediante varias simulaciones numéricas 3D, el efecto del *twist* del campo magnético en la propagación de ondas torsionales de Alfvén y magnetoacústicas a lo largo de la fotosfera y la cromosfera baja de un Sol con poca actividad. Con la finalidad de simular la dinámica de estas ondas magnetohidrodinámicas (MHD), se solucionaron numéricamente las ecuaciones linealizadas de la MHD ideal en tres dimensiones, asumiendo un Sol con poca actividad, el cual fue alterado con una perturbación inicial tipo *twist* en el campo de velocidades, para seis valores diferentes del parámetro de *twist* y tres magnitudes del campo magnético en equilibrio. Particularmente, se analizó la morfología 3D de las líneas de los campos de velocidad y magnético, y el perfil espacial de la componente transversal de estos campos, asociada con las ondas torsionales de Alfvén. Los resultados de las simulaciones numéricas, revelan la amplificación del campo magnético debido al parámetro de *twist*. Específicamente, se observó que esta cantidad aumenta cuando el parámetro de *twist* aumenta y es menor para grandes magnitudes del campo magnético en equilibrio. Además, se mostró que el valor máximo de la amplificación en función del *twist* exhibe un comportamiento exponencial. Finalmente, se observó que el vector de flujo de Poynting es mayor si el *twist* es mayor y se reduce para campos magnéticos iniciales más intensos.

Palabras clave: MHD; Atmósfera Solar; Métodos Numéricos.

Abstract

Observations indicate that the magnetic field in the solar atmosphere is twisted, playing an important role in different solar phenomena, such as magnetic reconnection or solar flaring activity, among others. However its influence on these kind of phenomena remains unclear. Motivated by this, we study, through several 3D numerical simulations, the effect of the magnetic field twist on the propagation of torsional Alfvén and magneto-acoustic waves moving along the photosphere and the lower chromosphere in the quiet Sun. In order to simulate the dynamics of these magnetohydrodynamic (MHD) waves, we solve numerically the ideal 3D linearized MHD equations by assuming a quiet Sun, which is excited by an initial twist perturbation in the velocity vector field, for six different values of the twist

Citación: Wandurraga PC, Navarro A, Lora-Clavijo FD. Propagación de Ondas de Alfvén Torsionales en una Atmósfera Solar Estratificada. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):52-66, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefy.n.1245>

Editor: Román Castañeda

***Correspondencia:**

Fabio D. Lora-Clavijo;
fadulora@uis.edu.co

Recibido: 24 de junio de 2020

Aceptado: 12 de enero de 2021

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

parameter and three equilibrium magnetic field strengths. Particularly, we analyze the 3D morphology of the velocity and magnetic fields lines, and the spatial profiles of the transversal component of these fields associated with the torsional Alfvén waves. The results of our numerical simulations reveal the magnetic field amplification due to the twist parameter. Specifically, we have observed that this quantity increases as the twist parameter increases and decreases for larger values of the equilibrium magnetic strength. Moreover, we show that the maximum of amplification as function of the twist has an exponential behavior. Finally, we notice that the Poynting vector flux is greater for larger values of the initial twist but is smaller for more intense equilibrium magnetic fields.

Keywords: MHD; Solar Atmosphere; Numerical Methods.

Introduction

During the last decades, there have been observations dedicated to analyze the morphology of the magnetic field in the solar atmosphere. In the data taken by Hinode (**Kosugi et al.**, 2007), Solar Terrestrial Relations Observatory (STEREO; (**Kaiser et al.**, 2008)), Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI; (**Howard et al.**, 2008)) of the extreme ultraviolet radiation and the X-rays emitted by the Sun, it was recognized the presence of magnetic regions with helicity constituted by multiple entangled threads (**Raouafi**, 2009). Also, the observations of the mission Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS; (**Angelopoulos**, 2008)) were used by (**Canou et al.**, 2009) to study the configuration of the Sun before eruptive events, showing the existence of magnetic flux ropes in the solar atmosphere. On the other hand, with the vector magnetograms from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI; (**Hoeksema et al.**, 2014)) on board the Solar Dynamics Observatory (SDO; (**Pesnell, Thompson, & Chamberlin**, 2012)), (**R. Liu et al.**, 2016) concluded that, for a magnetic flux rope, the twist number, which is the winding of the magnetic field lines, increases before each flare and decreases after the flare peak. Using some images obtained by the New Vacuum Solar Telescope (NVST; (**Z. Liu et al.**, 2014)) on board the SDO, (**Bi et al.**, 2015) presented a partial eruptive filament, showing that the field lines related to the filament are twisted. Besides, from the Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS (**De Pontieu et al.**, 2014)) spectra, (**Tiwari et al.**, 2018) found evidence of twisting motion of magnetic fields in the spire of several large penumbra jets. These observations and works establish strong associations between some solar phenomena and the twisted field lines embeded in them.

The twist has become a key ingredient for the simulation of atmospheric features, such as the production of coronal mass ejections using the emergence of a twisted flux rope into the solar corona (**Chatterjee & Fan**, 2013) and the evolution of twisted loops in the corona that release energy and are capable of heat it (**Bareford, Hood, & Browning**, 2013). Moreover, (**Gordovskyy, Browning, Kontar, & Bian**, 2014) found that the evolution of a kink-unstable twisted coronal loop generate fields that can effectively accelerate protons and electrons to energies up to 10 MeV and (**Zaqarashvili, Vörös, & Zhelyazkov**, 2014) produced Kelvin-Helmholtz instabilities with twisted magnetic flux tubes at speeds smaller than the main solar wind stream speed. Also, (**Ebrahimi, Karami, & Soler**, 2017) investigated the effect of a twisted magnetic field on the evolution of MHD kink waves in coronal loops, showing that even a small amount of twist can have an important impact on the process of energy cascading to small scales and (**Terradas, Magyar, & Van Doorselaere**, 2018) observed how the twist affects the development of shear instabilities and modifies the properties of the eigenmodes of magnetic tubes. In addition, (**Knizhnik, Linton, & DeVore**, 2018) showed that the photospheric manifestations of the emergence of highly twisted flux ropes closely match the observed properties of δ -spots, which are the most favorable configurations for producing energetic flaring events.

The aim of this work is to study, through several 3D ideal MHD simulations, the effect of the twist on the amplification of the magnetic field and the Poynting vector flux in the photosphere and the lower chromosphere. In particular, we compute the magnetic field amplification as a function of time, for different twist parameters that are included in the initial perturbation. Additionally, we calculate the maximum of this amplification as a function of the twist, finding an exponential behavior for each magnetic field value. With this purpose, in the first section we introduce the MHD equations with the equilibrium state, the initial and boundary conditions, and the numerical methods we used. Then in the second section we present the results, both qualitatively and quantitatively, together with a trend in the maximum field amplification in terms of the amount of twist. Finally, in the third section we present the discussion and main conclusions of this paper.

Linearized MHD Equations

In order to simulate the plasma dynamics in the solar atmosphere, we evolve the linearized ideal MHD equations, which are written as follows

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 \vec{v}_1) = 0, \quad (1)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} + \nabla P_1 - \rho_1 \vec{g} - \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}_0) \times \vec{B}_1 - \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times \vec{B}_1) \times \vec{B}_0 = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} + \vec{v}_1 \cdot \nabla P_0 + \gamma P_0 \nabla \cdot \vec{v}_1 = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{B}_1}{\partial t} - \nabla \times (\vec{v}_1 \times \vec{B}_0) = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}_0 = 0 \quad \wedge \quad \nabla \cdot \vec{B}_1 = 0. \quad (5)$$

where ρ denotes the mass density, \vec{v} the velocity, P the gas pressure, $\vec{g} = (0, 0, -274)$ m s⁻² the acceleration of the gravity, μ_0 the permeability of free space, \vec{J} the electric current ($\vec{J} = \nabla \times \vec{B} / \mu_0$), \vec{B} the magnetic field and $\gamma = 5/3$ the adiabatic index. The subindex 0 and 1 denote the variables in the static equilibrium state and the perturbed variables, respectively. Assuming an analytic model for the temperature at the initial state, we numerically solve the system of equations (1-5) using MAGNUS (Navarro, Lora-Clavijo, & González, 2017), which is derived from CAFE (Lora-Clavijo, Cruz-Osorio, & Guzmán, 2015) code. Particularly, MAGNUS has been used to simulate the emergence of a plasma blob into a solar coronal hole (Navarro, Murawski, Wójcik, & Lora-Clavijo, 2019) and also to study the effects of thermal conduction on the formation of chromospheric solar tadpole-like jets (Navarro, Lora-Clavijo, Murawski, & Poedts, 2021). Additionally, a significant parameter in the study of wave propagation in a plasma is the beta plasma, which relates the fluid pressure to the magnetic pressure through the following expression

$$\beta = \frac{P}{P_{mag}} = \frac{2\mu_0 P}{B^2}, \quad (6)$$

being equivalent to a relation between the volumetric density of thermal and magnetic energy. It is noteworthy that this parameter allows us to measure how magnetized is the plasma in each region of the solar atmosphere and lets us distinguish between the layers of the solar atmosphere: in the photosphere and chromosphere, thermal energy is dominant ($\beta > 1$), then $\beta \approx 1$ in the transition zone, and for the solar corona, the magnetic energy controls the fluid ($\beta < 1$); this agrees with the results presented by (Mariska, 1986) about the transition region.

Features of the model

An equilibrium state corresponding to a quiet Sun is proposed, *i.e.*, without taking into account any of its transient phenomena, by including an approximate temperature profile and obtaining the density and pressure profiles. Additionally, the magnetic field of the equilibrium state is uniform $\vec{B} = (0, 0, B_0)$, where B_0 is its magnitude and for this work in particular, we use three specific values: 40 G, 50 G and 60 G. These values of the magnetic field are based on the analysis of observations obtained with the spectropolarimeter of the telescope THEMIS in quiet regions of the Sun (**Bommier, Derouich, Landi Degl’Innocenti, Molodij, & Sahal-Bréchet**, 2005). In order to study the propagation of the torsional Alfvén waves which spread in the solar atmosphere, the initial state is perturbed by a gaussian pulse in the velocity field, which can be caused by p modes (**Jain, Gascoyne, & Hindman**, 2011). The p modes are a mechanism to excite MHD waves when they impacts with a thin magnetic flux tube.

Equilibrium State

A commonly analytical profile of the temperature for a quiet Sun is described by the following expression

$$T_0(z) = \frac{1}{2} (T_{\text{cor}} + T_{\text{phot}}) + \frac{1}{2} (T_{\text{cor}} - T_{\text{phot}}) \tanh\left(\frac{z - z_t}{z_w}\right), \quad (7)$$

where $T_{\text{cor}} = 1.2 \times 10^6$ K is the temperature in the solar corona and $T_{\text{phot}} = 6 \times 10^3$ K the temperature in the photosphere, which are separated by the chromosphere and the transition region, its thickness and position are related to the parameters $z_w = 0,25$ Mm and $z_t = 2.7$ Mm.

The temperature, pressure and density in the equilibrium state are related by the following expressions

$$P_0 = \frac{2K_B}{m_p} \rho_0 T_0, \quad \nabla P_0 - \rho_0 \vec{g} = 0, \quad (8)$$

being these, the equation of state for an ideal gas and the equation of hydrostatic equilibrium for a force-free field (**Wiegelmann & Sakurai**, 2012) respectively, where K_B is the Boltzmann constant and m_p the proton mass. The expressions of pressure and density can be written as

$$P_0(z) = P_0(z_0) \exp\left[-\frac{m_p g}{2K_B} \int_{z_0}^z \frac{dz'}{T_0(z')}\right], \quad (9)$$

$$\rho_0(z) = \frac{m_p}{2K_B} \frac{P_0(z)}{T_0(z)}, \quad (10)$$

where $z_0 = 0$ Mm is the photosphere base and $P_0 = 24.8$ Pa the pressure at that height.

Initial and Boundary Conditions

The initial configurations correspond to the perturbations of the equilibrium state previously described, the perturbations for the mass density, gas pressure and the components of the magnetic field are zero. Instead, for the velocity field components, we have used a perturbation that is transversal to the propagation direction (\hat{e}_z) which are related to the generation of torsional Alfvén waves and other waves along the direction of propagation, following

(Murawski, Solov'ev, & Krařkiewicz, 2015). The model is a gaussian function in the three components of the velocity field, with width $\sigma = 0.1$ Mm and center in (0,0,0.3) Mm

$$\begin{aligned} v_{1x} &= \Lambda \frac{A_x}{\sigma} y \exp \left\{ -\frac{x^2 + y^2 + (z - z_0)^2}{\sigma^2} \right\}, \\ v_{1y} &= \Lambda \frac{A_y}{\sigma} x \exp \left\{ -\frac{x^2 + y^2 + (z - z_0)^2}{\sigma^2} \right\}, \\ v_{1z} &= A_z \exp \left\{ -\frac{x^2 + y^2 + (z - z_0)^2}{\sigma^2} \right\}, \end{aligned} \quad (11)$$

where Λ represents the amount of twist, which takes the values displayed in Table 1, $A_x = A_y = 100$ km/s are the amplitudes of the gaussian function in x and y direction respectively, and $A_z = 3$ km/s is the corresponding amplitude along the z direction. As $A_z \ll A_x$ and $A_z \ll A_y$, the main effect on the system comes from the transversal components of the perturbation.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Λ	0	0.0125	0.25	0.5	1	2

Table 1. Values of twist in each case, Λ is related to the amplitude of the perturbation in the xy-plane.

The boundary conditions at the top and bottom of the numerical domain, are implemented by fixing in time all plasma quantities to the equilibrium values, *i.e.*, the variables does not evolve in those sides. On the other hand, outflow boundaries are implemented in the remaining four surfaces of the numerical domain (Murawski, Ballai, Srivastava, & Lee, 2013).

Numerical Methods

The equations are solved with a module implemented in the MHD code MAGNUS (Navarro et al., 2017), for the linear regime. In order to guarantee the condition of absence of magnetic monopoles, the Flux Constrained Transport method is implemented (Evans & Hawley, 1988). The numerical domain of the simulation was $[-0.5, 0.5]$ Mm \times $[-0.5, 0.5]$ Mm \times $[0, 3]$ Mm, with a grid of $50 \times 50 \times 150$ points, with spatial resolution of 20 km, uniform in the three directions.

Results

Morphology

The qualitative analysis of the results was made through an intensive study of the morphology of the plasma velocity and magnetic fields. Figure 1 shows the velocity vectors for two values of Λ at two different times, where the propagation modes are displayed moving upwards and downwards, that behave like twisted lines of the velocity field. For $\Lambda = 0.0125$ at $t = 80$ s (top left panel) and $\Lambda = 2$ at the same time (top right panel) the upwards propagating waves reach the lower chromosphere at $z \approx 0.7$ Mm and the ones moving downwards are close to the boundary, at $z \approx 0.2$ Mm. For $\Lambda = 0.0125$ at $t = 140$ s (bottom left panel) and $\Lambda = 2$ at the same time (bottom right panel), the upward modes reach the center of the chromosphere at $z \approx 1.2$ Mm and the downward ones almost disappear of the domain. The morphology is similar for different values of Λ at the same times, but it is noticeable that the magnitude of the velocity field increases when the value of the twist is bigger. These values of the speed are consistent with those observed in a torsional Alfvén wave propagating at the coronal heights (Kohutova, Verwichte, & Froment, 2020).

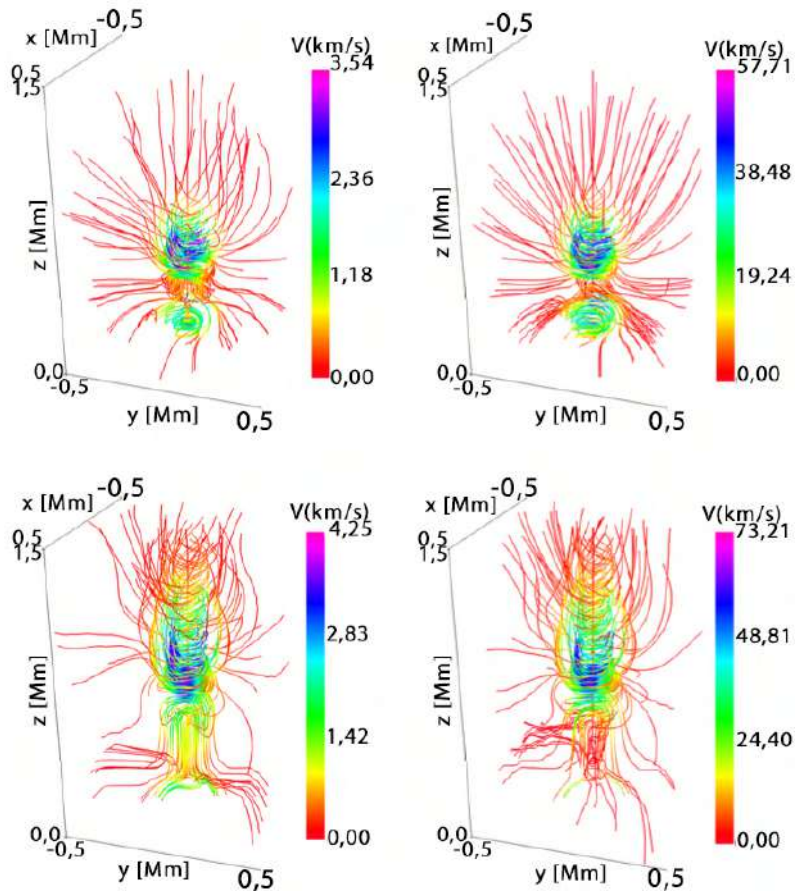


Figura 1. The left (right) column displays the velocity field lines for $\Lambda = 0.0125$ ($\Lambda = 2$), at $t = 80$ s (top) and $t = 140$ s (bottom) for $B_0 = 40$ G. The units of the axes x , y and z are in Mm.

The magnetic field lines are displayed in Figure 2, there are magnetohydrodynamic and torsional waves propagating along the $+z$ direction and $-z$ direction for two values of Λ and at two moments of time. For $\Lambda = 0.0125$ (left column) the field lines have some torsion but are not as twisted as in the case of $\Lambda = 2$ (right column), also it is noteworthy that the magnitude of the magnetic field for $\Lambda = 2$ is approximately one order of magnitude greater than for the smaller twist, in some places. For $\Lambda = 0.0125$ at $t = 80$ s (top left panel) and $\Lambda = 2$ at the same time (top right panel), the moving upwards waves reach the lower chromosphere $z \approx 0.6$ Mm and the downward ones are near the photosphere at $z = 0.2$ Mm. For $\Lambda = 0.0125$ at $t = 140$ s (bottom left panel) and $\Lambda = 2$ at the same time (bottom right panel), the upwards modes get higher, close to the center of the chromosphere, at $z = 1.0$ Mm, and the downward ones are in the lower photosphere, at $z \approx 0.1$ Mm. A similar morphology was presented by (Murawski, Chmielewski, Zaqarashvili, & Khomenko, 2016), showing that the magnetic field twists by implementing a driver with twist in the azimuthal component of the velocity.

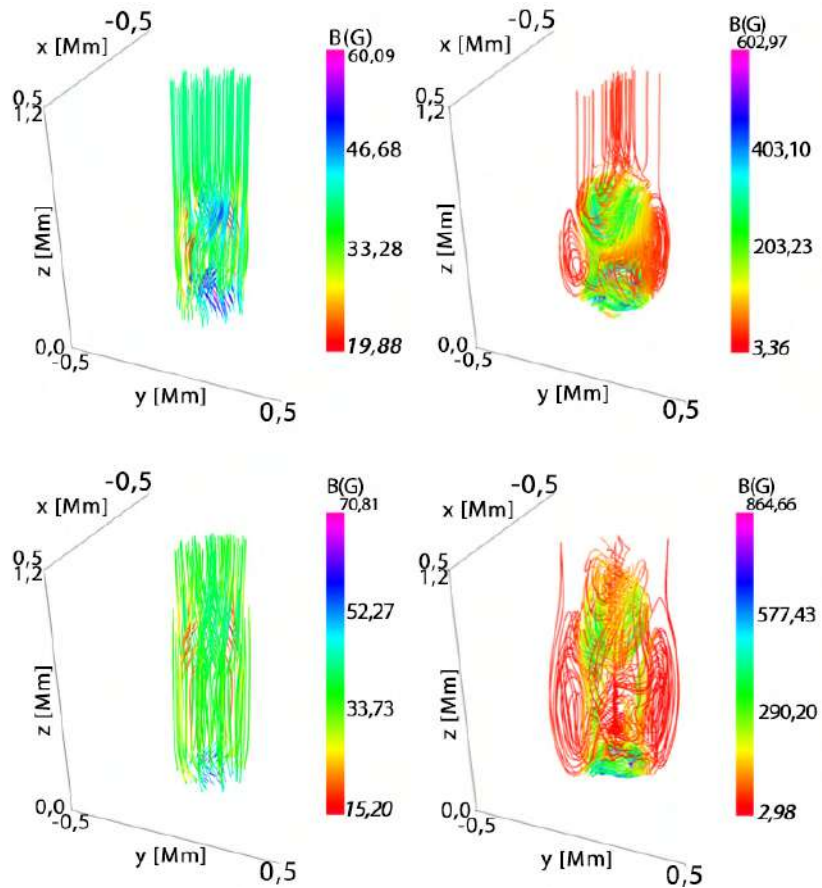


Figura 2. The left (right) column displays the magnetic field lines for $\Lambda = 0.0125$ ($\Lambda = 2$), at $t = 80$ s (top) and $t = 140$ s (bottom) for $B_0 = 40$ G. The units of the axes x , y and z are in Mm.

Analysis

To guarantee the preservation of $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ numerically, the maximum of the divergence of the magnetic field for the whole numerical domain in each step of time, until $t \approx 170$ s, is shown in logarithmic scale in Figure 3 for $B_0 = 40$ G, $B_0 = 50$ G and $B_0 = 60$ G, where it can be noticed that they are below 10^{-19} T/m in all cases.

Figure 4 shows the y -component of the field in the plane xz with $y = 0$ Mm for the particular case $\Lambda = 2$ and $B_0 = 40$ G, at three different times¹. At $t = 12$ s (top row), for the velocity field (left panel) two modes are seen, they are symmetrical but one is positive and the other is negative, that allows the field lines to twist because they have opposite directions, the magnetic field (right panel) has a similar morphology but with four modes. At $t = 80$ s (middle row), there are two modes of the y component of the velocity propagating upwardly, which reach a height of $z \approx 0.7$ Mm and another two modes propagating downwardly. Moreover, for the y component of the magnetic field, there are waves moving downward and waves moving upward, which reach an altitude of $z \approx 0.6$ Mm. The bottom row shows the y component of the fields at $t = 140$ s where it is noticeable that the downward wave is almost gone for both fields, but the upward velocity mode is reaching $z \approx 1$

¹Figure 4 was compared to other values of Λ . It was noticed that the morphology of the Alfvén pulses is the same for all the cases, but the magnitudes of the y component of the velocity and magnetic field are smaller when the twist is lower.

Mm while the magnetic one is near $z = 0.8$ Mm. The morphology of the vertical planes for both fields is similar to the one obtained by (Murawski et al., 2015), where an initial pulse in the azimuthal component of velocity was launched to excite MHD waves.

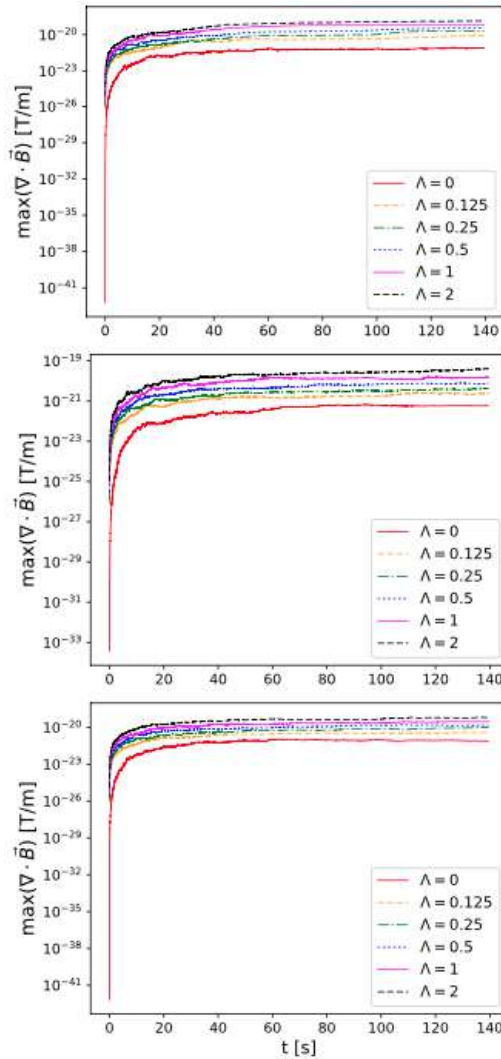


Figura 3. Maximum value of the divergence of the magnetic field for each value of Λ with $B_0 = 40$ G (top), $B_0 = 50$ G (center) and $B_0 = 60$ G (bottom) as a function of time.

The field amplification is calculated as

$$\mathcal{A} = \frac{\int B^2(t)dV}{\int B^2(0)dV}, \tag{12}$$

it shows the behavior of the magnetic field all over the volume normalized to its initial value.

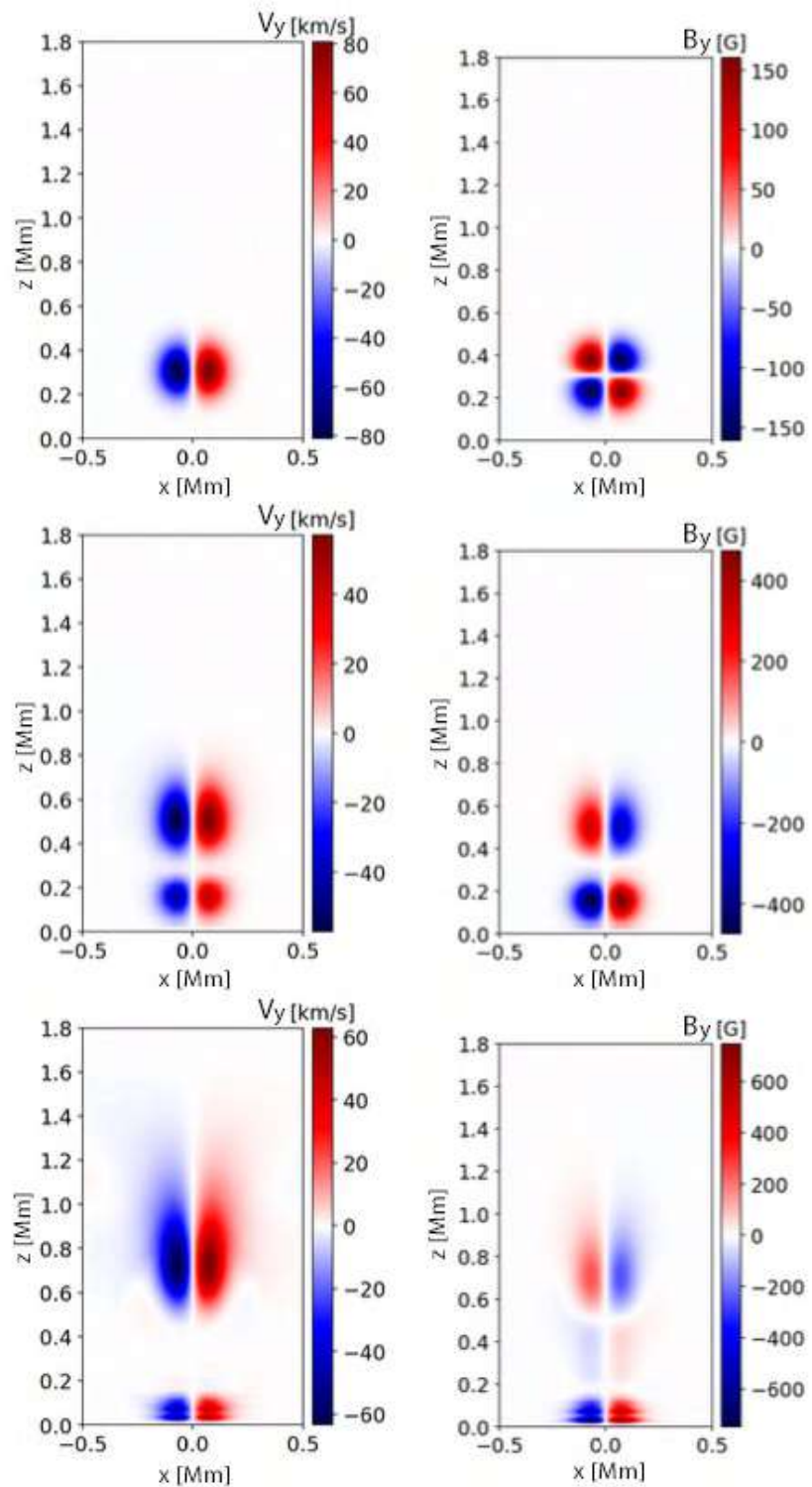


Figure 4. The left (right) column displays the y component of the velocity field (magnetic field) in the plane xz with $y=0$ Mm at $t = 12$ s (top row), $t = 80$ s (middle row) and $t = 140$ s (bottom row) for $\Lambda = 2$ and $B_0 = 40$ G.

Figure 5 shows that the field amplification is proportional to the twist. For $B_0 = 40$ G (top left panel) when $\Lambda = 2$, the field increases in $\sim 70\%$ with respect to the initial value, for $B_0 = 50$ G (top right panel) the increase for the same value of Λ is more than 40% and for $B_0 = 60$ G (bottom left panel), that increase is $\sim 30\%$. There is a noticeable trend, the smaller the equilibrium magnetic field the greater the increase of the field, this is shown in Figure 5 (bottom right panel) for the case $\Lambda = 2$. To prove if that assumption is valid for every value of Λ , we calculate the maximum of the amplification in the volume for each value of the magnitude of the equilibrium magnetic field and twist, the results are presented in the Table 2 and plotted in Figure 6.

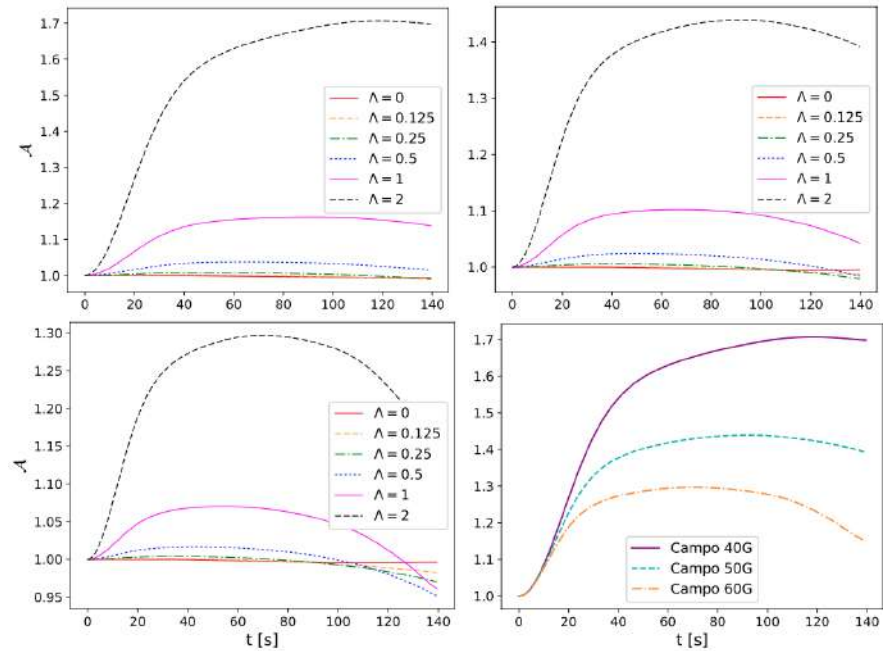


Figura 5. Amplification of magnitude of the magnetic field strength in every time step for each value of Λ for $B_0 = 40$ G (top left), $B_0 = 50$ G (top right) and $B_0 = 60$ G (bottom left). Field amplification in every time step for each magnetic field value with $\Lambda = 2$ (bottom right).

$B_0 \setminus \Lambda$	0	0.0125	0.25	0.5	1	2
40 G	1.00005	1.00194	1.00847	1.03749	1.16209	1.70652
50 G	1.00004	1.00135	1.00566	1.02399	1.10211	1.43924
60 G	1.00003	1.00099	1.00404	1.01678	1.07018	1.29692

Table 2. Maximum field amplification for each magnetic field magnitude and value of Λ .

The maximum of the field amplification over the entire volume with respect to the twist is shown in Figure 6 (top left panel) for each value of the equilibrium magnetic field.

We made exponential interpolations for each set of data following the form $\max(\mathcal{A}(\Lambda)) = b + n e^{u \Lambda}$, where the values b , n and u are displayed in the Table 3. The data and the fits are shown in Figure 6 (top right panel and bottom row).

B_0	b	n	u
40 G	0.9283 ± 0.0202	0.0654 ± 0.0151	1.2386 ± 0.1038
50 G	0.9541 ± 0.0128	0.0421 ± 0.0097	1.2226 ± 0.1029
60 G	0.9676 ± 0.0090	0.0298 ± 0.0068	1.2019 ± 0.1025

Table 3. Values of the constants involved in the interpolation of the data in the figure 6, following $\max(\mathcal{A}(\Lambda)) = b + n e^{u \Lambda}$, with each asymptotic standard error.

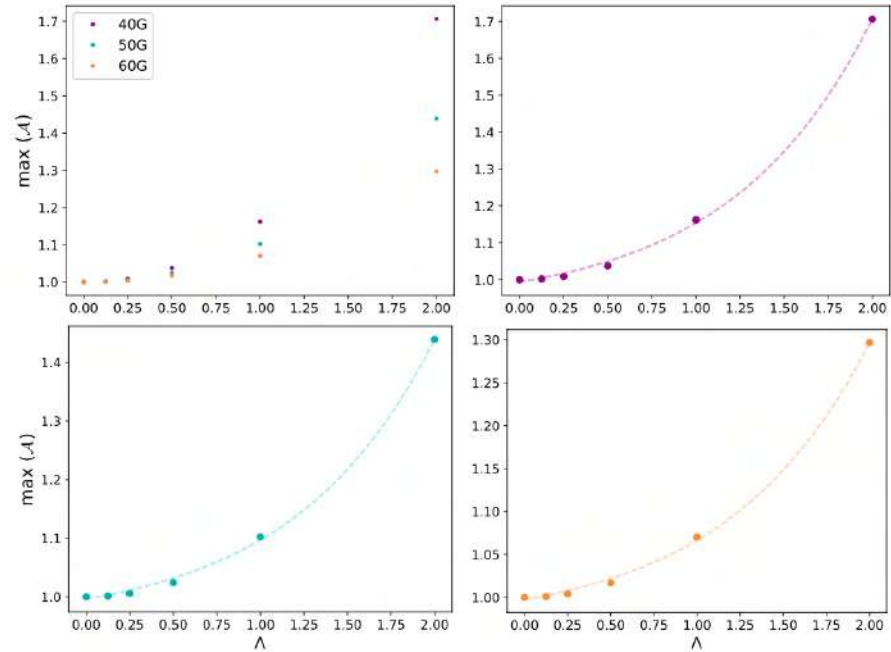


Figure 6. Maximum field amplification for each magnetic field value in terms of Λ (top left panel). Maximum field amplification in terms of Λ and its corresponding fit for $B_0 = 40$ G (top right panel), $B_0 = 50$ G (bottom left panel) and $B_0 = 60$ G (bottom right panel).

The Poynting flux is calculated as

$$\Phi_S = \frac{1}{A} \int \vec{S} \cdot d\vec{A}, \tag{13}$$

where $d\vec{A} = dx dy \hat{e}_z$ and \vec{S} is the Poynting vector calculated as

$$\vec{S} = -\frac{1}{\mu_0} (\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B}. \tag{14}$$

Figure 7 presents the Poynting flux as a function of the time for the lower chromosphere, at $z = 0.5$ Mm (left column), the center of the chromosphere, at $z = 1.0$ Mm (middle column), and for the upper chromosphere, at $z = 1.5$ Mm (right column), with $B_0 = 40$ G (top row), $B_0 = 50$ G (center row) and $B_0 = 60$ G (bottom row), for each value of Λ . For greater values of the initial magnetic field magnitude, the Poynting flux is larger but its propagation is slower to reach the corona and when the magnetic field is smaller, the energy propagates faster. While it travels along the z -axis, the flux is dissipated because some of that energy

is taken to twist the magnetic field lines and because the wave is reaching up layers of the atmosphere with different conditions.

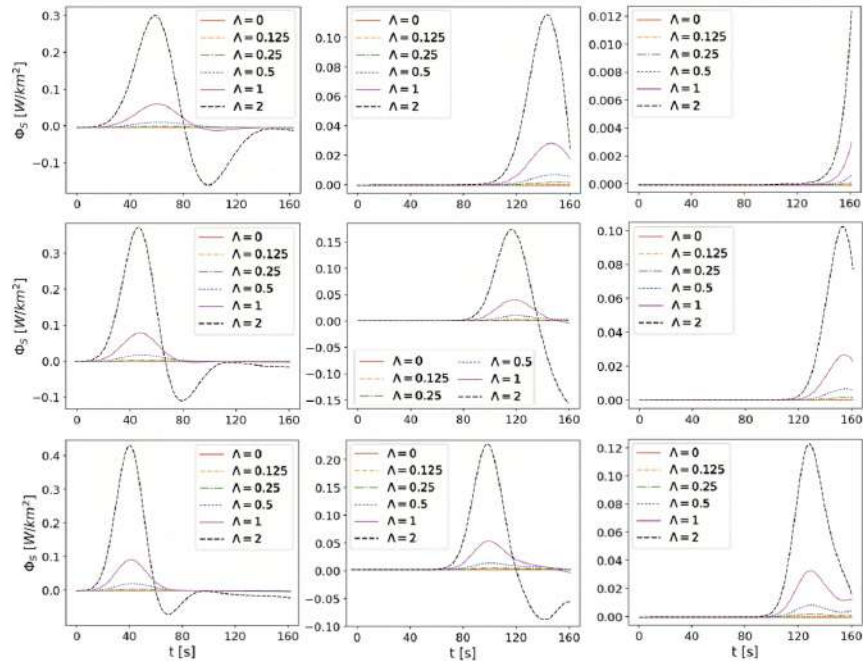


Figura 7. Poynting vector flux along z -surfaces for $z=0.5$ Mm (left column), $z=1.0$ Mm (middle column) and $z=1.5$ Mm (right column), with $B_0 = 40$ G (top row), $B_0 = 50$ G (center row) and $B_0 = 60$ G (bottom row), for each value of Λ .

Observations has revealed that torsional Alfvén waves transport around 10^3 W/m² to the solar corona, which makes these waves one of the possible sources to explain the coronal heating (Srivastava et al., 2017). On the other hand, the Kelvin-Helmholtz instability transforms the kinetic energy into magnetic one, amplifying the magnetic fields up to a saturation point (Pimentel & Lora-Clavijo, 2019). Then, by magnetic reconnection, the magnetic energy begins to decrease in such way that the kinetic and thermal energies increase the amount of energy that is transported by the torsional Alfvén waves to the upper layers of the solar atmosphere (Zhelyazkov, 2015). However, in this work, the system of equations is linearized and it did not allow the simulations to develop and handle instabilities, such as the Kelvin-Helmholtz instability, this limitation explains the small values of energy registered by our simulations.

Discussion and Concluding remarks

We made several simulations in order to find the influence of twisted velocity field in the evolution of a perturbation in the solar atmosphere. With that aim, we imposed an equilibrium background made of stratified temperature, gas pressure and mass density, together with an uniform magnetic field and acceleration of the gravity. This background was perturbed with gaussian functions for the velocity, along the direction of propagation and torsional in the transversal direction of propagation to excite torsional Alfvén waves. To solve this characterized problem, we evolved the ideal MHD equations in the linear regime already perturbed, with the code MAGNUS.

We studied the morphology of the velocity and magnetic fields, and evidenced the twist in their lines. Also, we computed the field amplification as a function of time, noticing an increase in magnetic field strength with the amount of twist, and a stronger field amplification for smaller values of equilibrium magnetic fields. For the specific case of $B_0 = 40$ G and $\Lambda = 2$, the amplification is near 70% of the initial field. We compute the maximum field amplification as a function of the twist parameter, finding that for each equilibrium magnetic field, it follows an exponential function. Moreover, we calculated the Poynting vector flux through z-surfaces, concluding that the flux was greater for larger values of twist and more intense equilibrium magnetic fields. Finally, we showed that the maximum of the divergence of the magnetic field in all the domain of the simulation, is always below 10^{-19} T/m.

It is worth mentioning that this work is limited by the linear regime of the equations. Also, the equations corresponds to the ideal magnetohydrodynamic ones, which avoid the effects of several sources, such as ohmic resistivity, heat flow, among others. In future works, we will consider more longer simulations, in such a way that the waves could propagate through all the layers of the solar atmosphere until the corona. Moreover, these simulations will be carried out with the non linear MHD equations and using different sources to evidence the effect of each one in the morphology of the velocity and magnetic fields and the propagation of the Alfvén modes through the solar atmosphere.

Acknowledgments

P.C.W. wants to thanks the financial support from Universidad Industrial de Santander. A. M. wants to thanks the financial support from COLCIENCIAS under the program Becas Doctorados Nacionales 647 and Universidad Industrial de Santander. F.D.L-C. acknowledges support from Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Universidad Industrial de Santander, under Grant No. 2493.

Contribution of the authors

P.C.W. made the lineal MHD code using MAGNUS and wrote the article. A.M. created the Python tools to visualize the results and reviewed the article. F.D.L-C. provided the idea of the article and made the lineal MHD code, he also reviewed the article. All the authors analyzed the results.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests with the content of this article.

References

- Angelopoulos, V. (2008, December). The THEMIS Mission. , *141*(1-4), 5-34. doi: 10.1007/s11214-008-9336-1
- Bareford, M. R., Hood, A. W., & Browning, P. K. (2013, February). Coronal heating by the partial relaxation of twisted loops. , *550*(), A40. doi: 10.1051/0004-6361/201219725
- Bi, Y., Jiang, Y., Yang, J., Xiang, Y., Cai, Y., & Liu, W. (2015, May). Partial Eruption of a Filament with Twisting Non-uniform Fields. , *805*(1), 48. doi: 10.1088/0004-637X/805/1/48
- Bommier, V., Derouich, M., Landi Degl'Innocenti, E., Molodij, G., & Sahal-Bréchet, S. (2005, March). Interpretation of second solar spectrum observations of the Sr I 4607 line in a quiet region: Turbulent magnetic field strength determination. , *432*(1), 295-305. doi: 10.1051/0004-6361:20035773

- Canou, A., Amari, T., Bommier, V., Schmieder, B., Aulanier, G., & Li, H.** (2009, March). Evidence for a Pre-Eruptive Twisted Flux Rope Using the Themis Vector Magnetograph. , *693*(1), L27-L30. doi: 10.1088/0004-637X/693/1/L27
- Chatterjee, P., & Fan, Y.** (2013, November). Simulation of Homologous and Cannibalistic Coronal Mass Ejections produced by the Emergence of a Twisted Flux Rope into the Solar Corona. , *778*(1), L8. doi: 10.1088/2041-8205/778/1/L8
- De Pontieu, B., Title, A. M., Lemen, J. R., Kushner, G. D., Akin, D. J., Allard, B., ... Waltham, N.** (2014, July). The Interface Region Imaging Spectrograph (IRIS). , *289*(7), 2733-2779. doi: 10.1007/s11207-014-0485-y
- Ebrahimi, Z., Karami, K., & Soler, R.** (2017, August). The Effect of a Twisted Magnetic Field on the Phase Mixing of the Kink Magnetohydrodynamic Waves in Coronal Loops. , *845*(1), 86. doi: 10.3847/1538-4357/aa7f75
- Evans, C. R., & Hawley, J. F.** (1988, September). Simulation of Magnetohydrodynamic Flows: A Constrained Transport Model. , *332*(), 659. doi: 10.1086/166684
- Gordovskyy, M., Browning, P. K., Kontar, E. P., & Bian, N. H.** (2014, January). Particle acceleration and transport in reconnecting twisted loops in a stratified atmosphere. , *561*(), A72. doi: 10.1051/0004-6361/201321715
- Hoeksema, J. T., Liu, Y., Hayashi, K., Sun, X., Schou, J., Couvidat, S., ... Turmon, M.** (2014, September). The Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Vector Magnetic Field Pipeline: Overview and Performance. , *289*(9), 3483-3530. doi: 10.1007/s11207-014-0516-8
- Howard, R. A., Moses, J. D., Vourlidas, A., Newmark, J. S., Socker, D. G., Plunkett, S. P., ... Carter, T.** (2008, April). Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI). , *136*(1-4), 67-115. doi: 10.1007/s11214-008-9341-4
- Jain, R., Gascoyne, A., & Hindman, B. W.** (2011, August). Interaction of p modes with a collection of thin magnetic tubes. , *415*(2), 1276-1279. doi: 10.1111/j.1365-2966.2011.18778.x
- Kaiser, M. L., Kucera, T. A., Davila, J. M., St. Cyr, O. C., Guhathakurta, M., & Christian, E.** (2008, April). The STEREO Mission: An Introduction. , *136*(1-4), 5-16. doi: 10.1007/s11214-007-9277-0
- Knizhnik, K. J., Linton, M. G., & DeVore, C. R.** (2018, September). The Role of Twist in Kinked Flux Rope Emergence and Delta-spot Formation. , *864*(1), 89. doi: 10.3847/1538-4357/aad68c
- Kohutova, P., Verwichte, E., & Froment, C.** (2020, January). First direct observation of a torsional Alfvén oscillation at coronal heights. , *633*(), L6. doi: 10.1051/0004-6361/201937144
- Kosugi, T., Matsuzaki, K., Sakao, T., Shimizu, T., Sone, Y., Tachikawa, S., ... Golub, L.** (2007, June). The Hinode (Solar-B) Mission: An Overview. , *243*(1), 3-17. doi: 10.1007/s11207-007-9014-6
- Liu, R., Kliem, B., Titov, V. S., Chen, J., Wang, Y., Wang, H., ... Wiegmann, T.** (2016, February). Structure, Stability, and Evolution of Magnetic Flux Ropes from the Perspective of Magnetic Twist. , *818*(2), 148. doi: 10.3847/0004-637X/818/2/148
- Liu, Z., Xu, J., Gu, B.-Z., Wang, S., You, J.-Q., Shen, L.-X., ... Zhang, B.-R.** (2014, June). New vacuum solar telescope and observations with high resolution. *Research in Astronomy and Astrophysics*, *14*(6), 705-718. doi: 10.1088/1674-4527/14/6/009
- Lora-Clavijo, F. D., Cruz-Osorio, A., & Guzmán, F. S.** (2015, June). CAFE: A New Relativistic MHD Code. , *218*(2), 24. doi: 10.1088/0067-0049/218/2/24
- Mariska, J. T.** (1986, January). The quiet solar transition region. , *24*(), 23-48. doi: 10.1146/annurev.aa.24.090186.000323
- Murawski, K., Ballai, I., Srivastava, A. K., & Lee, D.** (2013, December). Three-dimensional numerical simulation of magnetohydrodynamic-gravity waves and vortices in the solar atmosphere. , *436*(2), 1268-1277. doi: 10.1093/mnras/stt1653

- Murawski, K., Chmielewski, P., Zaqarashvili, T. V., & Khomenko, E.** (2016, July). Numerical simulations of magnetic Kelvin-Helmholtz instability at a twisted solar flux tube. , *459*(3), 2566-2572. doi: 10.1093/mnras/stw703
- Murawski, K., Solov'ev, A., & Kraśkiewicz, J.** (2015, July). A Numerical Model of MHD Waves in a 3D Twisted Solar Flux Tube. , *290*(7), 1909-1922. doi: 10.1007/s11207-015-0740-x
- Navarro, A., Lora-Clavijo, F. D., & González, G. A.** (2017, July). Magnus: A New Resistive MHD Code with Heat Flow Terms. , *844*(1), 57. doi: 10.3847/1538-4357/aa7a13
- Navarro, A., Lora-Clavijo, F. D., Murawski, K., & Poedts, S.** (2021, January). Thermal conduction effects on formation of chromospheric solar tadpole-like jets. , *500*(3), 3329-3334. doi: 10.1093/mnras/staa3402
- Navarro, A., Murawski, K., Wójcik, D., & Lora-Clavijo, F. D.** (2019, October). Numerical simulations of the emerging plasma blob into a solar coronal hole. , *489*(2), 2769-2774. doi: 10.1093/mnras/stz2313
- Pesnell, W. D., Thompson, B. J., & Chamberlin, P. C.** (2012, January). The Solar Dynamics Observatory (SDO). , *275*(1-2), 3-15. doi: 10.1007/s11207-011-9841-3
- Pimentel, O. M., & Lora-Clavijo, F. D.** (2019, December). On the linear and non-linear evolution of the relativistic MHD Kelvin-Helmholtz instability in a magnetically polarized fluid. , *490*(3), 4183-4193. doi: 10.1093/mnras/stz2750
- Raouafi, N. E.** (2009, February). Observational Evidence for Coronal Twisted Flux Rope. , *691*(2), L128-L132. doi: 10.1088/0004-637X/691/2/L128
- Srivastava, A. K., Shetye, J., Murawski, K., Doyle, J. G., Stangalini, M., Scullion, E., ... Dwivedi, B. N.** (2017, March). High-frequency torsional Alfvén waves as an energy source for coronal heating. *Scientific Reports*, *7*(), 43147. doi: 10.1038/srep43147
- Terradas, J., Magyar, N., & Van Doorselaere, T.** (2018, January). Effect of Magnetic Twist on Nonlinear Transverse Kink Oscillations of Line-tied Magnetic Flux Tubes. , *853*(1), 35. doi: 10.3847/1538-4357/aa9d0f
- Tiwari, S. K., Moore, R. L., De Pontieu, B., Tarbell, T. D., Panesar, N. K., Winebarger, A. R., & Sterling, A. C.** (2018, December). Evidence of Twisting and Mixed-polarity Solar Photospheric Magnetic Field in Large Penumbra Jets: IRIS and Hinode Observations. , *869*(2), 147. doi: 10.3847/1538-4357/aaf1b8
- Wiegmann, T., & Sakurai, T.** (2012, September). Solar Force-free Magnetic Fields. *Living Reviews in Solar Physics*, *9*(1), 5. doi: 10.12942/lrsp-2012-5
- Zaqarashvili, T. V., Vörös, Z., & Zhelyazkov, I.** (2014, January). Kelvin-Helmholtz instability of twisted magnetic flux tubes in the solar wind. , *561*(), A62. doi: 10.1051/0004-6361/201322808
- Zhelyazkov, I.** (2015, March). On Modeling the Kelvin-Helmholtz Instability in Solar Atmosphere. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, *36*(1), 233-254. doi: 10.1007/s12036-015-9332-2

Original article

On the coupling of vector fields to the Gauss-Bonnet invariant

Sobre el acople de campos vectoriales al invariante de Gauss-Bonnet

Juan C. Bueno-Sánchez¹, John Bayron Orjuela-Quintana^{2,*}, César A. Valenzuela-Toledo²

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Física Aplicada, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

² Departamento de Física, Universidad del Valle Ciudad Universitaria Meléndez, Santiago de Cali, Colombia

Abstract

Inflationary models including vector fields have attracted a great deal of attention over the past decade. Such an interest owes to the fact that they might contribute to, or even be fully responsible for, the curvature perturbation imprinted in the cosmic microwave background. However, the necessary breaking of the vector fields conformal invariance during inflation is not without problems. In recent years, it has been realized that a number of instabilities endangering the consistency of the theory arise when the conformal invariance is broken by means of a non-minimal coupling to gravity. In this paper, we consider a massive vector field non-minimally coupled to gravity through the Gauss-Bonnet invariant, and investigate whether the vector can play the role of a curvaton while evading the emergence of instabilities and preserves the large-scale isotropy.

Keywords: inflation; statistical anisotropy; vector field models; Gauss-Bonnet invariant.

Resumen

Los modelos inflacionarios que incluyen campos vectoriales han despertado una gran interés durante la última década. Este interés se debe al hecho de que estos campos podrían contribuir, o incluso ser totalmente responsables, de la perturbación en la curvatura impresa en la radiación cósmica de fondo. Sin embargo, la necesaria ruptura de la invariancia conforme del campo vectorial durante inflación no está exenta de problemas. En los últimos años se ha mostrado que surgen una serie de inestabilidades que ponen en peligro la coherencia de la teoría cuando la invariancia conforme se rompe mediante un acoplamiento no mínimo a la gravedad. En este artículo, consideramos un campo vectorial masivo, no mínimamente acoplado a la gravedad a través de la invariante Gauss-Bonnet, e investigamos si el campo vectorial puede desempeñar el rol de curvaton al tiempo que evade la aparición de inestabilidades y preserva la isotropía a gran escala.

Palabras clave: inflación; anisotropía estadística; modelos con campos vectoriales; invariante de Gauss-Bonnet.

Citation: Bueno-Sánchez JC, Orjuela-Quintana JB, Valenzuela-Toledo CA. On the coupling of vector fields to the Gauss-Bonnet invariant. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):67-82, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyfyn.1146>

Editor: Guillermo González-Villegas

***Corresponding autor:**
John Bayron Orjuela-Quintana;
john.orjuela@correounivalle.edu.co

Received: January 20, 2020

Accepted: October 10, 2020

Published: March 29, 2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

Introduction

Thanks to a wealth of high precision cosmological observations, specially those obtained by the WMAP (C. L. Bennett et al., 2013; Hinshaw et al., 2013; Komatsu et al., 2011; Spergel et al., 2007.; Peiris et al., 2003) and Planck missions (Aghanim et al., 2020; Akrami et al., 2020c, 2020a), cosmological inflation is widely recognized as the simplest paradigm to generate the observed adiabatic, nearly scale-invariant, gaussian spectrum of superhorizon fluctuations imprinted in the cosmic microwave background (CMB). In particular, single-field models, in which the inflationary expansion is driven by a scalar field minimally coupled to gravity, are clearly favored by data. Despite their excellent agreement with the available data, indications exist suggesting that single-field models might need to be extended. The most notorious among these indications are the possible presence of the so-called CMB anomalies (see for instance (Perivolaropoulos, 2014) for an overview of some of them), firstly reported by WMAP (C. Bennett et al., 2011) and later by Planck (Akrami et al., 2020b). However, since the statistical significance of these effects is small, the existence of these anomalies has been debated in the literature and they are yet to be confirmed (Akrami et al., 2020b; Schwarz, Copi, Huterer, & Starkman, 2016).

Although scalar fields have played a dominant role in inflationary cosmology, over the last decade it has been realized that vector fields may also have an important function provided their conformal symmetry is broken (see for instance (Soda, 2012; Dimastrogiovanni, Bartolo, Matarrese, & Riotto, 2010; Maleknejad, Sheikh-Jabbari, & Soda, 2013; De Felice et al., 2016; Heisenberg, Kase, & Tsujikawa, 2016, 2018; Heisenberg, 2019) and references therein). This breaking, which can be brought about by the introduction of a mass term, for example, allows the vector field to obtain a superhorizon spectrum of perturbations during inflation. In turn, this opens up the possibility that the vector field becomes a curvaton and contributes to the curvature perturbation (Lyth & Wands, 2002; Dimopoulos, 2006; Dimopoulos & Karciauskas, 2008; Dimopoulos, Karciauskas, Lyth, & Rodriguez, 2009; Dimopoulos, Karciauskas, & Wagstaff, 2010.b, 2010.a; Dimopoulos, 2012; Navarro & Rodriguez, 2013.; Karciauskas & Lyth, 2010; Wagstaff & Dimopoulos, 2011), for which the vector field must come to dominate (or nearly dominate) the energy density at a later epoch. However, the risk when considering the influence of vector fields in the cosmological dynamics is that, since they signal a preferred direction in space, they may result in an anisotropic expansion in excess of the current observational bounds. To quantify the level of statistical anisotropy, it is usual to parametrize the spectrum of the curvature perturbation as (Ackerman, Carroll, & Wise, 2007)

$$\mathcal{P}_\zeta(k) = \mathcal{P}_\zeta^{\text{iso}}(k)[1 + g(k)(d \cdot \hat{k})^2], \quad (1)$$

where $\mathcal{P}_\zeta^{\text{iso}}(k)$ denotes the isotropic part of the power spectrum, $g(k)$ is the so-called anisotropy parameter, which quantifies the statistical anisotropy in the spectrum \mathcal{P}_ζ , d is the unit vector signaling the preferred direction, and $\hat{k} \equiv k/k$ is the unit vector along the wavevector k with modulus k . We distinguish between background anisotropy from statistical anisotropy, given that the latter is perturbative in origin. Observations from the Planck satellite suggests that g can be at most 0.97 (Ade et al., 2016), which represents a very tight constraint on the contribution of vector fields to the power spectrum of the CMB. Nevertheless, if the isotropy of the expansion is approximately preserved, vector fields could even be responsible for inflation (Golovnev, Mukhanov, & Vanchurin, 2008.; Golovnev & Vanchurin, 2009; Golovnev, 2010, 2011; Emami, Mukohyama, Namba, & Zhang, 2017). The requirement in this case is to have either a large number (typically in the hundredths) of randomly oriented vector fields so that they collectively generate a nearly isotropic expansion, or consider three mutually orthogonal vector fields with equal vev (Golovnev et al., 2008.). It is also possible to retain an isotropic inflationary expansion by considering the dynamics of gauge vector fields. This is the case of gaugeflation

(Maleknejad et al., 2013; Maleknejad & Sheikh-Jabbari, 2011, 2013; Nieto & Rodríguez, 2016; Rodríguez & Navarro, 2018; Adshead & Sfakianakis, 2017), in which a nonabelian gauge field minimally coupled to gravity plays the role of the inflaton. In this proposal, an $SU(2)$ gauge field is considered to form a triad of mutually orthogonal vectors, which in turn allows the gauge field to drive inflation without giving rise to an anisotropic expansion.

An interesting manner to break the conformal invariance is by considering a non-minimally coupled vector field, thus resulting in a modification of gravity (Dimopoulos & Karciuskas, 2008; Golovnev et al., 2008.; Golovnev & Vanchurin, 2009; Golovnev, 2010). Unfortunately, the non-minimal coupling to gravity is known to be problematic due to the emergence of instabilities (Himmotoglu, Contaldi, & Peloso, 2009b, 2009c, 2009a). Although the existence of these problems represents a serious drawback for the consistency of the theory, the very nature of the instabilities has been called into question, and a number of scenarios have been envisaged to evade them (Karciuskas & Lyth, 2010). In this paper, we examine a cosmological vector field non-minimally coupled to gravity through the Gauss-Bonnet invariant. Although couplings between the Gauss-Bonnet invariant and scalar fields have been explored in the context of inflationary cosmology (Tsujikawa, Sami, & Maartens, 2004; Carter & Neupane, 2006.; Satoh & Soda, 2008; Guo & Schwarz, 2009; Sadeghi, Setare, & Banijamali, 2009; Guo & Schwarz, 2010; Satoh, 2010; Jiang, Hu, & Guo, 2013; Nozari & Rashidi, 2013; Koh, Lee, Lee, & Tumurtushaa, 2014; Okada & Okada, 2016; Kanti, Gannouji, & Dadhich, 2015; van de Bruck & Longden, 2016; van de Bruck, Dimopoulos, & Longden, 2016; Koh, Lee, & Tumurtushaa, 2017; Mathew & Shankaranarayanan, 2016; van de Bruck, Dimopoulos, Longden, & Owen, 2017; Fomin & Chervon, 2017; Yi, Gong, & Sabir, 2018; Granda & Jimenez, 2019b, 2019a; Jimenez, Granda, & Elizalde, 2019; Kleidis & Oikonomou, 2019; Fomin, 2020; Pozdeeva, 2020; Rashidi & Nozari, 2020), the coupling with a massive vector field has not been sufficiently explored in the literature (Oliveros, 2017). Non-minimal couplings of the electromagnetic field to gravity, in particular to the Gauss-Bonnet invariant, have been considered as a mechanism to generate large-scale magnetic fields during inflation (Sadeghi et al., 2009; Bamba & Odintsov, 2008). Arguably, this is due to the very presence of instabilities in relatively simple settings, as in the case of a non-minimal coupling to the Ricci scalar, which then invites to exercise caution when considering more complicated non-minimal couplings. Nevertheless, the reason for us to invoke such a coupling owes to the peculiar behavior of the Gauss-Bonnet invariant. Indeed, a very crucial feature is that it changes its sign when passing from inflation to a matter or radiation dominated phase. Consequently, a mass term for the vector field, coming from this coupling, features the same change of sign towards the end of inflation. In the vector curvaton scenario (Dimopoulos, 2006), a negative mass-squared is required for the vector field to generate a nearly flat power spectrum, while a positive mass-squared is required for the vector field engages into quick oscillations after inflation, in order to avoid the generation of large background anisotropies if the vector field dominates the Universe. However, a clear mechanism producing this change of sign is not provided, and thus it has to be assumed (Dimopoulos, 2006). In this regard, the goal of this paper is to investigate whether a vector field coupled to this topological term can contribute significantly to the total energy density after inflation, thus being able to play the role of a curvaton. Two key assumptions are made in order to keep the isotropy in the expansion: *i*) the vector field is subdominant during inflation (Dimopoulos, 2006) and *ii*) after inflation the vector field conduct itself as a pressureless matter (Dimopoulos, 2006). These assumptions allow us to safely use an isotropic and homogeneous spacetime, i.e. the Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) metric.

The paper is organized as follows. In Sec. , we clarify our position with respect to the instability of the theory. The Lagrangian density for a vector field coupled to the Gauss-Bonnet invariant is introduced in Sec. . In Sec. , we compute the perturbation spectrum

and the anisotropy parameter g . Section is devoted to study the dynamics of the vector field during and after inflation. In Sec. , we study the evolution of the energy density and show that the condensate of an oscillating heavy vector field behaves like a pressureless fluid. It means that the vector does not generate large background anisotropies, fulfilling the requirements to be a suitable curvaton field. Finally, we present our conclusions in Sec. .

On the instability of non-minimally coupled vector fields

An issue of fundamental importance concerning theories of massive vector fields non-minimally coupled to gravity is their instability (Karciauskas & Lyth, 2010; Himmetoglu et al., 2009b, 2009c, 2009a), which originates from the longitudinal mode of the vector field. One of the known instabilities is perturbative in origin and arises when the effective mass squared of the vector field changes its sign from negative to positive (Himmetoglu et al., 2009b, 2009c, 2009a). In the scenario studied in Refs. (Dimopoulos et al., 2009; Karciauskas & Lyth, 2010), it was shown in Ref. (Dimopoulos et al., 2009) that the instability is under control during inflation. However, the instability arises at some later epoch, when the field's effective mass squared crosses zero. In spite of this difficulty, the authors in (Karciauskas & Lyth, 2010) go on to argue that even if such instability exists, it still might be possible to avoid it if the bare mass of the vector field stems from the coupling to another field, which then would allow either a curvaton or an inhomogeneous reheating mechanism. To the best of our knowledge, the debate on this issue is not yet settled, and hence our attitude towards it will be the same as in Ref. (Karciauskas & Lyth, 2010), thus simply ignoring the instability or assuming that, if present, it can be circumvented by some mechanism. Although this attitude conveniently dispenses with the problem, it is also fair to say that such instability arises when the longitudinal mode becomes unphysical, and hence it is reasonable to suspect that the associated singularity might share the same unphysical nature.

Apart from the above, yet another problem plagues this kind of vector field models, the so-called *ghost instability*. It originates because, during inflation, the kinetic energy density for the longitudinal modes of the vector field have the *wrong* sign, which might entail the copious production of vector field quanta up to the point of ruining inflation. Regarding this instability, the authors in Ref. (Karciauskas & Lyth, 2010) argue that as long as the negative energy contributed by ghost states does not exceed the energy density driving inflation, these are in principle not problematic for the stability of the theory. In the following, we implicitly assume that this is indeed the case.

Vector field coupled to the Gauss-Bonnet invariant

We consider a massive vector field coupled to the Gauss-Bonnet invariant and evolving in an inflationary background, which we take to be quasi-de Sitter and driven by an unspecified matter source. The action of the system is

$$\mathcal{L} \equiv \mathcal{L}_{\text{EH}} + \mathcal{L}_{\text{inf}} + \mathcal{L}_A + \mathcal{L}_g, \quad (2)$$

with

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{EH}} &\equiv -\frac{m_{\text{P}}^2}{2}R, \quad \mathcal{L}_A \equiv -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}\tilde{m}^2 A_\mu A^\mu, \\ \mathcal{L}_g &\equiv \frac{1}{2}\alpha \mathcal{G} A_\mu A^\mu, \end{aligned} \quad (3)$$

where, m_{P} is the reduced Planck mass, R is the Ricci scalar, $F_{\mu\nu} \equiv \nabla_\mu A_\nu - \nabla_\nu A_\mu$ is the strength tensor associated to the vector field A_μ with bare mass \tilde{m} , $\mathcal{G} \equiv R^2 - 4R_{\alpha\beta}R^{\alpha\beta} +$

$R_{\alpha\beta\gamma\delta}R^{\alpha\beta\gamma\delta}$ is the Gauss-Bonnet topological invariant with coupling strength α whose dimensions are $[\alpha] = m_p^{-2}$, and $R_{\mu\nu}$, $R_{\mu\nu\rho\sigma}$ are the Ricci tensor and the Riemann tensor, respectively. \mathcal{L}_{inf} is the Lagrangian density for the energy content responsible for the inflationary period. The effective mass squared of the vector field is defined as

$$m^2 \equiv \tilde{m}^2 + \alpha \mathcal{G}. \tag{4}$$

Greek indices run from 0 to 3 and denote spacetime coordinates. Latin indices run from 1 to 3 and denote spatial components. In the case of the FLRW metric $ds^2 = dt^2 - a^2(t)dx^2$, where $a(t)$ is the scale factor and x are the Cartesian spatial coordinates, the Gauss-Bonnet invariant reads

$$\mathcal{G} = 24H^2(\dot{H} + H^2), \tag{5}$$

where $H = \dot{a}/a$ is the Hubble parameter, and the overdot denotes a derivative with respect to the cosmic time t .

Perturbation spectrum

Having clarified our position with respect to the instability of the theory, we investigate the conditions for which the vector field obtains a nearly scale-invariant spectrum of superhorizon perturbations. The equation of motion for the vector field, which is obtained by varying the action of the Lagrangian in Eq. (2) with respect to A_ν , is

$$\nabla_\mu F^{\mu\nu} + m^2 A^\nu = 0. \tag{6}$$

Assuming that inflation homogenizes the vector field; i.e. $\partial_t A_\mu = 0$, it is easy to show that its temporal component, A_t , must be zero, while the spatial components A^i obey (See Appendix for the details of the calculations.)

$$\ddot{A}^i + H\dot{A}^i + m^2 A^i = 0. \tag{7}$$

Now, we perturb the vector field in the following way:

$$A_i(t, x) \equiv A_i(t) + \delta A_i(t, x), \quad A_t(t, x) = \delta A_t(t, x), \tag{8}$$

and write the equations of motion for transverse ($\delta \mathcal{A}_\perp^i$) and longitudinal ($\delta \mathcal{A}_\parallel^i$) modes as follows (see Appendix),

$$\left[\partial_t^2 + H\partial_t + m^2 + \left(\frac{k}{a}\right)^2 \right] \delta \mathcal{A}_\perp^i = 0, \tag{9}$$

$$\left[\partial_t^2 + \left(1 + \frac{2k^2}{k^2 + (am)^2}\right) H\partial_t + m^2 + \left(\frac{k}{a}\right)^2 \right] \delta \mathcal{A}_\parallel^i = 0, \tag{10}$$

where $\delta \mathcal{A}^i$ are the Fourier modes of δA^i . In the above equations, we used the fact that m^2 is a constant during inflation since $\dot{H} \simeq 0$ and therefore $\mathcal{G} \approx 24H^4$.

In order to quantize the field, we introduce creation/annihilation \hat{a}^\dagger/\hat{a} operators for each polarization mode

$$\begin{aligned} \delta \mathcal{A}^j(t, x) \equiv & \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \sum_\lambda [e^{j_\lambda(\hat{k})} \hat{a}_\lambda(k) z_\lambda(t, k) e^{-ik \cdot x} \\ & + e^{j_\lambda^*(\hat{k})} \hat{a}_\lambda^\dagger(k) z_\lambda^*(t, k) e^{ik \cdot x}], \end{aligned} \tag{11}$$

where $\lambda = L, R$ labels the left and right transverse polarizations and $\lambda = ||$ the longitudinal polarization. Choosing the k -direction along the z -axis, the polarization vectors e_λ can be written as

$$e_L = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, i, 0), \quad e_R = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -i, 0), \quad e_{||} = (0, 0, 1), \quad (12)$$

while the commutation rules are

$$[\hat{a}_\lambda(k), \hat{a}_{\lambda'}^\dagger(k')] = (2\pi)^3 \delta(k - k') \delta_{\lambda\lambda'}. \quad (13)$$

With all the above, the power spectrum for the λ -polarized modes z_λ is defined by

$$\mathcal{P}_\lambda^z(k) = \lim_{k/aH \rightarrow 0} \frac{k^3 ||z_\lambda||^2}{2\pi^2}. \quad (14)$$

In the following subsections we study each polarization individually.

Transverse modes

Defining the physical transverse modes as $b_{L,R} \equiv z_{L,R}/a$ and using the conformal time $d\eta \equiv dt/a$, the evolution equation (9) is rewritten as

$$[\partial_\eta^2 + 2\mathcal{H} \partial_\eta + 2\mathcal{H}^2 + (am)^2 + k^2] b_{L,R} = 0, \quad (15)$$

with $\mathcal{H} \equiv aH$ being the Hubble parameter in conformal time. This equation can be recast in the form of a Bessel equation whose solution is given in terms of the Hankel functions H_ν as

$$b_{L,R}(\eta, k) = C_k a^{-1} \sqrt{-\eta} H_\nu(-k\eta), \quad (16)$$

where

$$\nu^2 \equiv \frac{1}{4} - \frac{\tilde{m}^2 + \alpha\mathcal{G}}{H^2} = \frac{1}{4} - \frac{m^2}{H^2}. \quad (17)$$

The constant C_k can be found by matching Eq. (16) with the Bunch-Davies vacuum at early times (when $-k\eta \rightarrow \infty$), obtaining

$$C_k = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \Rightarrow b_{L,R}(\eta, k) \approx \frac{1}{a\sqrt{2k}} e^{-ik\eta}. \quad (18)$$

As expected, the modes behave as those for an oscillator. Now, we are interested in the late time behaviour (when $-k\eta \rightarrow 0$) of the physical modes. In this regime, the dominant contribution of the solution in Eq. (16) is

$$b_{L,R}(k) \propto k^{-\nu}. \quad (19)$$

Replacing the later expression in the power spectrum defined in Eq. (14), we obtain

$$\mathcal{P}_{L,R} \equiv \frac{\mathcal{P}_{L,R}^z}{a^2} \propto k^{3-2\nu}, \quad (20)$$

which corresponds to the scale dependance of the power spectrum of the physical vector field perturbations. The spectral index is written as

$$n_{L,R} - 1 \equiv \frac{d \ln \mathcal{P}_{L,R}}{d \ln k} = 3 - 2\nu. \quad (21)$$

From Eqs. (17) and (21) it is clear that the physical vector field can attain a nearly flat power spectrum if and only if $m^2 \approx -2H^2$. Consequently, the coupling α must satisfy $\tilde{m}^2 + 24\alpha H^4 \approx -2H^2$. Moreover, if $\tilde{m} \ll H$, the condition for scale-invariance becomes

$$\alpha H^2 \approx -\frac{1}{12}. \quad (22)$$

This result must be compared to the one in Refs. (**Dimopoulos & Karciauskas**, 2008; **Himmetoglu et al.**, 2009a) where, instead of coupling the vector field to the Gauss-Bonnet invariant, the authors couple the vector field to the Ricci scalar, i.e. $\alpha R A_\mu A^\mu$. In Refs. (**Dimopoulos & Karciauskas**, 2008; **Himmetoglu et al.**, 2009a), it was shown that if the coupling constant is exactly $1/6$ the power spectrum is perfectly flat, besides, the spectrum of each transverse mode is precisely the same as that for a scalar field. Finally, it is important to mention that the requirement $m^2 \approx -2H^2$ is precisely one of the possibilities discussed in (**Karciauskas & Lyth**, 2010) to avoid the instabilities mentioned in Sec. .

Longitudinal modes

Equation (10) gives the evolution for the longitudinal modes z_{\parallel} , which, in terms of the conformal time, can be written as

$$\left[\partial_\eta^2 + \frac{2\mathcal{H}k^2}{k^2 + (am)^2} \partial_\eta + (am)^2 + k^2 \right] z_{\parallel} = 0. \tag{23}$$

Using the conditions $\tilde{m} = 0$ and $m^2 = -2H^2$ for a scale-invariant transverse power spectrum, and taking into account that the vacuum boundary condition is modified by

$$\lim_{-k\eta \rightarrow \infty} z_{\parallel} = \gamma \frac{1}{\sqrt{2k}} e^{-ik\eta}, \tag{24}$$

with $\gamma = \sqrt{(k/am)^2 + 1}$ the Lorentz boost factor which takes us from the frame with $k = 0$ to the frame of momentum $k \neq 0$, the solution of the above equation is (**Dimopoulos et al.**, 2009, 2010.b, 2010.a; **Dimopoulos**, 2012)

$$z_{\parallel} = \frac{\sqrt{-\eta}}{2} \left[-k\eta + \frac{2}{k\eta} + 2i \right] \frac{e^{-ik\eta}}{\sqrt{-k\eta}}, \tag{25}$$

which at late times ($-k\eta \rightarrow 0$) behaves as $\sqrt{-\eta}(-k\eta)^{-3/2}$. Replacing the latter in the power spectrum in Eq. (14) we get

$$\mathcal{P}_{\parallel}^z \approx 2a^2 \left(\frac{H}{2\pi} \right)^2, \tag{26}$$

where we used the approximation $H^2 \approx (a\eta)^{-2}$ which is valid during inflation for a quasi-de Sitter background. As in the transverse case, the physical longitudinal power spectrum \mathcal{P}_{\parallel} can be obtained by defining the physical longitudinal modes as $b_{\parallel} \equiv z_{\parallel}/a$.

Statistical anisotropy

It is known that vector fields introduce inherently a preferred direction and therefore they can introduce large statistical anisotropies in the perturbation spectrum. If this is the case, the model will be ruled out because it is in disagreement with the observational results. For this reason, by using the δN formalism (**Starobinsky**, 1985; **Sasaki & Stewart**, 1996; **Lyth, Malik, & Sasaki**, 2005; **Lyth & Rodriguez**, 2005.), in this section we compute the amount of statistical anisotropy in the spectrum, which is quantified in the parameter g defined in Eq. (1). We will show that g can be small enough to satisfy the observational bounds (**Ade et al.**, 2016).

According to the δN formalism, the curvature perturbation ζ is the difference of the number of e -folds N between uniform density and spatially flat slices of spacetime: $\zeta \equiv \delta N$. We will assume that N is function of the scalar field ϕ and the vector field: $N = N(\phi, A^\mu)$.

Then, the curvature perturbation can be written as (Dimopoulos, 2012)

$$\begin{aligned} \zeta &= N_\phi \delta\phi + N_A^i \delta A_i + \frac{1}{2} N_{\phi\phi} (\delta\phi)^2 \\ &+ \frac{1}{2} N_{\phi A}^i \delta\phi \delta A_i + \frac{1}{2} N_{AA}^{ij} \delta A_i \delta A_j + \dots, \end{aligned} \tag{27}$$

where $N_\phi \equiv \frac{\partial N}{\partial \phi}$, $N_A^i \equiv \frac{\partial N}{\partial A_i}$, $N_{\phi\phi} \equiv \frac{\partial^2 N}{\partial \phi^2}$, $N_{\phi A}^i \equiv \frac{\partial^2 N}{\partial \phi \partial A_i}$, $N_{AA}^{ij} \equiv \frac{\partial^2 N}{\partial A_i \partial A_j}$, $\delta\phi$ and δA_i are the perturbations of the scalar and vector field, respectively. From this result, the power spectrum of the curvature perturbation reads

$$\mathcal{P}_\zeta(k) = N_\phi^2 \mathcal{P}_\phi + N_A^2 [\mathcal{P}_+ + (\mathcal{P}_\parallel - \mathcal{P}_+) (\hat{d} \cdot k)^2], \tag{28}$$

where \mathcal{P}_ϕ denotes the power spectrum of the scalar field, we have defined the even and odd polarizations for the transverse spectra as $2\mathcal{P}_\pm \equiv \mathcal{P}_L \pm \mathcal{P}_R$, respectively. We have taken into account that our theory is parity conserving, i.e. $\mathcal{P}_R = \mathcal{P}_L$, and thus $\mathcal{P}_+ = \mathcal{P}_R$ and $\mathcal{P}_- = 0$. In the latter equation, we have also defined $N_A^2 \equiv \|N_A\|^2 \equiv N_A^i N_{Ai}$ and $\hat{d} \equiv N_A/N_A$, which defines the preferred direction signaled by the vector field. By comparing the above equation with Eq. (1), we identify the isotropic part of the spectrum as

$$\mathcal{P}_k^{\text{iso}}(k) = N_\phi^2 \mathcal{P}_\phi(k) + N_A^2 \mathcal{P}_+(k), \tag{29}$$

and hence the anisotropy parameter g can be written as

$$g = \beta \frac{\mathcal{P}_\parallel - \mathcal{P}_+}{\mathcal{P}_\phi + \beta \mathcal{P}_+}, \quad \beta \equiv \frac{N_A^2}{N_\phi^2}, \tag{30}$$

where β quantifies the relative contribution of the vector field over the scalar field to the modulation of N . Now, since the power spectra of the transverse solutions are nearly flat, they are given by $\mathcal{P}_{L,R} \approx (H/2\pi)^2$, and assuming that the potential of the scalar field is sufficiently flat during inflation, such that the power spectrum of the scalar field is also nearly flat at horizon exit (Lyth & Wands, 2002), i.e. $\mathcal{P}_\phi \approx (H/2\pi)^2$, we get

$$g \approx \frac{\beta}{1 + \beta} \approx \beta, \tag{31}$$

where we took into account that N is primarily modulated by the scalar field, since the vector field is subdominant during inflation, implying $\beta \ll 1$, then $g \approx \beta \ll 1$. This result agrees with the bounds given by Planck which suggest that g can be at most 0.97 (Ade et al., 2016).

Evolution of the vector field

In this section, we follow the evolution of the homogeneous vector field during and after inflation in order to determine if the vector field is able to play the role of a curvaton (Lyth & Wands, 2002; Dimopoulos, 2006).

Defining the physical components of the vector A^i as $B^i \equiv A^i/a$ and supposing, by simplicity, that $B_\mu = (0, 0, 0, B)$, the equation of motion (7) is rewritten as

$$\ddot{B} + 3H\dot{B} + (\dot{H} + 2H^2 + m^2)B = 0. \tag{32}$$

In the following, we solve this equation during and after inflation.

Evolution during inflation

As shown in section , the nearly scale-invariant spectrum of vector perturbations is obtained if the effective mass of the vector field is $m^2 \approx -2H^2$, which remains constant during inflation because $H \simeq \text{constant}$. Therefore, the solution of Eq. (32) during inflation is

$$B(t) = B_0 + B_1 a^{-3}, \tag{33}$$

where B_0 and B_1 are integration constants. The decaying mode in the solution in Eq. (33) is quickly diluted by inflation, thus the field is nearly constant given that $B \approx B_0$. This means that the vector field remains frozen and therefore it is not “erased” in the inflationary phase.

Evolution after inflation

The post-inflationary evolution of the vector field is also described by Eq. (32), but now H is time depending. Assuming that H evolves as

$$H(t) = \frac{2t^{-1}}{3(1+w)}, \tag{34}$$

where w is the equation of state parameter of the dominant fluid after inflation and that $\alpha H^2 = \gamma$, where γ is a constant (not necessarily the same required for a flat power spectrum), Eq. (32) can be recast in the following form

$$t^2 \ddot{B} + \frac{2t}{1+w} \dot{B} + [(\tilde{m}t)^2 - \tau^2] B = 0, \tag{35}$$

where

$$\tau^2 \equiv \frac{2(1+3w)}{3(1+w)^2} \left(8\gamma - \frac{1-3w}{3(1+3w)} \right). \tag{36}$$

We assume this condition for simplicity, and having in mind the condition in Eq. (22) which is valid during inflation. The general solution of the above equation is

$$B(t) = t^u [c_1 J_\nu(\tilde{m}t) + c_2 Y_\nu(\tilde{m}t)], \tag{37}$$

where

$$u \equiv \frac{w-1}{2(w+1)}, \quad \nu \equiv \frac{\sqrt{1+3w}}{6(1+w)} \sqrt{1+3w+192\gamma}, \tag{38}$$

c_1 and c_2 being constants of integration and J_ν and Y_ν being the Bessel functions of first and second kind, respectively. This solution should be contrasted with the solution for the equation of motion of a vector field non-minimally coupled to the Ricci scalar. In Ref. (Dimopoulos & Karciauskas, 2008), it was shown that, since this coupling is negligible after inflation if a radiation dominated period follows after the inflationary phase, since $R \approx 0$ for an equation of state $w \approx 1/3$, the vector field behaves as a massive minimally-coupled abelian vector. In contrast, in our model, the Gauss-Bonnet coupling contributes to the effective mass after inflation as well. This dependence is very important because, since the Gauss-Bonnet invariant changes its sign when passing from inflation to a matter or radiation dominated phase, naturally entails the change of sign of the vector mass. In Refs. (Dimopoulos, 2006; Dimopoulos & Karciauskas, 2008; Dimopoulos et al., 2010.b), it was shown that a vector field with positive mass after inflation can engage into quick oscillations, avoiding the generation of large-scale anisotropies. However, this sign change has to be assumed since a mechanism provoking this feature is not presented.

Now, we consider two possible approximations of the solution (37) regarding the dependence of the Bessel functions with respect to the bare mass \tilde{m} of the vector field. Firstly, we

assume that the vector field is “light”, i.e. $\tilde{m}t \rightarrow 0$. Hence the solution (37) is approximated by

$$B(t) \approx \tilde{c}_1 a^{3(1+w)(u+v)/2} + \tilde{c}_2 a^{3(1+w)(u-v)/2}, \quad (39)$$

where \tilde{c}_1 and \tilde{c}_2 are constants. The latter solution means that the evolution of the light vector field is described by a power law for the scale factor. On the other hand, for a “heavy” vector field we take the limit of Eq. (37) when $\tilde{m}t \rightarrow \infty$ obtaining

$$B(t) \approx a^{-3/2} [b_1 \cos(\tilde{m}t - \varphi) + b_2 \sin(\tilde{m}t - \varphi)], \quad (40)$$

where b_1 and b_2 are constants. This solution shows that a heavy vector field oscillates with phase φ (which is a function of v) and envelope decreasing as

$$B(t) \propto a^{-3/2}. \quad (41)$$

This shows that the vector field performs rapid oscillations, hence its dynamical behavior is effectively characterized by the envelope.

Evolution of the energy density

In the last section, we showed that the vector field has a constant magnitude during inflation. After inflation, it follows either a power law or an oscillatory motion depending whether it is light or heavy, respectively. However, if the vector field is to have a chance to imprint its perturbation spectrum at late times, it must nearly dominate the universe after inflation, according to the curvaton scenario (Lyth & Wands, 2002). Therefore, it is necessary to follow the evolution of its energy density.

Varying the corresponding action for the Lagrangian in Eq. (2) with respect to the metric $g_{\mu\nu}$, it follows that (Carter & Neupane, 2006.; Nojiri, Odintsov, & Sasaki, 2005):

$$\frac{\delta \mathcal{L}_{EH}}{\delta g_{\mu\nu}} + \frac{\delta \mathcal{L}_{inf}}{\delta g_{\mu\nu}} + \frac{\delta \mathcal{L}_A}{\delta g_{\mu\nu}} + \frac{\delta \mathcal{L}_g}{\delta g_{\mu\nu}} = 0, \quad (42)$$

where

$$\frac{\delta \mathcal{L}_{EH}}{\delta g_{\mu\nu}} = -\frac{m_p^2}{2} \left(-R^{\mu\nu} + \frac{1}{2} g^{\mu\nu} R \right), \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta \mathcal{L}_A}{\delta g_{\mu\nu}} &= -\frac{1}{8} g^{\mu\nu} F_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta} + \frac{1}{2} F^{\mu\rho} F^\nu{}_\rho \\ &\quad - \frac{1}{2} \tilde{m}^2 \left(A^\mu A^\nu - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} A^\sigma A_\sigma \right), \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta \mathcal{L}_g}{\delta g_{\mu\nu}} &= -\frac{1}{2} \alpha \mathcal{G} A^\mu A^\nu + \frac{1}{2} g^{\mu\nu} f \mathcal{G} - 2f R R^{\mu\nu} \\ &\quad + 2\nabla^\mu \nabla^\nu (fR) - 2g^{\mu\nu} \square (fR) + 8f R^\mu{}_\rho R^{\nu\rho} \\ &\quad - 4\nabla_\rho \nabla^\mu (fR^{\nu\rho}) - 4\nabla_\rho \nabla^\nu (fR^{\mu\rho}) + 4\square (fR^{\mu\nu}) \\ &\quad + 4g^{\mu\nu} \nabla_\rho \nabla_\sigma (fR^{\rho\sigma}) - 2f R^{\mu\rho\sigma\tau} R^\nu{}_{\rho\sigma\tau} \\ &\quad + 4\nabla_\rho \nabla_\sigma (fR^{\mu\rho\sigma\nu}), \end{aligned} \quad (45)$$

and $f \equiv \frac{1}{2} \alpha A_\mu A^\mu$. Using the FLRW metric, the “00” component of Eq. (42) can be written as $3m_p^2 H^2 = \rho_{inf} + \rho_B$, where ρ_{inf} is the energy density of the source driving inflation and

$$\begin{aligned} \rho_B &= \frac{1}{2} \dot{B}^2 + \frac{1}{2} \left[\tilde{m}^2 + H^2 \left(1 + 2 \frac{\dot{B}}{BH} \right) \right] B^2 \\ &\quad + 24\alpha H^4 B^2 \left(\frac{\dot{B}}{HB} + \frac{\dot{\alpha}}{2\alpha H} \right), \end{aligned} \quad (46)$$

is the energy density of the physical vector field $B_\mu = (0, 0, 0, B)$. This is to be compared with the energy density $\rho_B = \frac{1}{2}B^2 + \frac{1}{2}\tilde{m}^2 B^2$ of a vector field non-minimally coupled to gravity through the Ricci scalar (Dimopoulos & Karciuskas, 2008; Karciuskas & Lyth, 2010; Golovnev et al., 2008.; Golovnev & Vanchurin, 2009; Golovnev, 2010). In our case, the energy density of the vector field has an extra term coming from the coupling with the Gauss-Bonnet invariant.

During inflation, Eq. (46) gives

$$\rho_B \simeq \frac{1}{2}H^2 B^2 \simeq \text{const.}, \tag{47}$$

where we used the fact that $\tilde{m} \ll H$ and B, H and α are nearly constants. We can see that the energy density of the vector field is not diluted by inflation since it remains almost constant.

In order to avoid anisotropic expansion after inflation, the contribution to the energy tensor coming from the vector field must not introduce anisotropic pressures. This can be achieved if the vector field condensate behaves as a pressureless matter, i.e. $\rho_B \propto a^{-3}$ (Dimopoulos, 2006). In this section we investigate the available parameter space for the constant γ that allows this behavior in a radiation dominated universe characterized by $w \approx 1/3$. Before to continue our discussion, we want to point out the following. During inflation, the Gauss-Bonnet term is positive and it can be approximated by $\mathcal{G} \approx 24H^4$. On the other hand, in order to get a nearly flat power spectrum for the transverse modes we have $\alpha H^2 \approx -1/12$, and therefore $\alpha < 0$. After inflation, when the Hubble parameter $H(t)$ is given by Eq. (34), the Gauss-Bonnet invariant is given by

$$\mathcal{G} = -\frac{64}{27} \frac{1+3w}{t^4(1+w)}. \tag{48}$$

So, the Gauss-Bonnet invariant is negative if $w > -1/3$ (eg. a matter ($w = 0$) or a radiation ($w = 1/3$) fluid). This implies $\gamma < 0$ and a change in the sign of the effective mass, $m^2 = \tilde{m}^2 + \alpha\mathcal{G}$, from negative, during inflation, to positive, after inflation. As explained in (Dimopoulos, 2006), a minimally-coupled vector plays the role of a curvaton if it has a negative mass-squared (explicitly $m^2 \approx -2H^2$) during inflation. After inflation, the mass-squared has to become positive so that the vector field engages into oscillations and thus avoiding the production of large background anisotropy. As we show, in our model, this change of sign is tacitly provided by the “evolution” of the Gauss-Bonnet invariant.

Regarding a light field, we showed in Sec. that the dynamics of the vector field is described as a power law in the scale factor (see Eq. (39)). The power is given in terms of the equation of state parameter w and the constant γ . Then, replacing Eqs. (34) and (39) in Eq. (46), and considering that the dominant fluid after inflation can be either a stiff fluid ($w = 1$) or a radiation fluid ($w = 1/3$), one can realize that is impossible to satisfy the condition that $\gamma < 0$ and the condition that the density of the vector field scales as pressureless matter, so we discard the light field solution.

For a heavy field, we showed that it is oscillating with decreasing envelope as $a^{-3/2}$. Following Ref. (Dimopoulos, 2006), the period of oscillations is much smaller than the Hubble time, which means that the effective behaviour of the vector field is given by its envelope. Therefore, replacing Eq. (41) in the density in Eq. (46) we get the average density over many oscillations as

$$\rho_B = B_0^2 \left(\frac{1}{32} + 3\gamma \right) a^{-7} + \frac{1}{2} \tilde{m}^2 B_0^2 a^{-3}, \tag{49}$$

where B_0 is the constant of proportionality implicit in Eq. (41). The first term in Eq. (49) goes as a^{-7} , so it decays faster than the radiation dominant fluid (which decays as a^{-4}) and even faster than the second term. This means that $\rho_B \propto a^{-3}$. The fact that the

average energy density decays as a^{-3} implies two important things: *i*) the vector field may eventually dominate the Universe and imprint its perturbation spectrum, and *ii*) the average energy density of the vector field scales as pressureless matter, so the average pressure is zero and therefore there is no generation of large background anisotropy.

Conclusions

In this paper, we have examined the evolution of a cosmological vector field coupled to the Gauss-Bonnet invariant. Assuming that $\tilde{m} \ll H$, we found that, in order to get a nearly flat power spectrum for the transverse modes during inflation, the coupling α must satisfy the condition $\alpha H^2 \approx -1/12$. This implies that the power spectrum for the longitudinal modes is $\mathcal{P}_{\parallel} = 2\mathcal{P}_{L,R}$. Consequently, we showed that the amount of statistical anisotropy in our model, quantified by the parameter g , is within the observational bounds, given that the vector field is subdominant during inflation. We also found that the vector field remains constant during the inflationary phase, but it performs rapid oscillations after that whenever $\tilde{m} \gg H$. Averaging over many oscillations, the vector field effectively decays as $a^{-3/2}$, which means that the average energy density, ρ_B , decays as a^{-3} , so, after inflation, the vector field behaves like a pressureless fluid. This indicates that the vector field has a chance to nearly dominate the universe after inflation, without introducing large background anisotropy, and thus be able to imprint its curvature perturbation.

According to the vector curvaton scenario, the mass of the vector must be negative during inflation and positive after that. In our model, this feature is provided by the particular behavior of the Gauss-Bonnet invariant because it changes its sign when passing from inflation to a matter or radiation dominated epoch. Therefore, we conclude that this non-minimal coupling between a vector field and the Gauss-Bonnet invariant can be a reliable and realistic vector curvaton model.

Acknowledgments

This work was supported by COLCIENCIAS Grant 110671250405 and Vicerrectoría de Investigaciones (Univalle) grant 71220. CAV-T thanks Yeinzon Rodríguez for directing our attention to this work.

Supplementary information

Appendix. In this appendix we outline some details of the computation the power spectrum of the transverse and longitudinal modes. See the appendix in <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1146/2976>

Contribution of the authors

Each author contributed equally to the work

Conflict of interests

The authors declare that they have no conflict of interest with respect to the content of this article.

References

Ackerman, L., Carroll, S. M., & Wise, M. B. (2007). Imprints of a Primordial Preferred Direction on the Microwave Background. *Phys.Rev.*, **D75**(), 083502. doi: 10.1103/PhysRevD.75.083502,10.1103/PhysRevD.80.069901

- Ade, P. A. R., et al.** (2016). Planck 2015 results. XVI. Isotropy and statistics of the CMB. *Astron. Astrophys.*, **594**(), A16. doi: 10.1051/0004-6361/201526681
- Adshead, P., & Sfakianakis, E. I.** (2017). Higgsed Gauge-flation. *JHEP*, **08**(), 130. doi: 10.1007/JHEP08(2017)130
- Aghanim, N., et al.** (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astron. Astrophys.*, **641**(), A6. doi: 10.1051/0004-6361/201833910
- Akrami, Y., et al.** (2020a). Planck 2018 results. IX. Constraints on primordial non-Gaussianity. *Astron. Astrophys.*, **641**(), A9. doi: 10.1051/0004-6361/201935891
- Akrami, Y., et al.** (2020b). Planck 2018 results. VII. Isotropy and Statistics of the CMB. *Astron. Astrophys.*, **641**(), A7. doi: 10.1051/0004-6361/201935201
- Akrami, Y., et al.** (2020c). Planck 2018 results. X. Constraints on inflation. *Astron. Astrophys.*, **641**(), A10. doi: 10.1051/0004-6361/201833887
- Bamba, K., & Odintsov, S. D.** (2008). Inflation and late-time cosmic acceleration in non-minimal Maxwell- $F(R)$ gravity and the generation of large-scale magnetic fields. *JCAP*, **0804**(), 024. doi: 10.1088/1475-7516/2008/04/024
- Bennett, C., Hill, R., Hinshaw, G., Larson, D., Smith, K., et al.** (2011). Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Are There Cosmic Microwave Background Anomalies? *Astrophys.J.Suppl.*, **192**(), 17. doi: 10.1088/0067-0049/192/2/17
- Bennett, C. L., et al.** (2013). Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results. *Astrophys.J.Suppl.Ser.*, **208**(), 20. doi: 10.1088/0067-0049/208/2/20
- Carter, B. M., & Neupane, I. P.** (2006.). Towards inflation and dark energy cosmologies from modified Gauss-Bonnet theory. *JCAP*, **0606**(), 004. doi: 10.1088/1475-7516/2006/06/004
- De Felice, A., Heisenberg, L., Kase, R., Mukohyama, S., Tsujikawa, S., & Zhang, Y.-I.** (2016). Cosmology in generalized Proca theories. *JCAP*, **06**(), 048. doi: 10.1088/1475-7516/2016/06/048
- Dimastrogiovanni, E., Bartolo, N., Matarrese, S., & Riotto, A.** (2010). Non-Gaussianity and Statistical Anisotropy from Vector Field Populated Inflationary Models. *Adv.Astron.*, **2010**(), 752670. doi: 10.1155/2010/752670
- Dimopoulos, K.** (2006). Can a vector field be responsible for the curvature perturbation in the Universe? *Phys.Rev.*, **D74**(), 083502. doi: 10.1103/PhysRevD.74.083502
- Dimopoulos, K.** (2012). Statistical Anisotropy and the Vector Curvaton Paradigm. *Int.J.Mod.Phys.*, **D21**(), 1250023. doi: 10.1142/S021827181250023X,10.1142/S0218271812920034
- Dimopoulos, K., & Karciauskas, M.** (2008). Non-minimally coupled vector curvaton. *JHEP*, **0807**(), 119. doi: 10.1088/1126-6708/2008/07/119
- Dimopoulos, K., Karciauskas, M., Lyth, D. H., & Rodriguez, Y.** (2009). Statistical anisotropy of the curvature perturbation from vector field perturbations. *JCAP*, **0905**(), 013. doi: 10.1088/1475-7516/2009/05/013
- Dimopoulos, K., Karciauskas, M., & Wagstaff, J. M.** (2010.a). Vector Curvaton without Instabilities. *Phys.Lett.*, **B683**(), 298-301. doi: 10.1016/j.physletb.2009.12.024
- Dimopoulos, K., Karciauskas, M., & Wagstaff, J. M.** (2010.b). Vector Curvaton with varying Kinetic Function. *Phys.Rev.*, **D81**(), 023522. doi: 10.1103/PhysRevD.81.023522
- Emami, R., Mukohyama, S., Namba, R., & Zhang, Y.-I.** (2017). Stable solutions of inflation driven by vector fields. *JCAP*, **03**(), 058. doi: 10.1088/1475-7516/2017/03/058
- Fomin, I.** (2020). Gauss-Bonnet term corrections in scalar field cosmology. *arXiv:2004.08065 [gr-qc]*(), .
- Fomin, I., & Chervon, S. V.** (2017). A new approach to exact solutions construction in scalar cosmology with a Gauss-Bonnet term. *Mod. Phys. Lett. A*, **32**(25), 1750129.

doi: 10.1142/S0217732317501292

- Golovnev, A.** (2010). Linear perturbations in vector inflation and stability issues. *Phys.Rev., D81*(), 023514. doi: 10.1103/PhysRevD.81.023514
- Golovnev, A.** (2011). On cosmic inflation in vector field theories. *Class. Quant. Grav., 28*(), 245018. doi: 10.1088/0264-9381/28/24/245018
- Golovnev, A., Mukhanov, V. F., & Vanchurin, V.** (2008.). Vector Inflation. *JCAP, 0806*(), 009. doi: 10.1088/1475-7516/2008/06/009
- Golovnev, A., & Vanchurin, V.** (2009). Cosmological perturbations from vector inflation. *Phys.Rev., D79*(), 103524. doi: 10.1103/PhysRevD.79.103524
- Granda, L., & Jimenez, D.** (2019a). Higgs Inflation with linear and quadratic curvature corrections. *arXiv: 1910.11289 [gr-qc]*,(), .
- Granda, L., & Jimenez, D.** (2019b). Slow-Roll Inflation with Exponential Potential in Scalar-Tensor Models. *Eur. Phys. J. C, 79*(9), 772. doi: 10.1140/epjc/s10052-019-7289-z
- Guo, Z.-K., & Schwarz, D. J.** (2009). Power spectra from an inflaton coupled to the Gauss-Bonnet term. *Phys.Rev., D80*(), 063523. doi: 10.1103/PhysRevD.80.063523
- Guo, Z.-K., & Schwarz, D. J.** (2010). Slow-roll inflation with a Gauss-Bonnet correction. *Phys.Rev., D81*(), 123520. doi: 10.1103/PhysRevD.81.123520
- Heisenberg, L.** (2019). A systematic approach to generalisations of General Relativity and their cosmological implications. *Phys. Rept., 796*(), 1–113. doi: 10.1016/j.physrep.2018.11.006
- Heisenberg, L., Kase, R., & Tsujikawa, S.** (2016). Anisotropic cosmological solutions in massive vector theories. *JCAP, 11*(), 008. doi: 10.1088/1475-7516/2016/11/008
- Heisenberg, L., Kase, R., & Tsujikawa, S.** (2018). Cosmology in scalar-vector-tensor theories. *Phys. Rev. D, 98*(2), 024038. doi: 10.1103/PhysRevD.98.024038
- Himmetoglu, B., Contaldi, C. R., & Peloso, M.** (2009a). Ghost instabilities of cosmological models with vector fields nonminimally coupled to the curvature. *Phys.Rev., D80*(), 123530. doi: 10.1103/PhysRevD.80.123530
- Himmetoglu, B., Contaldi, C. R., & Peloso, M.** (2009b). Instability of anisotropic cosmological solutions supported by vector fields. *Phys.Rev.Lett., 102*(), 111301. doi: 10.1103/PhysRevLett.102.111301
- Himmetoglu, B., Contaldi, C. R., & Peloso, M.** (2009c). Instability of the ACW model, and problems with massive vectors during inflation. *Phys.Rev., D79*(), 063517. doi: 10.1103/PhysRevD.79.063517
- Hinshaw, G., et al.** (2013). Nine-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results. *Astrophys.J.Suppl., 208*(), 19. doi: 10.1088/0067-0049/208/2/19
- Jiang, P.-X., Hu, J.-W., & Guo, Z.-K.** (2013). Inflation coupled to a Gauss-Bonnet term. *Phys.Rev., D88*(), 123508. doi: 10.1103/PhysRevD.88.123508
- Jimenez, D., Granda, L., & Elizalde, E.** (2019). Cosmology in a model with Lagrange multiplier, Gauss-Bonnet and nonminimal kinetic couplings. *Int. J. Mod. Phys. D, 28*(15), 1950171. doi: 10.1142/S0218271819501712
- Kanti, P., Gannouji, R., & Dadhich, N.** (2015). Gauss-Bonnet Inflation. *Phys. Rev., D92*(4), 041302. doi: 10.1103/PhysRevD.92.041302
- Karciuskas, M., & Lyth, D. H.** (2010). On the health of a vector field with $(RA^2)/6$ coupling to gravity. *JCAP, 1011*(), 023. doi: 10.1088/1475-7516/2010/11/023
- Kleidis, K., & Oikonomou, V.** (2019). A Study of an Einstein Gauss-Bonnet Quintessential Inflationary Model. *Nucl. Phys. B, 948*(), 114765. doi: 10.1016/j.nuclphysb.2019.114765
- Koh, S., Lee, B.-H., Lee, W., & Tumurtushaa, G.** (2014). Observational constraints on slow-roll inflation coupled to a Gauss-Bonnet term. *Phys. Rev. D, 90*(6), 063527. doi: 10.1103/PhysRevD.90.063527

- Koh, S., Lee, B.-H., & Tumurtushaa, G.** (2017). Reconstruction of the Scalar Field Potential in Inflationary Models with a Gauss-Bonnet term. *Phys. Rev. D*, **95**(12), 123509. doi: 10.1103/PhysRevD.95.123509
- Komatsu, E., et al.** (2011). Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Interpretation. *Astrophys.J.Suppl.*, **192**(), 18. doi: 10.1088/0067-0049/192/2/18
- Lyth, D. H., Malik, K. A., & Sasaki, M.** (2005). A General proof of the conservation of the curvature perturbation. *JCAP*, **0505**(), 004. doi: 10.1088/1475-7516/2005/05/004
- Lyth, D. H., & Rodriguez, Y.** (2005.). The Inflationary prediction for primordial non-Gaussianity. *Phys.Rev.Lett.*, **95**(), 121302. doi: 10.1103/PhysRevLett.95.121302
- Lyth, D. H., & Wands, D.** (2002). Generating the curvature perturbation without an inflaton. *Phys. Lett. B*, **524**(), 5–14. doi: 10.1016/S0370-2693(01)01366-1
- Maleknejad, A., & Sheikh-Jabbari, M.** (2011). Non-Abelian Gauge Field Inflation. *Phys.Rev.*, **D84**(), 043515. doi: 10.1103/PhysRevD.84.043515
- Maleknejad, A., & Sheikh-Jabbari, M.** (2013). Gauge-flation: Inflation From Non-Abelian Gauge Fields. *Phys.Lett.*, **B723**(), 224-228. doi: 10.1016/j.physletb.2013.05.001
- Maleknejad, A., Sheikh-Jabbari, M., & Soda, J.** (2013). Gauge Fields and Inflation. *Phys.Rept.*, **528**(), 161-261. doi: 10.1016/j.physrep.2013.03.003
- Mathew, J., & Shankaranarayanan, S.** (2016). Low scale Higgs inflation with Gauss-Bonnet coupling. *Astropart. Phys.*, **84**(), 1–7. doi: 10.1016/j.astropartphys.2016.07.004
- Navarro, A. A., & Rodriguez, Y.** (2013.). The Vector Curvaton. *AIP Conf.Proc.*, **1548**(), 277-282. doi: 10.1063/1.4817057
- Nieto, C. M., & Rodriguez, Y.** (2016). Massive Gauge-flation. *Mod. Phys. Lett. A*, **31**(21), 1640005. doi: 10.1142/S0217732316400058
- Nojiri, S., Odintsov, S. D., & Sasaki, M.** (2005). Gauss-Bonnet dark energy. *Phys. Rev. D*, **71**(), 123509. doi: 10.1103/PhysRevD.71.123509
- Nozari, K., & Rashidi, N.** (2013). DBI inflation with a nonminimally coupled Gauss-Bonnet term. *Phys.Rev.*, **D88**(8), 084040. doi: 10.1103/PhysRevD.88.084040
- Okada, N., & Okada, S.** (2016). Simple inflationary models in Gauss-Bonnet brane-world cosmology. *Class. Quant. Grav.*, **33**(12), 125034. doi: 10.1088/0264-9381/33/12/125034
- Oliveros, A.** (2017). Slow-roll inflation from massive vector fields non-minimally coupled to gravity. *Astrophys. Space Sci.*, **362**(1), 19. doi: 10.1007/s10509-016-2998-3
- Peiris, H., et al.** (2003). First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Implications for inflation. *Astrophys.J.Suppl.*, **148**(), 213-231. doi: 10.1086/377228
- Perivolaropoulos, L.** (2014). Large Scale Cosmological Anomalies and Inhomogeneous Dark Energy. *Galaxies*, **2**(), 22-61. doi: 10.3390/galaxies2010022
- Pozdeeva, E.** (2020). Generalization of cosmological attractor approach to Einstein-Gauss-Bonnet gravity. *arXiv: 2005.10133 [gr-qc]*(), .
- Rashidi, N., & Nozari, K.** (2020). Gauss-Bonnet Inflation after Planck2018. *Astrophys. J.*, **890**(), 58. doi: 10.3847/1538-4357/ab6a10
- Rodríguez, Y., & Navarro, A. A.** (2018). Non-Abelian S -term dark energy and inflation. *Phys. Dark Univ.*, **19**(), 129–136. doi: 10.1016/j.dark.2018.01.003
- Sadeghi, J., Setare, M. R., & Banijamali, A.** (2009). Non-minimal Maxwell-Modified Gauss-Bonnet Cosmologies: Inflation and Dark Energy. *Eur.Phys.J.*, **C64**(), 433-438. doi: 10.1140/epjc/s10052-009-1152-6
- Sasaki, M., & Stewart, E. D.** (1996). A general analytic formula for the spectral index of the density perturbations produced during inflation. *Prog.Theor.Phys.*, **95**(), 71-78. doi: 10.1143/PTP.95.71

- Satoh, M.** (2010). Slow-roll Inflation with the Gauss-Bonnet and Chern-Simons Corrections. *JCAP*, **1011**(), 024. doi: 10.1088/1475-7516/2010/11/024
- Satoh, M., & Soda, J.** (2008). Higher Curvature Corrections to Primordial Fluctuations in Slow-roll Inflation. *JCAP*, **0809**(), 019. doi: 10.1088/1475-7516/2008/09/019
- Schwarz, D. J., Copi, C. J., Huterer, D., & Starkman, G. D.** (2016). CMB Anomalies after Planck. *Class. Quant. Grav.*, **33**(18), 184001. doi: 10.1088/0264-9381/33/18/184001
- Soda, J.** (2012). Statistical Anisotropy from Anisotropic Inflation. *Class.Quant.Grav.*, **29**(), 083001. doi: 10.1088/0264-9381/29/8/083001
- Spergel, D., et al.** (2007.). Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) three year results: implications for cosmology. *Astrophys.J.Suppl.*, **170**(), 377. doi: 10.1086/513700
- Starobinsky, A. A.** (1985). Multicomponent de Sitter (Inflationary) Stages and the Generation of Perturbations. *JETP Lett.*, **42**(), 152-155.
- Tsujikawa, S., Sami, M., & Maartens, R.** (2004). Observational constraints on braneworld inflation: The Effect of a Gauss-Bonnet term. *Phys. Rev. D*, **70**(), 063525. doi: 10.1103/PhysRevD.70.063525
- van de Bruck, C., Dimopoulos, K., & Longden, C.** (2016). Reheating in Gauss-Bonnet-coupled inflation. *Phys. Rev. D*, **94**(2), 023506. doi: 10.1103/PhysRevD.94.023506
- van de Bruck, C., Dimopoulos, K., Longden, C., & Owen, C.** (2017). Gauss-Bonnet-coupled Quintessential Inflation. *arXiv: 1707.06839 [astro-ph.CO]*(), .
- van de Bruck, C., & Longden, C.** (2016). Higgs Inflation with a Gauss-Bonnet term in the Jordan Frame. *Phys. Rev. D*, **93**(6), 063519. doi: 10.1103/PhysRevD.93.063519
- Wagstaff, J. M., & Dimopoulos, K.** (2011). Particle Production of Vector Fields: Scale Invariance is Attractive. *Phys.Rev.*, **D83**(), 023523. doi: 10.1103/PhysRevD.83.023523
- Yi, Z., Gong, Y., & Sabir, M.** (2018). Inflation with Gauss-Bonnet coupling. *Phys. Rev. D*, **98**(8), 083521. doi: 10.1103/PhysRevD.98.083521

Review article

Structural analysis of the $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) superconductor system

Análisis estructural del sistema superconductor $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb)

Carlos A. Parra-Vargas^{1,*}, Cesar Camilo Canaria-Camargo¹, Jairo Roa-Rojas², José Albino-Aguiar³

¹Grupo de Física de Materiales (GFM), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

²Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

³Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

Carlos A. Parra-Vargas, Inaugural article for admission as a Corresponding Member to the Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Abstract

In this paper, we report the synthesis and structural characterization of the $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) system, which adds to the findings reported by Aliabadi, *et al.*, who determined a critical temperature (T_c) of ~ 100 K for the superconducting $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$ system and evaluated its structural response in a sample. The new $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ system was produced using the solid-state reaction method and a similar thermal process as the one used for the superconductor RE: 123. The experimental results obtained with X-ray diffraction and the Rietveld analysis showed that these samples had the expected crystal structure. However, it was obvious that the presence of non-superconducting phases did not affect the superconducting transition temperature. Moreover, magnetic studies revealed that $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ samples showed a superconductivity transition within a temperature range of 80 - 93 K depending on the rare earth.

Keywords: New superconducting materials; $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ superconductor; Solid-state reaction.

Resumen

En este artículo reportamos la síntesis y caracterización estructural del sistema $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb), lo que viene a complementar lo ya reportado por Aliabadi, *et al.*, quienes lograron una temperatura crítica (T_c) de ~ 100 K para el sistema superconductor $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$, y evaluó la respuesta estructural en una muestra. El nuevo sistema $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ se obtuvo utilizando el método de reacción de estado sólido seguido de un proceso térmico similar al empleado para el superconductor RE: 123. Asimismo, los resultados experimentales obtenidos mediante la técnica de difracción de rayos X y el análisis de Rietveld evidenciaron que estas muestras tenían la estructura cristalina esperada; sin embargo, fue obvio que la presencia de fases no superconductoras no afectó la temperatura de transición superconductor. Además, los estudios magnéticos revelaron que las muestras de $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ registraban una transición superconductor en el rango de 80 a 93 K dependiendo de la tierra rara.

Palabras clave: Nuevos materiales superconductores; Superconductor $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$; Reacción de estado sólido.

Introduction

Since high-critical temperature superconductors (HTSCs) were discovered, there have been many attempts to raise the temperature of transition between the normal and the superconducting state. These HTSCs have a simple or a complex perovskite structure ABO_x depending on the number of rare earths atoms that are arranged in the stoichiometry (Sandoval-Gutiérrez, *et al.*, 2015).

Citation: Parra-Vargas CA, Canaria-Camargo CC, Roa-Rojas J, Albino-Aguiar J. Structural analysis of the $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) superconductor system. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):83-94, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1163>

Editor: Guillermo González-Villegas

***Corresponding autor:**

Carlos Arturo Parra Vargas;
carlos.parra@uptc.edu.co

Received: February 26, 2020

Accepted: October 24, 2020

Published: March 29, 2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

Aliabadi, et al. (2009) reported the new high-temperature superconductor (HTSC) $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (Y358), which reached a temperature above 100 K. Y358 has a crystalline structure similar to that of Y123, with five CuO_2 planes and three CuO chains; this increased number of CuO_2 planes and CuO chains has an important effect on the T_c of Y358 (**Udomsamuthirun, et al.**, 2010). Y358 exhibits three Y atoms and five Ba atoms and, hence, eight Cu atoms are obtained (**Landínez-Téllez, et al.**, 2015). The ceramic superconductor Y358 has a transition temperature of 101 K, i.e., 10 K above that of any of the YBCO compounds family (**Gholipour, et al.**, 2012).

The discovery of the new Y358 superconducting system has allowed for new and important results regarding the phenomenology of the superconducting cuprates. It has been prepared under different growth techniques, such as conventional sintering, sol-gel, and biopolymer-mediated and melt-texturing methods, resulting in different specimens, from polycrystalline samples to super-conducting nanowires. Different compounds have been derived, such as $Yb_{1.8}Sm_{1.2}Ba_5Cu_8O_{18}$, $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Sm and Nd), $Y_3Ba_5Ca_2Cu_8O_{18}$, $Y_3Ba_5Cu_8O_{y-x}F_x$, and $Y_3Ba_5Cu_{8-x}Zn_xO_{18}$ and several studies have compared the YBaCuO family members structural, magnetic, and electric properties (**Dias, et al.**, 2014).

Recently, **Aliabadi, et al.** (2009), **Tavana, et al.** (2010), and **Udomsamuthirun, et al.** (2010) demonstrated the new Y-based high-temperature superconductor in $Y_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (Y358) that acquired superconductivity above the 100 K of temperature. They also proposed that to obtain a stronger superconductor with a higher T_c in the YBaCuO family, more holes from the chains to the oxygen sites of the planes tending to diagonal-charge order should be pumped. The Y123 has two CuO_2 planes and one CuO chain while Y124 has one CuO double chain, Y247 has one CuO_2 plane, one CuO chain, and one double chain. Y358 has a crystalline structure like that of Y123 with five CuO_2 planes and three CuO chains. The increase in the number of CuO_2 planes and CuO chains has an important effect on the T_c of Y358. The number of CuO_2 planes and CuO chains or double chains believed to be the carrier reservoirs differs among YBaCuO family compounds. **Aliabadi, et al.** (2009) proposed that the Y123 lattice parameters a and b are very close to those of Y358, but the lattice parameter c of Y358 is almost three times that of Y123. **Udomsamuthirun, et al.** (2010) have postulated the following compositional relations for the unit cell: The number of CuO_2 planes equals the number of Ba-atoms; the number of CuO chains equals the number of Y-atoms, and 3) the number of Ba-atoms plus Y-atoms equals the number of Cu-atoms.

However, experimentally it can be proved that the number of Ba-atoms plus Y-atoms equals the number of Cu-atoms. In Y123, there is one Y-atom and two Ba-atoms, so we get three Cu-atoms. In Y358, there are three Y-atoms and five Ba-atoms, so we get eight Cu-atoms. According to this approach, to reach the highest T_c , more holes in the CuO_2 planes must be pumped. We assume that the number of Y atoms should be missing to create more holes and thus increase the critical temperature. At this point, we can make the following assumptions to synthesize a new superconductor in the YBaCuO family: 1) The number of Ba-atoms plus Y-atoms is equal to the number of Cu-atoms, and 2) the number of Y-atoms can be missing to reach the higher T_c , but then the first assumption should be obeyed.

The Y123 and Y358 can be explained by the assumption that in Y123 there are no Y-atoms missing and in Y358 there is one Y-atom missing for every five Ba-atoms. Based on our assumptions, there should be many new superconductors to be found. For example, in the case of one Y-atom missing, the general formula should be $Y_{x-2}Ba_xCu_{2x-2}O_{\delta}$. Y358 in this group has the percentage of Y-atoms missing in relation to the number of Ba-atoms, which is expressed as $1/5 \times 100 = 20\%$. For the two Y-atoms missing, the general formula should be $Y_{x-3}Ba_xCu_{2x-3}O_{\delta}$. We can get Y5813 with the percentage of Y-atoms missing in relation to the number of Ba atoms expressed as $2/8 \times 100 = 25\%$. Additionally, to this analysis, based on the structure reported by **Gholipour, et al.** (2012), we report the synthesis and structural analysis of the new $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) superconductor system.

Materials and methods

The superconductor samples of RE₃Ba₃Cu₈O₁₈ doped with RE = (Dy, Gd, Ho, Sm, Y, Yb) were produced using the solid-state reaction method (RSS) with Sigma-Aldrich raw materials of high-purity: BaCO₃ (99.999%), CuO (99.999%), Y₂O₃ (99.9%), Dy₂O₃ (99.9%), Sm₂O₃ (99.99%), Gd₂O₃ (99.9%), Ho₂O₃ (99.99%), and Yb₂O₃ (99.99%). The powders were dried at 200 °C for 15 hours, weighed in stoichiometric amounts, then these were macerated for 4 hours in an agate mortar, and the powder obtained was decarbonated at 750 °C for a period of 12 hours in a muffle furnace (**Figure 1**). The powders were macerated and pressed into a double effect cylindrical matrix at 2.5 MPa in a hydraulic press. The mixed materials were then calcined and sintered for 12 hours and 48 hours, respectively, at several temperatures. The samples obtained were pressed into pellets and sintered for 24 hours in an oxygen atmosphere and then cooled to room temperature at a rate of 5 °C/min. The heat treatment processes of the samples were performed in an alumina crucible. Calcined and sintered temperatures were different for the five samples. The various authors expected differences in synthesis temperatures in their studies, but they have shown that crystallization temperatures of the RE-358 compounds vary depending on the ionic radius of the RE³⁺ ion (**Table 1**) (**Topal & Akdogan, 2012; Slimani, et al., 2018**).

X-ray diffraction (XRD) patterns taken at room temperature were used to identify the crystalline structure of the five samples. The XRD pattern was obtained with a Panalytical X'pert PRO-MPD equipment with an ultrafast X'Celerator detector in Bragg-Brentano

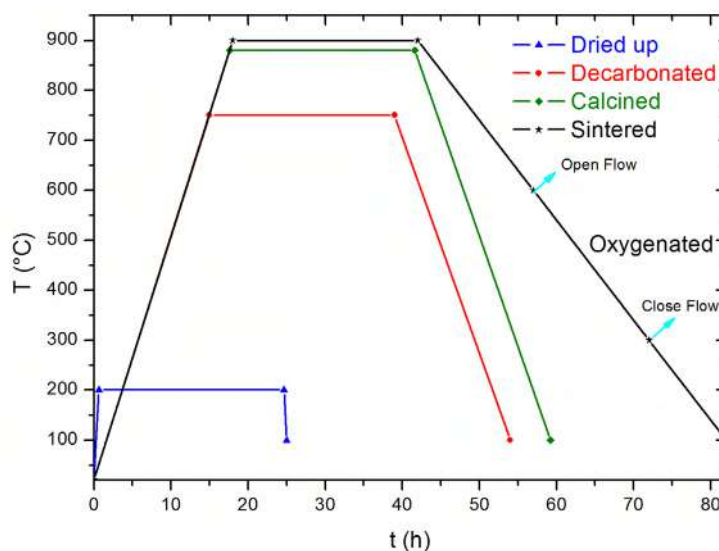


Figure 1. Temperature ramps

Table 1. Calcined and sintered temperatures for the RE-358 system

Sample	Calcination temperature (°C)	Sintering temperature (°C)
Sm-358	800	850
Gd-358	830	880
Dy-358	830	880
Ho-358	800	850
Y-358	830	880
Yb-358	830	870

configuration using CuK α radiation ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$). The patterns were scanned for a 2θ scattering angle between 15° and 90° , a step value of 0.0263° , and a counting time of 100 s. The XRD patterns were analyzed with the General Structure Analysis System (GSAS $\text{\textcircled{C}}$) software. The magnetic-property samples were examined using the Quantum Design VSM system with the routine ZFC - ZFC (Zero Field Cooled - Field Cooled) between 50 K and 300 K and magnetic fields from 100 Oe to 8000 Oe.

Results and discussion

The RE₃Ba₅Cu₈O₁₈ systems were analyzed from crystallographic databases. The theoretical model used to compare the superconducting samples (**Table 2**) has been tested on similar systems (**Pimentel, et al., 2015; Topal, et al., 2011; Gholipour, et al., 2012; Landínez-Téllez, et al., 2012**). The RE₃Ba₅Cu₈O₁₈ unit cell was generated by this model and compared with each diffractogram after which we concluded that the model is consistent with the results. In this table, the space group, which corresponds to an orthorhombic structure *Pmm2* (25), the lattice parameters, the atomic position of each of the ions in the cell and its occupancy factor will be found.

Figure 2 shows the XRD patterns for the RE₃Ba₅Cu₈O₁₈ system at the room temperature obtained by the SSR method compared to the theoretical patterns of the RE-358 with the orthorhombic space group. All synthesized samples exhibited the reflections of the theoretical phase. The difference in the synthesis temperature was expected as a result of crystallization temperatures of the RE-358 compounds changing the function of the ionic radius of RE³⁺ substituent ion (2). No change was evidenced in the positions of the XRD peaks for prepared samples indicating the absence of orthorhombic-tetragonal structural phase transition for RE-358, that is, no influence of the sintering temperature in the sintered compounds symmetry was observed (**Slimani, et al., 2018; Pavan-Kumar, et al., 2018**).

To confirm the crystalline structure, the XRD patterns were refined by the Rietveld method using the FullProf software program. The refined patterns are shown in **figures 3 and 4** for RE-358 with RE = Dy, Gd, Ho, Sm, Y, and Yb, respectively. In this graph, the experimental pattern is identified by the (•) symbol. The calculated pattern is the red line, the background is the green line, the experimental difference and calculated pattern is the blue line and the Bragg positions of each identified phase are shown in bars.

The coincidence between theoretical and experimental profiles confirmed that all samples had crystallized in an orthorhombic structure with *Pmm2* (25) symmetry corresponding to the superconducting phase; the symmetries obtained matched with others reported by **Aliabadi, et al. (2009), Slimani, et al. (2018), Rekaby, et al. (2018), and Gholipour, et al. (2012)** and corroborated by the small values in the agreement parameters 2χ and $R(F2)$. The results showed that the crystalline structure was not lost when yttrium atoms were substituted with RE³⁺ trivalent ions. The non-superconducting RE-123 phase with *P4/mmm* tetragonal was identified in the RE-358 system. The structures of RE-358 consist of five CuO₂ planes and three CuO chains (**Udomsamuthirun, et al., 2010; Ayas, 2011**). The presence of twin peaks $2\theta \approx 55.58^\circ$ and 68.50° confirmed the orthorhombic nature of the RE-358 compound.

The *a*, *b*, and *c* values of RE-358 and RE-123 phases were in accord with previous reports by **Pavan-Kumar, et al. (2018), Udomsamuthirun, et al. (2010), Rekaby, et al. (2014), Gholipour, et al. (2012)** while the *a* and *b* lattice parameters of RE-358 were very similar to the RE-123 phase, although the *c* parameters were three times higher than the RE-123. The variations of lattice parameters and cell volume in the RE-358 phase as a function of atomic radius of the RE substituent ion are shown in **figure 3** where an increase in *a* and *c* lattice parameters and in cell volume as the atomic radius increased is evidenced. This may have been caused by the increase of the RE³⁺ ionic radius (ionic radius TR³⁺). Increase in dimensions can be explained by the introduction of electrons in Cu-O orbitals on the *a-b* plane (**Ayas, 2011**).

Table 2. Theoretical model for the RE₃Ba₅Cu₈O₁₈ system

Lattice parameter			Space group
a (Å)	b (Å)	c (Å)	
3.8927	3.8303	32.0605	Pmm2
Atom	x	y	Z
RE	0.5000	0.5000	1.0000
Cu	0.0000	0.0000	0.0625
O	0.0000	0.5000	0.0625
O	0.5000	0.0000	0.0625
Ba	0.5000	0.5000	0.1250
O	0.0000	0.0000	0.1250
Cu	0.0000	0.0000	0.1875
O	0.0000	0.5000	0.1875
Ba	0.5000	0.5000	0.2500
O	0.0000	0.0000	0.2500
Cu	0.0000	0.0000	0.3125
O	0.0000	0.5000	0.3125
O	0.5000	0.0000	0.3125
RE	0.5000	0.5000	0.3750
Cu	0.0000	0.0000	0.4375
O	0.0000	0.5000	0.4375
O	0.5000	0.0000	0.4375
RE	0.5000	0.5000	0.5000
Cu	0.0000	0.0000	0.5625
O	0.0000	0.5000	0.5625
O	0.5000	0.0000	0.5625
Ba	0.5000	0.5000	0.6250
O	0.0000	0.0000	0.6250
Cu	0.0000	0.0000	0.6875
O	0.0000	0.5000	0.6875
Ba	0.5000	0.5000	0.7500
O	0.0000	0.0000	0.7500
Cu	0.0000	0.0000	0.8125
O	0.0000	0.5000	0.8125
Ba	0.5000	0.5000	0.8750
O	0.0000	0.0000	0.8750
Cu	0.0000	0.0000	0.9375
O	0.0000	0.5000	0.9375
O	0.5000	0.0000	0.9375

The samples were composed of both the superconducting and non-superconducting phases. The superconducting phase corresponds to the orthorhombic structure and the non-superconducting phase shows several crystal structures (**Table 3**). As reported by different authors, it is well known that the small reflections corresponding to a low amount of the non-superconducting phases are characteristics of these compounds since they are

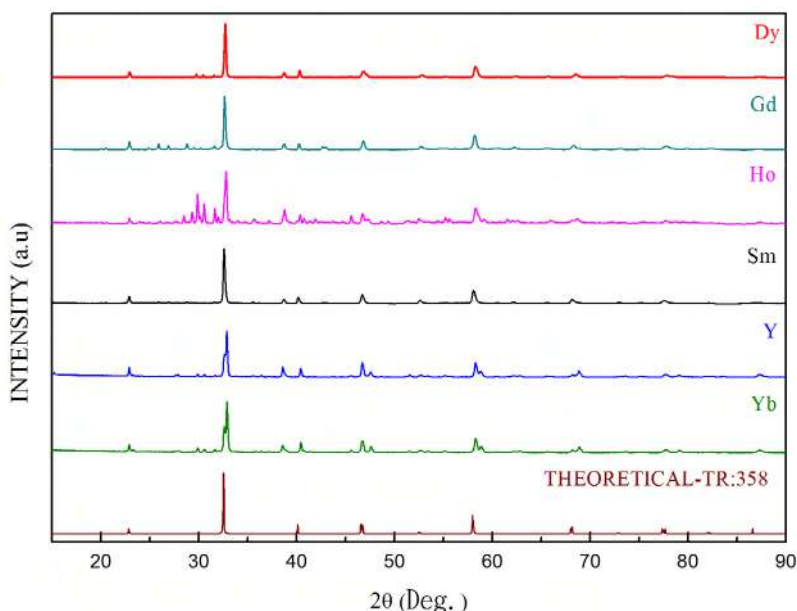


Figure 2. XRD patterns obtained for $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ compounds.

crystalline structures thermally stable (Aliabadi, *et al.*, 2009; Topal, *et al.*, 2011). The lattice parameters of superconducting and non-superconducting phases are shown in **tables 4 and 5**. **Table 5** shows the percentage of the superconducting and non-superconducting phases in the samples. It is clear that the non-superconducting phase had a great contribution, except in the $\text{Gd}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ sample. The $Pmm2$ space group corresponds to the superconducting phase while the other space groups of the non-superconducting phase are composed of $P4/mmm$ (RE123), $Pnma$ (RE211), and $Im-3m$ (BaCuO_2), (see table 5). Based on more detailed DRX analyses, Gholipour, *et al.* (2012) and Vovk *et al.* (2008) demonstrated that the RE358 has two different structures: RE123 ($P4/mmm$) and RE358 ($Pmm2$) where the RE123 phase is dominant because the RE358 has a very complex crystalline network compared to the RE123 system due to the number of the CuO_2 planes where the electrons are paired. Given the structural similarity of the two structures, it is difficult to produce the single-phase RE358 material and to distinguish them (Gholipour, *et al.*, 2012; Dias, *et al.*, 2014; Topal, *et al.*, 2011; Vovk, *et al.*, 2008; Khosroabadi, *et al.*, 2014). These results showed an increase in the percentage of the RE358 phase compared to other reports.

Figure 2 in the study by Udomsamuthirun, *et al.* (2010) shows a linear relation between the number of Cu-atoms in their sample versus the c-axis value in the XRD spectra (Pimentel-Jr, *et al.*, 2015). In our study, **figure 4a** shows the results found for our samples, which agree with those of Sujinnapram, *et al.* (2011).

Figures 4 (b,c) and 5 show a decreasing linear relationship of the orthorhombic unit cell parameter (a, b, V) in function of the rare earth ionic ratio $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ samples; Tarascón, *et al.* (1987) suggested this is due to the removal of oxygen atoms from the copper atoms. From this perspective, the copper that was fourfold coordinated becomes twofold coordinated with an oxygen above and one below (Sujinnapram, *et al.*, 2011).

Figure 6 shows the ZFC and FC magnetization curves as a function of the temperature, which is typical of superconducting materials. The figure shows how the temperature T_c was extracted for each of the samples. The characteristic T_c divided the range of normal and superconducting phases showing the beginning of the diamagnetic characteristic contribution with values below the T_c ones, which were determined considering the intersection between the extrapolated magnetization in the normal and superconducting phases (Supelano, *et al.*, 2016).

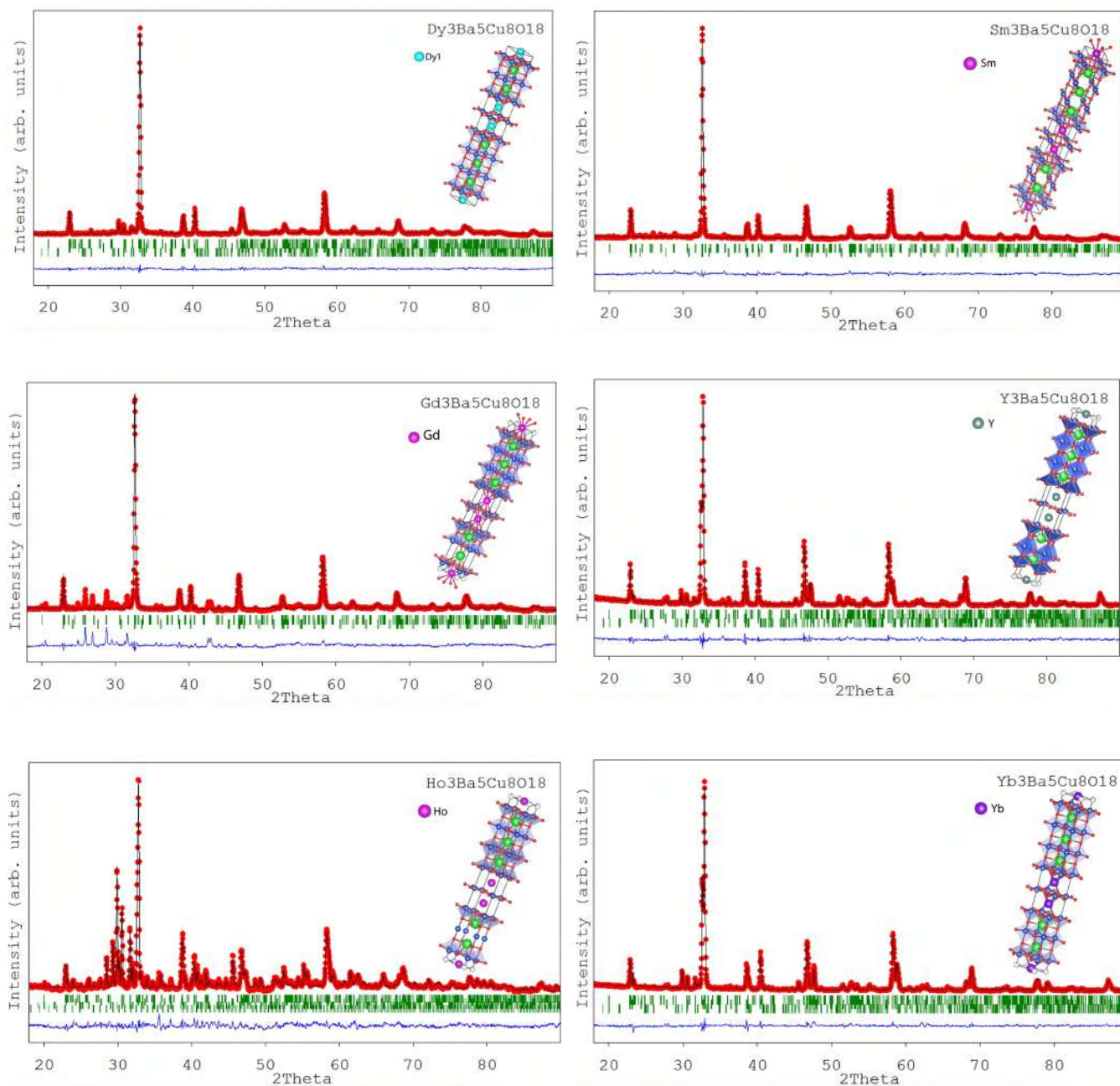


Figure 3. Rietveld refinements for $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE=Dy, Gd, and Ho). The red line corresponds to the experimental pattern, the black line to the calculated one, the green lines to the Bragg reflections, and the blue line shows the difference between the adjusted pattern and the experimental pattern.

The results obtained for the values of the critical temperature, all with an applied field of 100 Oe, are recorded in **table 3**. The materials exhibited a lower superconducting transition than Y-358 (Aliabadi, *et al.*, 2009) due to the change in the electronic structure of the sample since RE^{3+} has a larger ionic radius than Y demonstrating that an increase in the separation distance of the superconducting planes affects the T_c considerably, as well as the internal transfer of charges between the CuO_2 planes and the charge reservoirs thus causing the decrease of the T_c . This fact is in accordance with the decrease of the parameter c when the ionic radius of RE decreases, i.e., it represents the understanding of

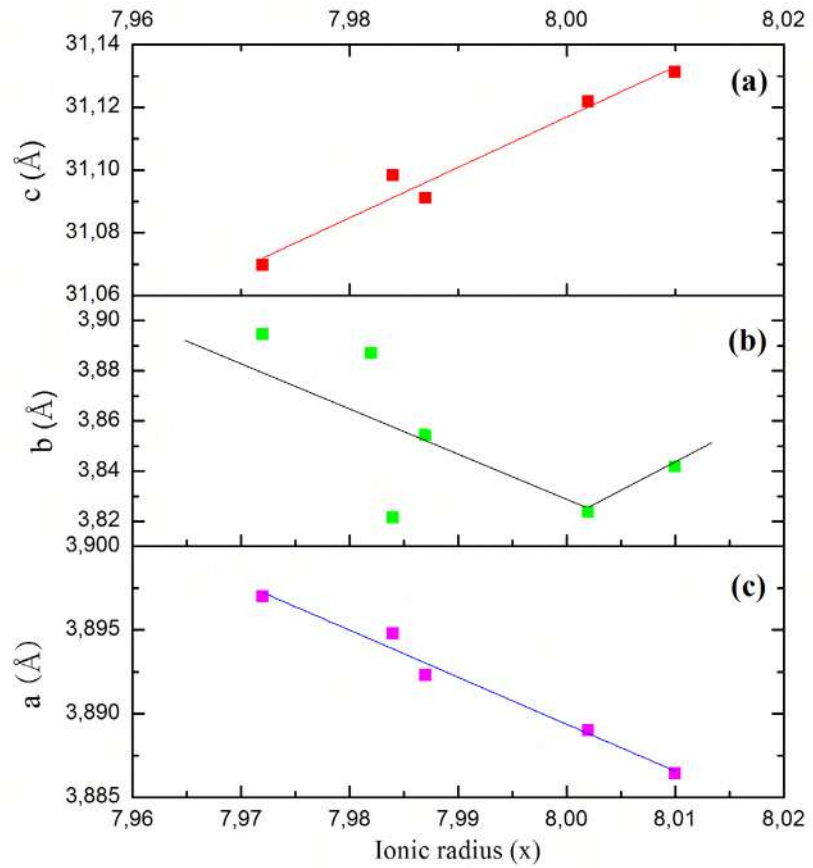


Figure 4. Orthorhombic unit cell parameter (a,b,c) as a function of the rare earth ionic ratio $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ series for the as-prepared samples

Table 3. Lattice parameters of the superconducting phase in Pmm2 space group

System	χ^2	R (F ²)	a (Å)	b (Å)	c (Å)	α	β	γ	R_{wp}	R_{exp}	Anis	c/a ratio
Dy ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	1.977	0.330	3.892(3)	3.854(4)	31.091(1)	90	90	90	15.20	7.69	0.978	7.987
Gd ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	4.444	0.087	3.887(8)	3.887(0)	31.035(4)	90	90	90	36.80	8.28	0.020	7.982
Ho ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	2.480	0.231	3.886(4)	3.841(7)	31.131(3)	90	90	90	22.00	8.86	1.156	8.010
Sm ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	2.439	0.191	3.897(0)	3.894(4)	31.069(7)	90	90	90	19.05	7.81	0.066	7.972
Y ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	2.260	0.355	3.889(0)	3.823(7)	31.121(9)	90	90	90	17.20	7.61	1.693	8.002
Yb ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	2.197	0.283	3.894(8)	3.821(5)	31.098(3)	90	90	90	16.30	7.42	1.899	7.984

the c axis and causes a reduction in the density of states in the Fermi energy which leads to the reduction of the T_c . This may be attributed to the concentration in the basal plane due to the reduction of vacancies or oxygen sites in the CuO₂ planes. In general, there is a critical-temperature dependence on the ionic radius of the substituent ion RE since the critical temperatures tend to be higher as the RE ionic radius approaches the Y ionic radius. This behavior regarding the ionic radius and T_c alone is different in Ho-358. It is important to note that the Pnma (RE211) and Im-3m (BaCuO₂) non-superconducting phases have no magnetic response and that its training is due to the synthesis method used, which is typical for 358 systems because they are thermally stable crystal structures (Gholipour, *et al.*, 2012; Supelano, *et al.*, 2014).

Table 4. Percentage of the phase composition and the critical temperature

Samples	Percentage of the phase composition (%)				Tc (K)
	Superconducting phase	Non-superconducting phase			
	RE358, Pmm2	RE123, P4/ mmm	RE211, Pnma	BaCuO ₂ , Im-3m	
Dy ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	26.81	67.21	5.98		90
Gd ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	59.88	40.12			80
Ho ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	15.31	34.32	20.62	29.75	91
Sm ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	41.69	58.31			93
Y ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	30.04	66.84	3.12		95
Yb ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	37.91	57.79	4.30		94

Table 5. Lattice parameters of the non-superconducting phase

Samples	Non-superconducting phase								
	RE123, P4/mmm			RE211, Pnma			BaCuO ₂ , Im-3m		
	a (Å)	b (Å)	c (Å)	a (Å)	b (Å)	c (Å)	a (Å)	b (Å)	c (Å)
Dy ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	3.874(4)	3.874(4)	11.642(5)	12.238(4)	5.679(0)	7.156(6)	-	-	-
Gd ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	3.883(0)	3.883(0)	11.628(9)	-	-	-	-	-	-
Ho ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	3.869(5)	3.869(5)	11.630(5)	12.178(5)	5.661(7)	7.131(4)	18.298(8)	18.298(8)	18.298(8)
Sm ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	3.889(0)	3.889(0)	11.633(8)	-	-	-	-	-	-
Y ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	3.855(2)	3.855(2)	11.670(0)	12.174(0)	5.657(1)	7.128(6)	-	-	-
Yb ₃ Ba ₅ Cu ₈ O ₁₈	3.848(0)	3.848(0)	11.681(3)	12.179(1)	5.661(3)	7.133(4)	-	-	-

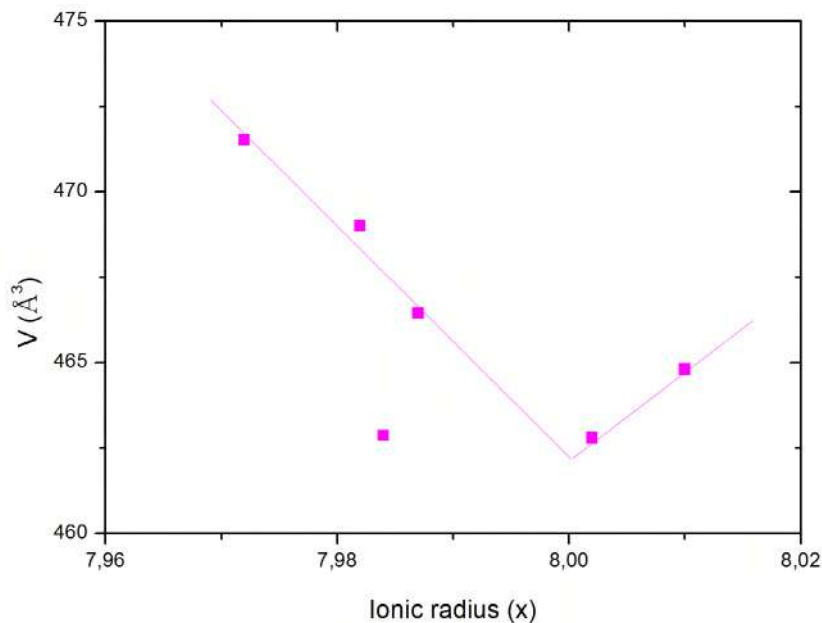


Figure 5. Orthorhombic unit cell parameter (V) as a function the rare earth ionic ratio RE₃Ba₅Cu₈O₁₈ series for the as-prepared samples

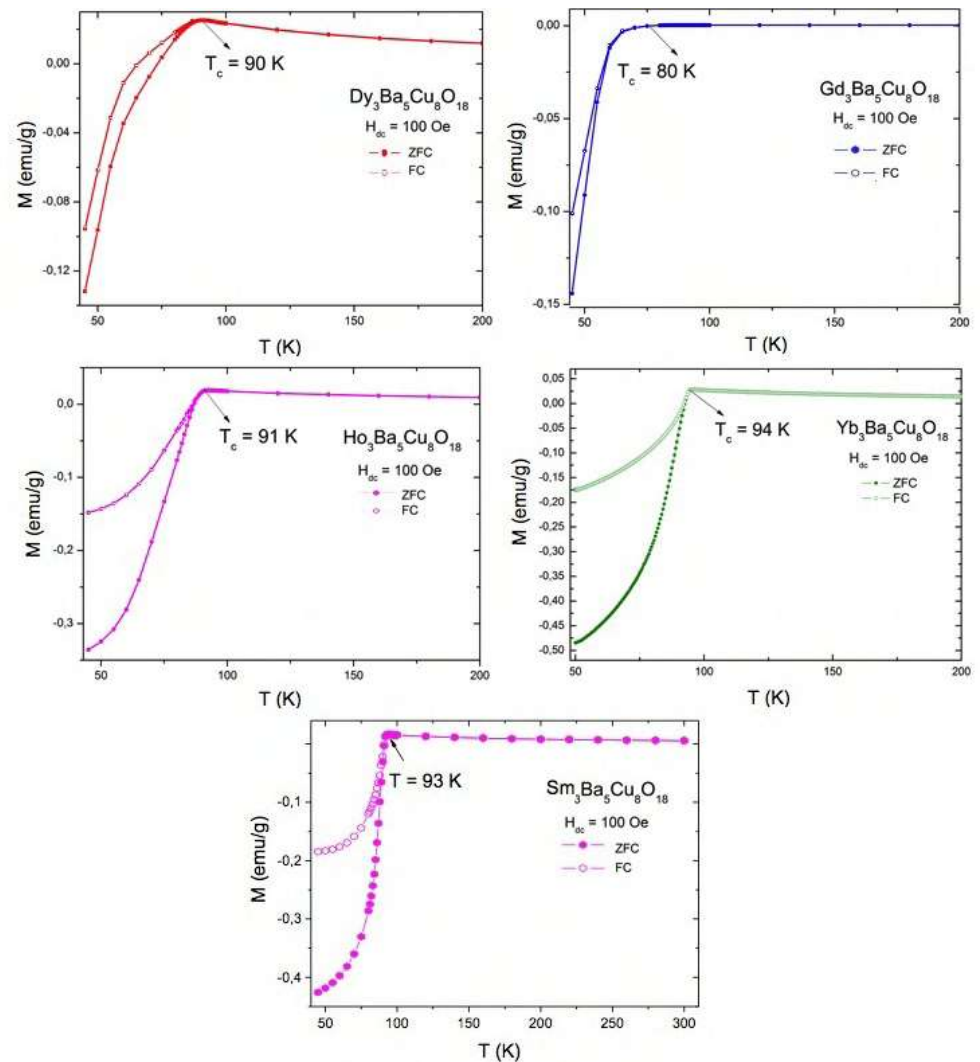


Figure 6. Magnetization versus temperature for the $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ systems

Conclusions

We produced the $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18-\delta}$ ($\text{RE} = \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Ho}$) superconducting system using the solid-state reaction method. We studied the XRD spectra of the $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ superconductors with the Rietveld method to determine the phase composition, lattice parameters, and space group of the superconducting and non-superconducting phases. The $\text{Pmm}2$ space group corresponded to the superconducting phase while $\text{P}4/\text{mmm}$ (RE_{123}), Pnma (RE_{211}), and $\text{Im}-3\text{m}$ (BaCuO_2) corresponded to the other space groups of the non-superconducting phase. The more non-superconducting phases are present, the more anisotropy parameters are found.

The high T_c $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ superconductor compounds studied here had a crystal structure like Y_{123} with the exception of the number of CuO chains and CuO_2 planes, which exceed those in Y_{123} . The $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ has five CuO_2 planes and three CuO chains. It seems that increasing the number of the CuO_2 planes and the position of the CuO chains has important effects on the value of the transition temperature in the $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ compounds. Magnetization measurements demonstrated the wide characteristics of the $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ superconductor system. The critical temperature of the $\text{RE}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ samples ranged from 80 to 95 K depending on the rare earth.

Author contributions

CAPV oversaw the production of samples and the writing of the document; CC carried out the analysis and interpretation of the results and elaborated the figures and tables; JRR was responsible for the style correction and the review of the final document; JAA collaborated in the analysis and interpretation of the results.

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interests of any kind regarding the publication of the results of our research work.

References

- Aliabadi, A., Farshchi, Y.A., Akhavan, M.** (2009). A new Y-based HTSC with T_c above 100 K. *Physica C*. **469**: 2012-2014.
- Ayas, O.** (2011). The Structural, Superconducting and Transport Properties of the Compounds $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ and $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Ca}_2\text{Cu}_8\text{O}_{18}$. *J. Supercond. Nov. Magn.* **24**: 2243-2252.
- Dias, F.T., Oliveira C.P., Vieira, V.N., Silva D.L., Mesquita, F., Almeida, M.L., Schaf, J., Pureur, P.** (2014). Magnetic irreversibility and zero resistance in granular Y358 superconductor. *Journal of Physics Conference Series*. **568**: 1-5.
- Gholipour, S., Daadmehr, V., Rezakhani, A.T., Khosroabadi, H., Shahbaz-Tehrani, F., Hosseini-Akbarnejad, R.** (2012). Structural Phase of Y358 Superconductor Comparison with Y123. *J. Supercond. Nov. Magn.* **25**: 2253-2258.
- Khosroabadi, H., Rasti, M., Akhavan, M.** (2014). Structural analysis of $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{19-\delta}$ high- T_c superconductor by ab initio density functional theory. *Phys. C Supercond.* **497**: 84-88.
- Landínez-Téllez, D.A., Cabrera-Báez, M., Roa-Rojas, J.** (2012). Structure and conductivity fluctuations of the $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ superconductor. *Modern Physics Letters B*. **26**: 1-11.
- Pavan-Kumar, S., Santosh, M., Swarup-Raju, P.M.** (2018). Structural and Thermal Validations of $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ Composites Synthesized via Citrate Sol-Gel Spontaneous Combustion Method. *J. Supercond. Nov. Magn.* **31**: 1279-1286.
- Peña, J.P., Martínez, D.B., Parra-Vargas, C.A.** (2013). Magnetic Measurements and Kinetic Energy of the Superconducting Condensate in $\text{SmBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Brazilian J. Phys.* **43**: 22-27.
- Pimentel-Jr, J. L., Martínez-Buitrago, D., Supelano, I., Parra-Vargas, C.A., Mesquita, F. R., Pureur, P.** (2015). Synthesis and Characterization of the Superconductors $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_{8-x}\text{Fe}_x\text{O}_{18}$ ($0.0597 \leq x \leq 0.1255$). *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*. **28**: 509-512.
- Rekaby, M., Roumié, M., Abou-Aly, A., Awad, R., Yousry, M.** (2014). Magnetoresistance Study of $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18}$ Superconducting Phase Substituted by Nd^{3+} and Ca^{2+} Ions. *J. Supercond. Nov. Magn.* **27**: 2385-2395.
- Sandoval-Gutiérrez, S., Supelano, G.I., Roa-Rojas J., Parra-Vargas, C.A.** (2015). Production a characterization of new system superconductor $\text{TR}_3\text{Ba}_8\text{Cu}_{11}\text{O}_8$. *Journal of Physics: Conference Series*. **687**: 1-4.
- Sujinnapram, S., Udomsamuthirum, P., Kruachong, T., Nilkamjon T., Ratreng S.** (2011). XRD spectra of new YBaCuO superconductors. *Bull. Meter. Sci.* **34**: 1053-1057.
- Slimani, Y., Hannachi, E., Zouaoui, M., Ben-Azzouz, F.** (2018). Excess Conductivity Investigation of $\text{Y}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_{18\pm\delta}$ Superconductors Prepared by Various Parameters of Planetary Ball Milling Technique. *J. Supercond. Nov. Magn.* **31**: 2339-2348.
- Supelano, G.I., Pimentel, J.L., Palacio, C.A., Mejía-Gómez, J.A., Menegotto-Costa, R., Caicedo-Mateus, F., Martínez-Buitrago, D., Roa-Rojas, J., Mesquita, F., Parra-Vargas, C.A.** (2016). Weak Field Magnetic Susceptibility Fluctuations Above the Superconducting Transition $\text{YBa}_2\text{Cu}_{3-x}\text{Fe}_x\text{O}_{7-\delta}$ ($0.05 \leq x \leq 0.12$). *J. Low Temp. Phys.* **182**: 141-152.
- Supelano, G.I., Sarmiento-Santos, A., Parra-Vargas, C.A.** (2014). Magnetic fluctuations on $\text{TR}_3\text{Ba}_5\text{Cu}_8\text{O}_8$ (TR=Ho, Y and Yb) superconducting system. *Phys. B Condens Matter*. **455**: 79-81.
- Tarascón, J.M., McKinnon, W.R., Greene, L.H., Hull, G.W., Vogel, E.M.** (1987). Oxygen and rare-earth doping of the 90 K superconducting perovskite $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. *Physical Review B*. **36**: 226-234.
- Tavana A. & Akhavan M.** (2010). How T_c can go above 100 K in the YBCO family. *The European Physical Journal B*. **73**: 79-83.

-
- Topal, U. & Akdogan, M.** (2012). The Role of Oxygenation on Superconducting Properties of $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE = Y, Sm and Nd) Compounds. *J. Supercond. Nov. Magn.* **25**: 239-244.
- Topal, U., Akdogan, M., Ozkan, H.** (2011). Electrical and Structural Properties of $RE_3Ba_5Cu_8O_{18}$ (RE=Y, Sm and Nd) Superconductors. *J. Supercond. Nov. Magn.* **24**: 2099-2102.
- Udomsamuthirun, P., Kruachong, T., Nilkamjon, T., Ratreng, S.** (2010). The New Superconductors of YBaCuO Materials. *J Supercond Nov Magn.* **23**: 1377-1380.
- Vovk, R.V.** (2008). Effect of high pressure on the fluctuation conductivity and the charge transfer of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ single crystals. *J. Alloys Compd.* **453**: 69-74.
- Wu, K., Ashburn, J.R., Torng, C.J., Hor, P.H., Meng, R.L., Gao, L., Huang, Z.J., Wang, Y.Q., Chu, C.W.** (1987). Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Phys. Rev. Lett.* **58**: 908.

Artículo original

Diversidad beta del bosque seco tropical en el norte del Caribe colombiano

Beta-diversity of the tropical dry forest in the northern Colombian Caribbean

✉ Hector García-Q.^{1,*}, ✉ Eduino Carbonó-DelaHoz², ✉ Willinton Barranco-Pérez³

¹ Maestría en Ecología y Biodiversidad, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

² Herbario UTMC, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

³ Grupo de Investigación en Ecología Neotropical-GIEN, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

Entre septiembre de 2018 y junio de 2019 se hicieron levantamientos florísticos en cuatro fragmentos ubicados en los departamentos de Atlántico, Bolívar, La Guajira y Magdalena, con el propósito de analizar la diversidad beta en el bosque seco tropical de la región norte del Caribe colombiano. Mediante el uso de índices conocidos se calcularon los valores de distintos componentes de la diversidad. Se observó heterogeneidad en la composición de los sitios y la modelación de la estructura de sus comunidades dominada por la rotación espacial de especies. Pocas especies se registraron simultáneamente en todos los sitios, en tanto que muchas estaban confinadas a lugares definidos según un modelo de distribución de abundancias del tipo de series logarítmicas. Un rasgo relevante fue la escasa aparición de especies de maderas valiosas, posiblemente debido a la extracción selectiva. Los fragmentos estudiados se justifican como objetivo de conservación biológica, pero dada la alta variación en la composición de especies encontrada, convendría incorporar más fragmentos para abarcar mayor diversidad del bosque seco en el norte del Caribe colombiano.

Palabras clave: Bosques fragmentados; Composición; Distribución de abundancias; Estructura; rotación espacial de especies; Similitud.

Abstract

To analyze the beta diversity in the tropical dry forest of the northern Colombian Caribbean region, we carried out floristic surveys in four fragments in the departments of Atlántico, Bolívar, La Guajira and Magdalena between September 2018 and June 2019. Using known indices, we calculated the values of different components of the diversity and we observed heterogeneity in the composition between the sites and the modeling of their community structures dominated by species turnover. Few species were recorded simultaneously at all sites while many were confined to defined locations responding to an abundance distribution model that would fit the logseries type. A relevant feature was the low appearance of valuable wood species, possibly due to selective extraction. The fragments studied are justified as a biological conservation objective, but given the high variation in the composition of species found, it would be convenient to incorporate more fragments to cover greater diversity of the dry forest in the northern Colombian Caribbean.

Keywords: Composition; Distribution of abundances; Fragmented forests; Similarity; Spatial species turnover; Structure.

Citación: García-Q. H, Carbonó-DelaHoz E, Barranco-Pérez W. Diversidad beta del bosque seco tropical en el norte del Caribe colombiano. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):95-108, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1267>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Héctor García-Q.;
coleopterocoprofago@yahoo.es

Recibido: 12 de junio de 2020

Aceptado: 30 de octubre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

La región Caribe de Colombia exhibe variación ambiental a lo largo de su geografía, así como distintas formas de uso del suelo en esas condiciones heterogéneas (IDEAM, *et al.*, 2007). Con altitudes bajas, un territorio de gran extensión formado por colinas, contrafuertes montañosos y planicies aluviales, la región tiene clima cálido seco y una

vegetación modelada por condiciones de marcada estacionalidad en la distribución de las lluvias, lo que influye en sus rasgos estructurales, fisonómicos y funcionales y la configura con un bosque seco tropical (BST) (**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt - IAvH**, 1998; **Miles, et al.**, 2006). Este bosque, parte del grupo florístico de Centro América y el norte de Suramérica (**Pizano, et al.**, 2014; **Dryflor**, 2016; **Kattan, et al.**, 2019), con pocos remanentes de estructura y composición semejantes a las condiciones originales (**González-M., et al.**, 2018), luce como un mosaico de parches de variada extensión cubiertos por vegetación natural e inmersos en matrices de hábitats modificados (**Portillo-Quintero & Sánchez-Azofeifa**, 2010). Dicha fragmentación se reconoce como un rasgo del bosque seco neotropical de existencia antigua relacionada con la evolución y la biogeografía de los linajes de plantas que contiene (**Pennington, et al.**, 2009; **Dick & Pennington**, 2019), así como con la intervención humana durante tiempo prolongado (**Fajardo, et al.**, 2005; **Portillo-Quintero, et al.**, 2015).

Los estudios sobre la cobertura vegetal en el Caribe colombiano (**IAvH**, 1998) y las publicaciones de los últimos años reflejan un interés creciente en el conocimiento del BST (**Mendoza-C.**, 1999; **Marulanda, et al.**, 2003; **Ruiz & Fandiño**, 2009; **Carbonó-Delahoza & García-Q.**, 2010; **Patiño & Rangel-Ch.**, 2011; **Rangel-Ch., et al.**, 2011; **Rangel-Ch.**, 2012; **Rodríguez, et al.**, 2012; **Olascuaga, et al.**, 2016; **Sanmartín-Sierra, et al.**, 2016; **Herazo, et al.**, 2017; **Aldana-Domínguez, et al.**, 2017; **García-Martínez & Mercado-Gómez**, 2017; **Lücking, et al.**, 2019), aunque es común escuchar afirmaciones de que lo alcanzado hasta el momento es insuficiente (**Kattan, et al.**, 2019). En lo referente a la estimación de la diversidad de plantas, los estudios hacen énfasis en una mayor proporción de la diversidad alfa, en tanto que entre los análisis de la diversidad beta se destacan las importantes contribuciones de **Castellanos-Castro & Newton** (2015) y **Kattan, et al.** (2019). El estudio de ambos componentes es de considerable importancia, sobre todo el de la diversidad beta, pues permite establecer la relación directa de la escala local con el conjunto amplio de las especies a escala regional, es decir, la diversidad gamma (**Baselga & Leprieur**, 2015).

El concepto de diversidad beta se aplica al grado de cambio en la composición de una comunidad entre una unidad de muestreo y otra a lo largo de gradientes (**Carvalho, et al.**, 2012), o a la variación en la composición de la comunidad entre las unidades de muestreo (**Anderson, et al.**, 2011). Se han propuesto muchas medidas para lograr una estimación apropiada (**Koleff, et al.**, 2003; **Legendre & De Cáceres**, 2013; **Calderón-Patrón, et al.**, 2016), pero aún no se alcanza un consenso general sobre la forma más adecuada de responder con mayor exactitud a cuestionamientos específicos, aunque hay diferentes enfoques válidos para obtener resultados verificables.

En estudios a escala local en el BST del Caribe se ha estimado la rotación entre fragmentos con distinto grado de intervención, y se ha encontrado una gran diversidad beta atribuible a diferencias ambientales y de manejo (**Castellanos-Castro & Newton**, 2015). Se sabe que la fragmentación del hábitat, entendida como su ruptura, puede conducir a una mayor diversidad beta (**Fletcher, et al.**, 2018), pero debe advertirse que con los valores obtenidos mediante los índices de disimilitud habituales es difícil avanzar en la elucidación de los posibles procesos responsables de las diferencias en la composición y la rotación de especies de los sitios (**Calderón-Patrón, et al.**, 2016). Por ello, la división de la diversidad beta en sus componentes permite una mejor comprensión de las posibles causas de las diferencias, lo que incide en las estrategias de conservación (**Moreno, et al.**, 2017). En ese sentido, se han propuesto varios métodos para los casos en que se producen diferentes patrones de composición (**Baselga**, 2010; 2012; **Carvalho, et al.**, 2012; 2013; **Podani & Schmera**, 2016).

En este sentido, el objetivo del presente trabajo fue cuantificar la diferenciación en la composición del BST del Caribe colombiano y determinar los factores responsables de la variación en sus comunidades florísticas, tratando de responder a las siguientes preguntas: ¿cuál es el grado de variación en la composición florística entre los fragmentos remanentes del BST en el norte del Caribe colombiano? ¿A qué componente de la diversidad beta puede

atribuirse la variación en la composición florística entre fragmentos del bosque seco en la costa caribe de Colombia? Para responderlas se midió la composición de las comunidades de plantas con flores en cuatro fragmentos distanciados geográficamente ubicados en la zona norte de la región. Se espera que los resultados obtenidos contribuyan a mejorar el conocimiento de la biodiversidad del BST en el Caribe colombiano y sirvan de respaldo en la proyección de estrategias para su manejo.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se analizaron los datos obtenidos de los muestreos realizados entre septiembre del 2018 y junio del 2019 en cuatro fragmentos del BST en el norte del Caribe de Colombia (**Figura 1**). Los sitios se escogieron utilizando mapas nacionales de coberturas de la tierra (**IDEAM, 2015a**) y considerando su localización en la región, la homogeneidad en la cobertura y la accesibilidad para el desarrollo del trabajo (seguridad, garantía de acceso y movilidad). Se ubicaron a distancias de 20 a 200 km entre sí en matrices de más de 300 ha de BST con historias de intervención similares (remanentes de bosque fragmentado, áreas de ganadería y cultivos abandonados) en lugares que hoy están dedicados a la protección de la biodiversidad. El clima en la región de estudio es cálido semiárido (clasificación de Caldas-Lang), con una precipitación media anual entre 1.000 y 1.500 mm en un patrón bimodal de máxima pluviosidad en octubre, una temperatura media anual que oscila entre 26 y 28 °C y una máxima de 34 °C (**IDEAM, 2015b**). Los sitios de muestreo fueron: 1) la reserva Miramar, a 180 m s.n.m., en jurisdicción del municipio de Dibulla (departamento de La Guajira), denominado GUA, con un relieve de colinas bajas en estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM), surcado por corrientes permanentes de agua e inmerso en una zona de ganadería y cultivos transitorios; 2) en inmediaciones del Parque Nacional Natural Tayrona (departamento

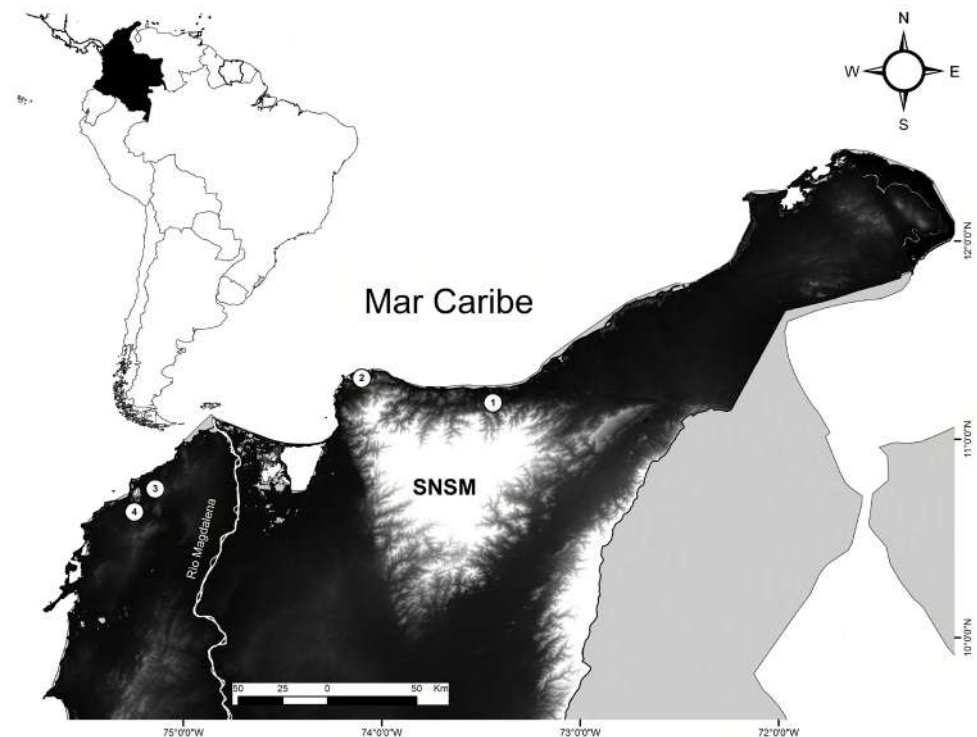


Figura 1. Localización de fragmentos de bosque seco tropical seleccionados para muestreo: 1) La Guajira (GUA); 2) Magdalena (MAG); 3) Atlántico (ATL) y 4) Bolívar (BOL)

de Magdalena), a 50 m s.n.m., denominado MAG, con relieve de laderas y cauces de quebradas intermitentes en las estribaciones noroccidentales de la SNSM en un área de amortiguación del parque natural con indicios de ganaderías; 3) en la reserva El Palomar, municipio de Piojó (departamento del Atlántico), a 200 m s.n.m., denominado ATL, de relieve quebrado con pendientes moderadas y cauces de quebradas intermitentes, rodeado de fincas ganaderas y cultivos transitorios; (4) en la hacienda El Ceibal, municipio de Santa Catalina (departamento de Bolívar), a 40 m s.n.m., denominado BOL, de relieve plano con presencia de colinas bajas e influido por inundaciones temporales del Canal del Dique en un área de fincas ganaderas.

Toma de datos y análisis de la información

En cada sitio se registraron los individuos leñosos con un diámetro de 1 cm o más a la altura del pecho y a 1,3 m de la base siguiendo la metodología descrita por **Villareal, et al.** (2006). Las plantas se identificaron en campo y en casos necesarios se recolectaron muestras (permiso No.1293 de 2013 expedido por la *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales* - ANLA), y se procesaron según los estándares establecidos. Para la determinación taxonómica se consultó a especialistas en grupos taxonómicos de la colección del herbario UTM y las plataformas virtuales de los herbarios COL, GH, NY, Jstor Plant Science, The Plant List y Trópicos. Los especímenes producidos (**Tabla 1S**, <https://www.raccefy.co/index.php/raccefy/article/view/1267/2945>) se depositaron en la colección del herbario UTM bajo la serie E. Carbonó (EC).

Con el propósito de evaluar la completitud del muestreo, se estimó su cobertura en cada fragmento (**Chao & Jost**, 2012) con el paquete estadístico en línea iNEXT (**Chao, et al.**, 2016). Se calculó el índice de valor de importancia (IVI) de las especies, y para evaluar la distribución de los individuos por tamaños, se construyeron intervalos de clase a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP) (**Rangel-Ch. & Velásquez**, 1997). La estructura vertical de la vegetación se evaluó a partir de los datos de altura por individuo y según los estratos propuestos por **Rangel & Lozano** (1986). La estructura se analizó con base en los índices de diversidad alfa verdadera expresados en los números efectivos de especies (**Jost**, 2006) y se elaboró el gráfico de distribución de abundancia de las especies (*species abundance distribution*, SAD (**Ulrich, et al.**, 2020)). La similitud florística entre fragmentos se calculó mediante el coeficiente de similitud de Sørensen (cualitativa) basado en la presencia o ausencia de especies, en tanto que con las abundancias se calculó el índice de similitud de Morisita Horn (cuantitativa). La relación entre la distancia física (geográfica) y la distancia biológica (diversidad beta) entre los fragmentos se determinó con una prueba de Mantel (método de Pearson y Spearman) en la matriz de distancias biológicas construida a partir del coeficiente de similitud de Sørensen (presencia o no de especies) y la distancia en kilómetros entre los sitios. La diversidad beta de los fragmentos se exploró mediante un análisis de ordenación Bray-Curtis no direccional y se generó el respectivo NMDS (*non-metric multidimensional scaling*) (coeficiente de Jaccard). Para explorar la diversidad beta entre sitios se estimaron las tasas de recambio de especies según los índices propuestos por **Baselga** (2010). También se hallaron los valores obtenidos mediante los índices propuestos por **Carvalho, et al.** (2012) y para detectar el anidamiento se aplicó el índice NODF (*nestedness metric based on overlap and decreasing fill*) (**Almeida-Neto, et al.**, 2008). Mediante rutinas de comparación entre múltiples sitios (*multiple-site dissimilarities*, $n > 2$), se valoró el peso (participación o influencia) que tienen los componentes de la diversidad beta en los sitios estudiados. Los análisis se hicieron con los paquetes betapart 1.5.1 (**Baselga, et al.**, 2018) y vegan 2.5-6 (**Oksanen, et al.**, 2019), y el programa R versión 3.6.2 (**R Development Core Team**, 2019).

Resultados

La representatividad de las plantas con flores en los sitios de muestreo en los cuatro fragmentos de bosque seco tropical del Caribe colombiano estudiados fue alta (cobertura del muestreo, $\hat{C}_n > 0,96 = 96\%$).

Composición y estructura

Se registraron 166 especies pertenecientes a 55 familias de plantas con flores (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2945>). Las especies reconocidas son típicas de sectores secos y, en general, corresponden a flora característica del ecosistema de BST dominante en el cinturón árido pericaribeño (**Pizano & García, 2014**). En los cuatro sitios las familias con mayor riqueza específica fueron Fabaceae (28 especies), Rubiaceae (12 especies), Malvaceae (10 especies), Bignoniaceae (8 especies) y Capparaceae (8 especies). *Astronium graveolens*, *Bursera simaruba* y *Acacia polyphylla* se encontraron en todos los fragmentos, 109 especies solo en alguno de ellos, 35 en dos y 19 en tres. Especies poco frecuentes como *Homalolepis cedron* y *Pterygota colombiana* se encontraron únicamente en GUA.

Se registraron 1.977 individuos con un DAP ≥ 1 cm. El fragmento BOL presentó la mayor abundancia (534 individuos), seguido de GUA con 528 y de MAG con 495; ATL registró el valor más bajo, con 420 individuos. Las especies más abundantes fueron *Protium tenuifolium* (140 individuos), *B. simaruba* (108), *Mayna grandifolia* (90), *Capparidastrium tenuisiliquum* (88), *H. cedron* (77) y *Calycophyllum candidissimum* (76).

En general, la distribución de la abundancia de las especies (SAD) se ajustó al modelo del tipo de series logarítmicas (**Figura 2**), con mayor proporción de “especies raras” y pocas “especies de abundancia intermedia” y “muy abundantes”.

La mayoría de los individuos (80 %) se encontró en los estratos arbustivo y arbolito, la porción restante (20 %) correspondió a árboles (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2943>). El promedio de altura durante todo el estudio fue de 8,26 m. El mayor promedio de altura se dio en ATL (9,18 m), seguido de BOL (8,32 m) y GUA (8,24 m); el de menor altura fue en MAG, con 7,44 m.

La distribución de los individuos muestreados según los intervalos de las clases diametrales arrojó una curva en forma de J invertida (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2944>) en todos los sitios, con la mayor proporción de los individuos incluidos en la menor clase (valores de DAP ≤ 12 cm).

Al observar el índice de valor de importancia (IVI) de cada fragmento (**Tabla 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2946>), se evidenció que en ATL cinco de las siete especies con mayores IVI eran árboles y dos mostraban porte de arbolitos; en BOL, de nueve especies, seis eran árboles y tres arbolitos; en GUA, cinco de siete especies eran árboles, una tenía porte de arbolito y otra era una palma; en MAG,

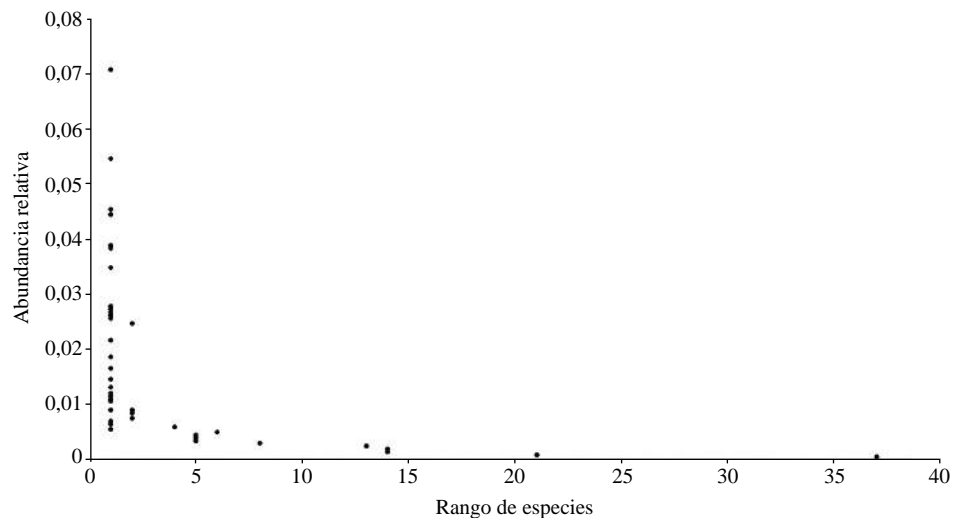


Figura 2. Distribución de abundancia de las especies registradas en fragmentos de bosque seco tropical del Caribe colombiano

cinco de nueve especies eran árboles y cuatro arbolitos. En los tres primeros fragmentos el atributo que más influyó sobre el IVI fue la cobertura relativa y, en el último, la densidad relativa.

Diversidad

Los índices de diversidad alfa utilizados mostraron un comportamiento similar en los fragmentos de BST estudiados; los fragmentos ATL, BOL y GUA presentaron mayores valores de especies efectivas y el fragmento MAG fue el ensamblaje más uniforme (**Tabla 1**).

Los índices de diversidad beta más altos se presentaron en el GUA y el MAG ($\beta_{sor}=0,87$), lo que permite afirmar que las mayores diferencias (disimilitud) se expresaron entre este par de fragmentos; la diversidad beta más baja se registró en las comunidades de ATL y BOL ($\beta_{sor}=0,49$), confirmando la similitud existente entre ellas (**Tabla 2**). Además, se observó una relación poco importante (Pearson $r_M=0,384$; $p<0,05$ y Spearman $r_M=0,2571$; $p<0,05$) entre la distancia física y la distancia biológica, lo que sugiere que el aislamiento geográfico no fue de mayor influencia en la diferenciación de la composición de estas comunidades.

Tabla 1. Abundancia e índices de diversidad, dominancia y equidad calculados para cuatro fragmentos de bosque seco tropical del Caribe colombiano

Índices	Atlántico	Bolívar	La Guajira	Magdalena
N (número de individuos)	420	534	528	495
λ (índice de Simpson)	0,05	0,05	0,10	0,07
$N0$ (número de Hill 0 = $S=q_0$)	65	74	66	43
$N1$ (número de Hill 1 = $e^{H'}=q_1$)	33,59	36,11	22,01	21,28
$N2$ (número de Hill 2 = $1/\lambda=q_2$)	21,73	20,20	9,73	14,49
H' (índice de Shannon-Wiener)	3,51	3,59	3,09	3,06
J' (índice de equidad de Pielou)	0,84	0,83	0,74	0,81
E' (índice de equidad de Hill)	0,64	0,55	0,44	0,68

Tabla 2. Índices de diversidad beta calculados en cuatro fragmentos de bosque seco tropical del Caribe colombiano

Índices	Atlántico-Bolívar	Atlántico-La Guajira	Atlántico-Magdalena	Bolívar-La Guajira	Bolívar-Magdalena	La Guajira-Magdalena
J	35	19	18	18	13	7
I_j	0,20	0,13	0,14	0,11	0,10	0,06
I_{sor}	0,50	0,29	0,33	0,25	0,22	0,12
β_{sor}	0,49	0,70	0,66	0,74	0,77	0,87
β_{sim}	0,46	0,70	0,58	0,72	0,69	0,83
β_{nes}	0,034	0,002	0,085	0,015	0,080	0,034
β_{cc}	0,663	0,830	0,80	0,852	0,875	0,931
β_{-3}	0,576	0,821	0,555	0,786	0,576	0,705
β_{rich}	0,086	0,008	0,244	0,065	0,298	0,225
NODF	0,538	0,292	0,418	0,272	0,302	0,162

J: número de especies compartidas; I_j : coeficiente cualitativo de similitud de Jaccard; I_{sor} : coeficiente cualitativo de similitud de Sørensen; β_{sor} : diversidad beta (disimilaridad de Sørensen); β_{sim} : diversidad beta de Simpson (disimilaridad debida a reemplazo); β_{nes} : diversidad beta resultante (disimilaridad debida a anidamiento); β_{cc} : diversidad beta total (disimilaridad de Jaccard); β_{-3} : reemplazo de especies relativizadas (disimilaridad debida a reemplazo); β_{rich} : diferencia de riqueza de especies relativizadas (disimilaridad debida a diferencia de riqueza); NODF: medida de anidamiento basado en superposición y decrecimiento

Según el índice de partición de la diversidad beta (β_{sor}), se presentó un fuerte patrón de recambio de especies (β_{sim}) entre los cuatro fragmentos, con valores muy bajos de anidamiento (β_{nes}); el mayor valor de recambio se dio en el GUA y el MAG ($\beta_{sim}=0,83$), y la mayor pérdida de especies ($\beta_{nes}=0,085$) se presentó en el ATL y el MAG (**Tabla 2**).

Los valores de β (disimilaridad) obtenidos mediante rutinas de comparación entre múltiples sitios evidenciaron el marcado peso, la participación o la influencia que tiene el recambio de especies sobre la diferenciación relativa en la composición de los sitios estudiados (**Figura 3**), lo que permite afirmar que la estructura de las comunidades está modelada por la rotación espacial de especies; la diversidad beta observada fue, en general, alta (>70 %).

El análisis de conglomerados evidenció que los fragmentos de BST estudiados se agruparon en tres grupos según la composición florística, con una disimilitud general entre zonas por encima del 50 % (**Figura 4**). Un primer grupo lo conformaron el ATL y el BOL, los cuales presentaron una menor disimilitud. El GUA conformó el segundo grupo y el MAG el tercero, siendo este último más disimil frente a los demás y con una menor semejanza frente al primer grupo.

Utilizando el método multiplicativo, $\gamma = \alpha \times \beta$ (**Chao, et al., 2012**), para evaluar la diferenciación relativa en la composición de especies en los fragmentos estudiados, se presentaron en esta región 2,67 comunidades virtuales distintas en la composición de especies de plantas con flores, es decir, se registró una diversidad γ (regional) 2,67 veces mayor que el promedio de los cuatro fragmentos estudiados.

Discusión

Los resultados obtenidos evidenciaron la heterogeneidad en la composición de los fragmentos de BST a lo largo de la región norte del Caribe colombiano. Con base en la literatura existente (**Pennington, et al., 2009**), la diferenciación entre los fragmentos evaluados permite conjeturar que estos han derivado de una matriz de vegetación originalmente heterogénea establecida en la región bajo el influjo de procesos favorecedores de esa condición que, afectada por la intervención antrópica, sufrió el fraccionamiento en parches con ensamblajes florísticos diferenciados en distintas condiciones ambientales (**Tscharntke, et al., 2012; Arroyo-Rodríguez, et al., 2013; Soares, et al., 2019**); sin

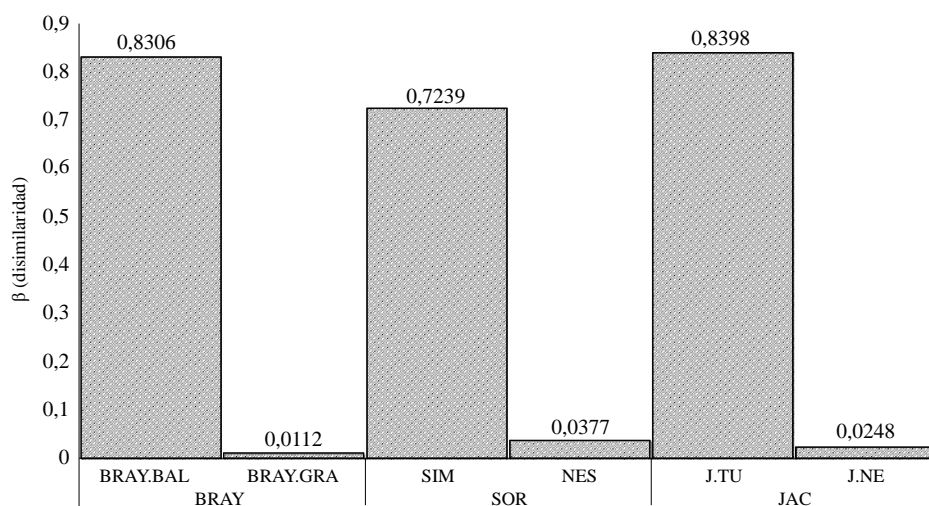


Figura 3. Valores de (disimilitud) calculados con datos cuantitativos (abundancia) aplicando el índice de Bray-Curtis (BRAY = BRAY.BAL + BRAY.GRA) y datos cualitativos (presencia o ausencia) aplicando los índices de Sørensen (SOR = SIM + NES) y Jaccard (JAC = J.TU + J.NE) en los fragmentos de bosque seco tropical del Caribe colombiano estudiados

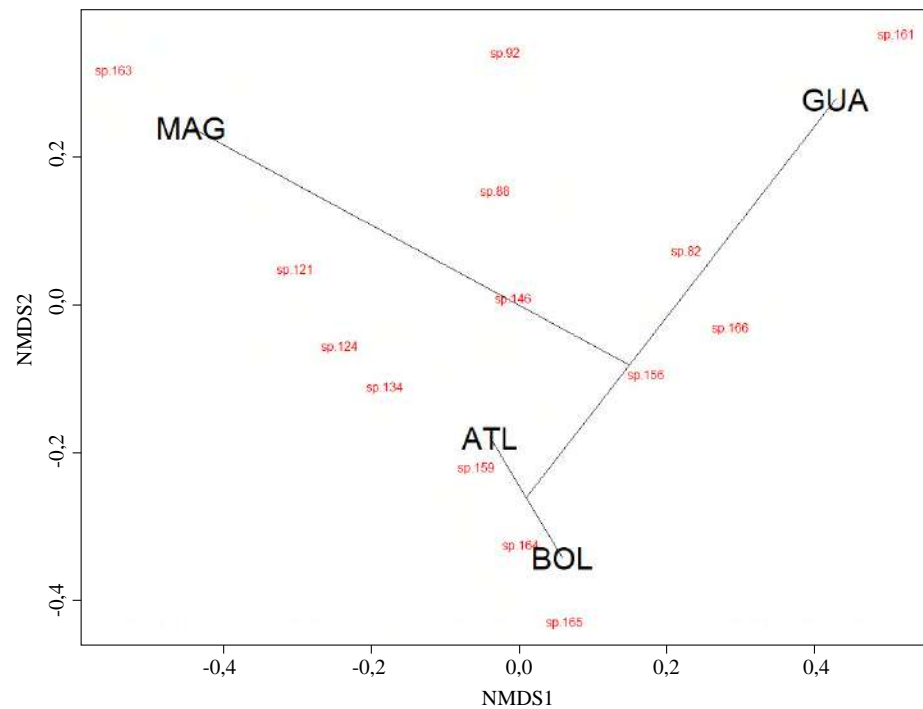


Figura 4. Agrupación de los fragmentos de bosque seco tropical del Caribe colombiano estudiados con base en la similitud de la comunidad de especies de plantas con flores (presencia o ausencia). Método de agrupación: UPGMA; ajuste cofenético: 0,8294978

embargo, sería conveniente contemplar la influencia del historial de perturbación particular de cada localidad en la modelación estructural de la vegetación. La proporción de especies en cada fragmento fue menor que en el conjunto general y la estructura de sus comunidades se ha modelado por rotación espacial. La diversidad beta observada fue alta, resultado que coincide con lo encontrado por **Castellanos-Castro & Newton (2015)** en el BST del Caribe colombiano, por **Kattan, et al. (2019)** en el BST de Colombia, y por distintos autores en bosques tropicales estacionalmente secos (**Pennington, et al., 2009; Apgaua, et al., 2014; Soares, et al., 2019**). Se reitera que la diversidad beta se ve afectada por la marcada alteración en la configuración espacial del paisaje (**Fletcher, et al., 2018**), proceso que puede ocasionar distintos cambios ambientales y generar diferenciación florística entre comunidades locales (**Arroyo-Rodríguez, et al., 2016**). En el caso del presente estudio, aunque no se sometió a comprobación, se puede inferir que la variabilidad ambiental en el paisaje influyó sobre la composición de las comunidades más que el impulso de las características locales en la composición particular de cada fragmento. Se sabe que los patrones de diversidad beta se relacionan con los procesos que operan a escala local y regional dependiendo de la configuración espacial regional y de las comunidades de plantas (**Arroyo-Rodríguez, et al., 2013**), hecho observado en otros ambientes secos (**De Jesus, et al., 2018**). Con base en los resultados, es posible concluir, al igual que otros autores (**Soares, et al., 2019**), que la diversidad beta es la que más contribuye a la diversidad regional, generando el patrón de muchas especies restringidas localmente y con conjuntos distintos de especies exclusivas en cada fragmento.

En los cuatro fragmentos las especies que representaron más de la mitad del índice de valor de importancia (mayores IVI) correspondieron a aquellas con las características del bosque seco tropical americano. Entre ellas se destacan *B. simaruba* y *C. candidissimum*, reconocidas como especies de amplia distribución en el Neotrópico y constantes en los ensamblajes de este ecosistema. Algunas otras registradas en los fragmentos estudiados y en sitios adyacentes son generalistas ecológicos de amplia distribución en los bosques

secos, pero poco abundantes localmente (*Maclura tinctoria*, *Guazuma ulmifolia* y *Cordia alba*), lo que coincide con lo reportado por **Dryflor** (2016) para el bosque seco tropical estacional americano.

Dada la alta tasa de recambio en los fragmentos, pocas especies fueron de amplia distribución, en tanto que muchas estaban confinadas a lugares definidos, lo que denota un patrón considerado propio de los bosques tropicales y de los secos en particular (**Soares, et al.**, 2019). Con un bajo grado de uniformidad, el modelo de distribución de abundancias (SAD) general podría ajustarse al tipo de series logarítmicas (**Ulrich, et al.**, 2020), en el que aparecen de forma proporcionalmente menor las especies de amplia distribución en comparación con las espacialmente restringidas, lo que se vería incentivado por la heterogeneidad ambiental (**Jenkins, et al.**, 2018). Se admite que el comportamiento de la distribución de la abundancia local puede reflejar una complejidad en la que contrastan las expresiones de cada fragmento específico según el influjo de factores locales y los patrones comunitarios regionales (**Ulrich, et al.**, 2016).

La diferencia de la composición florística entre los fragmentos podría responder a la distancia: el BOL (El Ceibal) y el ATL (El Palomar), separados por menos de 50 km, fueron menos disímiles comparados con el MAG (Tayrona) y el GUA (Miramar), separados entre sí por más de 50 km. La presencia de este patrón de decaimiento de la disimilitud se ve respaldada por una diversidad beta menor entre zonas consecutivas (**Rosabal, et al.**, 2016), hecho atribuible a la similitud de las condiciones ambientales en sitios cercanos o a la separación de las especies con diferentes características fisiológicas. La diversidad beta puede verse influida por la distancia geográfica o ambiental y la composición de especies puede variar en las comunidades debido a diferencias ambientales entre sitios o a limitaciones espaciales e históricas (**De Jesús, et al.**, 2018). En este caso en particular, los resultados arrojados por la prueba de Mantel no evidenciaron una relación entre los dos elementos, lo que sugiere que la distancia contribuye en menor medida a la diferencia en la composición de las comunidades.

Se observó una diferencia entre el MAG (Tayrona) y el resto de fragmentos, en especial en cuanto a la riqueza específica, que se explicaría por factores que influyen en la variación estacional en la disponibilidad de agua (**Castellanos-Castro & Newton**, 2015) y generan un enclave seco en el flanco noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, lo que aunado a la poca conexión con los otros sitios, determina la preponderancia de impulsores ambientales de la diversidad beta, ya que en hábitats con fuertes filtros ambientales solo un pequeño número de especies del grupo regional logra tolerar las duras condiciones, por lo que la estructuración de las comunidades de plantas puede verse determinada por procesos de selección de nicho, como se ha señalado para otros grupos biológicos (**Audino, et al.**, 2017). En el fragmento GUA (Miramar) dominó *P. tenuifolium*, especie perennifolia, rasgo este que se ha observado en varias especies presentes en el sitio. Se ha reportado la presencia de bosques secos con especies de hoja perenne en algunas regiones neotropicales (**Fajardo, et al.**, 2005) y la adaptación a la pobreza de nutrientes en los suelos de las laderas costeras de la Sierra Nevada explicaría su presencia allí, así como en algunas regiones de Venezuela.

Las pocas muestras de especies reconocidas como útiles en los sitios estudiados reflejarían el tipo de degradación a que han sido sometidos. Por ejemplo, la escasez de muestras de especies consideradas valiosas por su madera como la caoba (*Swietenia macrophylla* King), el cedro (*Cedrela odorata* L.), el carrito (*Aspidosperma polyneuron* Müll.Arg.) y el nazareno (*Peltogyne purpurea* Pittier) (**Cárdenas & Salinas**, 2007), y la palma amarga (*Sabal mauritiiiformis* (H. Karst.) Griseb. y H. Wendl), usada en la construcción de techos, cuya limitada presencia o total ausencia en los transectos analizados puede atribuirse a la extracción selectiva durante largo tiempo. Si bien la evaluación de la degradación de un bosque requiere el uso de una metodología apropiada, en este caso la ausencia de algunas clases diamétricas, la baja densidad o desaparición de especies de valor comercial y la mayor densidad y dominancia de especies de poco valor comercial, permiten definirlos como bosque degradados (**Vásquez-Grandón, et al.**, 2018).

El estudio de la diversidad beta cobra importancia porque ofrece respaldo para la planeación de estrategias de conservación biológica. La interpretación acertada de los patrones de diversidad en este paisaje, donde la fragmentación del hábitat a causa de las actividades humanas compromete la conservación de las comunidades biológicas, permite proyectar acciones de manejo o de intervención con mayor grado de certidumbre (Si, *et al.*, 2015). Dado que la diversidad beta fue la que más contribuyó a la diversidad total, todos los fragmentos estudiados merecen catalogarse como objetivos para la conservación. Además de proteger los parches estudiados, la gran diferencia en la composición de las especies sugiere la necesidad de integrar más fragmentos, independientemente de su extensión (Soares, *et al.*, 2019), para mantener la diversidad en proporción con la escala del paisaje (Arroyo-Rodríguez, *et al.*, 2009) en los bosques secos del Caribe colombiano.

Información suplementaria

Figura 1S. Distribución de individuos de acuerdo con los estratos para la vegetación registrada en cuatro fragmentos de BST del caribe colombiano. Vea la figura 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2943>

Figura 2S. Distribución de individuos en clases diamétricas (intervalos de DAP cm) para la vegetación registrada en fragmentos de BST del caribe colombiano. Vea la figura 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2944>

Tabla 1S. Lista de especies de plantas con flores registradas en cuatro fragmentos de bosque seco tropical del caribe colombiano. Incluye las familias según APG IV (2016). ATL = Atlántico, BOL = Bolívar, GUA = La Guajira y MAG = Magdalena. [No. UTMC de la serie E. Carbonó (EC)]. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2945>

Tabla 2S. Lista de especies de plantas con flores de mayor IVI, registradas en cuatro fragmentos de BST del caribe colombiano. FER= frecuencia relativa; DER= dominancia relativa; COR= cobertura relativa. Vea la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1267/2946>

Agradecimientos

A los grupos de investigación en Fitotecnia del trópico y Ecología neotropical de la Universidad del Magdalena, por su colaboración y asesoría en la elaboración del estudio, y a la Vicerrectoría de Investigación, por el apoyo del equipo de trabajo y la financiación a través de la convocatoria FONCIENCIAS 2017. A Irma Quintero, por la lectura crítica del manuscrito y los comentarios, y a los evaluadores anónimos, por sus contribuciones al mejoramiento del manuscrito.

Contribución de los autores

HG-Q, ECDLH, WBP participaron en el proceso de conceptualización de la revisión, el tratamiento de la información y la escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Declaramos que todos participamos por igual en el desarrollo de la investigación y en la elaboración del manuscrito y que no tenemos ningún conflicto de intereses frente a su publicación.

Referencias

- Aldana-Domínguez, J., Montes, C., Martínez, M., Medina, M., Hahn, J., Duque, M. (2017). Biodiversity and Ecosystem Services Knowledge in the Colombian Caribbean: Progress and Challenges. *Tropical Conservation Science*. **10**: 1-41.
- Almeida-Neto, M., Guimarães, P., Guimarães Jr.P., Loyolaand, R., Ulrich, W. (2008). A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement. *Oikos*. **117**: 1227-1239.

- Anderson, M. J., Crist, T.O., Chase, J.M., Vellend, M., Inouye, B.D., Freestone, A.L., Sanders, N.J., Cornell, H.V., Comita, L.S., Davies, K.F., Harrison, S.P., Kraft, N.J.B., Stegen, J.C., Swenson, N.G. (2011). Navigating the multiple meanings of β diversity: a roadmap for the practicing ecologist. *Ecology Letters*. **14**: 19-28.
- Apgaua, D.M.G., dos Santos, R.M., Pereira, D.G.S., de Oliveira Menino, G.C., Pires, G.G. y Fontes, M.A.L., Tng, D.Y.P. (2014). Beta-diversity in seasonally dry tropical forests (SDTF) in the Caatinga Biogeographic Domain, Brazil, and its implications for conservation. *Biodivers. Conserv.* **23**: 217-232.
- Arroyo-Rodríguez, V., Pineda, E., Escobar, F., Benítez-Malvido, J. (2009). Value of small patches in the conservation of plant-species diversity in highly fragmented rainforest. *Conserv. Biol.* **23** (3): 729-739.
- Arroyo-Rodríguez, V., Rös, M., Escobar, F., Melo, F.P.L., Santos, B.A., Tabarelli, M., Chazdon, R. (2013). Plant beta-diversity in fragmented rain forests: testing floristic homogenization and differentiation hypotheses. *Journal of Ecology*. **101**: 1449-1458.
- Arroyo-Rodríguez, V., Melo, F.P.L., Martínez-Ramos, M., Bongers, F., Chazdon, R.L., Meave, J.A., Norden, N., Santos, B.A., Leal, I.R., Tabarelli, M. (2016). Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: new insights from forest succession, forest fragmentation and fragmentation and landscape ecology research. *Biological Reviews*. **92** (1): 326-340. Doi: 10.1111/brv.12231
- Audino, L.D., Murphy, S.J., Zambaldi, L., Louzada, J., Comita, L.S. (2017). Drivers of community assembly in tropical forest restoration sites: role of local environment, landscape, and space. *Ecol Appl.* **27** (6): 1731-1745.
- Baselga, A. (2010). Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*. **19**: 134-143.
- Baselga, A. (2012). The relationship between species replacement, dissimilarity derived from nestedness, and nestedness. *Global Ecology and Biogeography*. **21**: 1223-1232.
- Baselga, A. & Leprieur, F. (2015). Comparing methods to separate components of beta diversity. *Methods in Ecology and Evolution*. **6**: 1069-1079.
- Baselga, A., Orme, D., Villeger, S., De Bortoli, J., Leprieur, F., Logez, M., Henriques-Silva, R. (2018). betapart: Partitioning Beta Diversity into Turnover and Nestedness Components. R package version 1.5.1. <https://CRAN.R-project.org/package=betapart>
- Calderón-Patrón J.M., Goyenechea, I., Ortiz-Pulido, R., Castillo-Cerón, J., Manriquez, N., Ramírez-Bautista, A., Rojas-Martínez, A.E., Sánchez-Rojas, G., Zuria, I., Moreno, C.E. (2016). Beta Diversity in a Highly Heterogeneous Area: Disentangling Species and Taxonomic Dissimilarity for Terrestrial Vertebrates. *PLoS ONE*. **11** (8): e0160438.
- Carbonó-Delahoz, E. & García-Q., H. (2010). La vegetación terrestre en la ensenada de Neguanje, Parque Nacional Natural Tayrona (Magdalena, Colombia). *Caldasia*. **32** (2): 235-256.
- Cárdenas, D. & Salinas, N. (eds.). (2007). Libro Rojo de Plantas de Colombia, Volumen 4. - Especies Maderables Amenazadas. Primera Parte. Serie de Libros rojos de especies amenazadas para Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial- Instituto Alexander Von Humboldt- INVEMAR - Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia- Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. 232 pp.
- Carvalho, J.C., Cardoso, P., Gómes, P. (2012). Determining the relative roles of species replacement and species richness differences in generating beta-diversity patterns. *Global Ecology Biogeography*. **21**: 760-771.
- Carvalho, J.C., Cardoso, P., Borges, P.A.V., Schmera, D., Podani, J. (2013). Measuring fractions of beta diversity and their relationship to nestedness. A theoretical and empirical comparison of novel approaches. *Oikos*. **122**: 825-834.
- Castellanos-Castro, C. & Newton, A.C. (2015). Environmental heterogeneity influences trajectories in colombian seasonally Dry Tropical Forests. *Biotropica*. **47** (6): 660-671.
- Chao, A. & Jost, L. (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation: standardizing samples by completeness rather than size. *Ecolog.* **93** (12): 2533-2547.
- Chao, A., Chiu, C.H., Hsieh, T.C. (2012). Proposing a resolution to debates on diversity partitioning. *Ecology* **39**: 2037-2051. Doi: 10.1890/11-1817.1
- Chao, A., Ma, K.H., Hsieh, T.C. (2016). iNEXT (iNterpolation and EXTrapolation) Online. http://chao.stat.nthu.edu.tw/wordpress/software_download/ (2018). Bird diversity along a gradient of fragmented habitats of the Cerrado. *An. Acad. Bras. Cienc.* **90** (1): 123-135.
- Dick, C.W. & Pennington, R.T. (2019). History and Geography of Neotropical tree diversity. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* **50**: 12.1-12.23.

- Dryflor, Banda, K., Delgado, S.A., Dexter, K.G., Linares, P.R., Oliveira, F.A., Pennington, T.** (2016). Plant diversity patterns in Neotropical dry forests and their conservation implications. *Science*. **353** (6306): 1383-1387.
- Fajardo, L., Gonzáles, V., Nassar, J. Lacabana, P., Portillo, C.A., Carrasquel, F., Rodríguez, J.P.** (2005). Tropical dry forests of Venezuela: Characterization and current conservation status. *Biotropica*. **37**: 531-546.
- Fletcher, R.J., Didham, R.K., Banks-Leite, C., Barlow, J., Ewers, R.M., Rosindell, J., Holt, R.D., Gonzalez, A., Pardini, R., Damschen, E.I., Melo, F.P.L., Ries, L., Prevedello, J.A., Tschardtke, T., Laurance, W.F., Lovejoy, T., Haddad, N.M.** (2018). Is habitat fragmentation good for biodiversity? *Biological Conservation*. **226**: 9-15.
- García-Martínez, S. & Mercado-Gómez, J.D.** (2017). Diversidad de briófitos en fragmentos de bosque seco tropical, Montes de María, Sucre, Colombia. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. **88**: 824-831.
- González-M., R., García, H., Isaacs, P., Cuadros, H., López-Camacho, R., Rodríguez, N., Pérez, K., Mijares, F., Castaño-Naranjo, A., Jurado, R., Idárraga-Piedrahíta, A., Rojas, A., Vergara, H., Pizano, C.** (2018). Disentangling the environmental heterogeneity, floristic distinctiveness and current threats of tropical dry forests in Colombia. *Environ. Res. Lett.* **13**: 045007.
- Herazo, F., Gómez, J., Mendoza, H.** (2017). Estructura y Composición Florística del bosque seco tropical en los Montes de María (Sucre-Colombia). *Ciencia en Desarrollo*. **8** (1): 71-82.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt IAvH.** (1998). El Bosque seco Tropical (Bs-T) en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá. 24 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.** (2015b). Atlas climatológico de Colombia – Interactivo – año 2015, Volumen 1. Bogotá, D. C.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.** (2015a). Mapas de coberturas de la tierra, Período 2010-2012. Escala 1:100.000. Catálogo de mapas de la plataforma del Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC, Ministerio del Medio Ambiente y desarrollo Sostenible. <http://www.siac.gov.co/catalogo-de-mapas>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt - IAvH, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives De Andrés” - INVEMAR, Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico - IIAP.** (2007). Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia. Bogotá, D. C, 276 pp.
- Jenkins M.F., White, E.P., Hurlbert, A.H.** (2018). The proportion of core species in a community varies with spatial scale and environmental heterogeneity. *PeerJ*. **6**: e6019.
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*. **113** (2): 363-375.
- Kattan, G., Sánchez, C., Vélez, C., Ramírez, L., Celis, M.** (2019). Beta diversity and knowledge gaps of Colombia's dry forest: implications for their conservation. *Caldasia*. **41** (1): 1-11.
- Koleff, P., Gaston, K., Lennon, J.** (2003). Measuring beta diversity for presence-absence data. *Journal of Animal Ecology*. **72**: 367-382.
- Legendre, P. & De Cáceres, M.** (2013). Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecology Letters*. **16**: 951-963.
- Lücking, R., Moncada B., Martínez-Habibe M.C., Salgado-Negret B.E., Celis M., Rojas-Zamora, O., Rodríguez-M., G.M., Brokamp, G., Borsch, T.** (2019). Lichen diversity in colombian caribbean dry forest remnants. *Caldasia*. **41** (1): 194-214.
- Marulanda, L.O., Uribe, A., Velásquez, P., Montoya, M., Idárraga, A., López, M.C., López, J.M.** (2003). Estructura y composición de la vegetación de un fragmento de bosque seco en San Sebastián, Magdalena (Colombia) I. Composición de plantas vasculares. *Actualidades Biológicas*. **25**: 17-30.
- Mendoza-C., H.** (1999). Estructura y riqueza florística del bosque seco tropical de la región caribe y el valle del río Magdalena, Colombia. *Caldasia*. **21** (1): 70-94.
- Miles, L., Newton, A.C., De Fries, R.S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V., Gordon, J.E.** (2006). A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*. **33** (3): 491-505.
- Moreno, C.E., Calderón-Patrón, J.M., Arroyo-Rodríguez, V., Barragán, F., Escobar, F., Gómez-Ortiz, Y., Martín-Regalado, N., Martínez-Falcón, A.P., Martínez-Morales, M.A., Mendoza, E., Ortega-Martínez, I.J., Pérez-Hernández, C.X., Pineda, E., Pineda-**

- López, R.C., Ríos-Díaz, L., Rodríguez, P., Rosas, F., Schondube, J.E., Zuria, I.** (2017). Measuring biodiversity in the Anthropocene: a simple guide to helpful methods. *Biodivers Conserv.* **26**: 2993-2998.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., McGlenn, D., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Szoecs, E., Wagner, H.** (2019). *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.5-6. <https://cran.r-project.org/package=vegan>
- Olascuaga-Vargas, D., Mercado-Gómez, J., Sánchez-Montaño, L.** (2016). Análisis de la vegetación sucesional en un fragmento de bosque seco tropical en Toluviéjo-Sucre (Colombia). *Colombia Forestal.* **19** (1): 23-40.
- Patiño, R. & Rangel-Ch., O.** (2011). La vegetación boscosa en la Estación de Primates Colosó-Sucre. In O. Rangel-Ch (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica XI Patrones de la estructura y de la riqueza de la vegetación en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Medio Ambiente. pp. 253-268.
- Pennington, R.T., Lavin, M., Oliveira-Filho, A.** (2009). Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: perspectives from seasonally dry tropical forests. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics.* **40**: 437-457.
- Pizano, C. & García, H.** (Eds.) (2014). *El Bosque Seco Tropical en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D.C., Colombia. 353 p.
- Pizano, C., González, R., González, M.F., Castro-Lima, F., López, R., Rodríguez, N., Idárraga-Piedrahíta, A., Vargas, W., Vergara-Varela, H., Castaño-Naranjo, A., Devia, W., Rojas, A., Cuadros, H., Toro, J.L.** (2014). Las plantas de los bosques secos de Colombia. En C. Pizano & H. García (eds.). *El Bosque Seco Tropical en Colombia*. 350 p. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D.C., Colombia.
- Podani, J. & Schmera, D.** (2016). Once again on the components of pairwise beta diversity. *Ecological Informatics.* **32**: 63-68.
- Portillo-Quintero, C. & Sánchez-Azofeifa, A.** (2010). Extent and conservation of tropical dry forests in the Americas. *Biological Conservation.* **143**: 144-155.
- Portillo-Quintero, C., Sánchez-Azofeifa, A., Calvo-Alvarado, J., Quesada, M., do Espírito Santo, M.M.** (2015). The role of tropical dry forests for biodiversity, carbon and water conservation in the neotropics: lessons learned and opportunities for its sustainable management. *Reg Environ Change.* **15**: 1039-1049.
- R Development Core Team.** (2019). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.r-project.org/>
- Rangel-Ch., J.O.** (2012). La vegetación de la región caribe de Colombia: composición florística y aspectos de la estructura. En: Rangel-Ch., J.O. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica XII: La región Caribe de Colombia*, Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales. p. 365-476.
- Rangel-Ch., J. O. & Lozano-C., G.** (1986). Un perfil de vegetación entre La Plata (Huila) y el volcán Puracé. *Caldasia.* **14** (68-70): 533-547.
- Rangel-Ch., J. O. & Velásquez, A.** (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En: J.O. Rangel-Ch., Lowry, P. y Aguilar, M. (eds.). *Colombia: diversidad biótica II*: p. 59-87. Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá.
- Rangel-Ch, O., Cantillo, H.E., Garay, H.** (2011). La estructura y el patrón de riqueza de vegetación en localidades del departamento de Córdoba. In O. Rangel-Ch (Ed.), *Colombia Diversidad Biótica XI Patrones de estructura y de riqueza de la vegetación en Colombia*. Bogotá, Colombia: Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Medio Ambiente. p. 203-251.
- Rodríguez G., Banda-R., k., Reyes-B., S., Estupiñán-González, A.** (2012). Lista comentada de las plantas vasculares de bosques secos prioritarios para la conservación en los departamentos de Atlántico y Bolívar (Caribe colombiano). *Biota Colombiana.* **13** (2): 7-39.
- Rosabal, D., Burgaz, A.R., Reyes, O.J.** (2016). Analizando la diversidad beta en ensamblajes de líquenes en un gradiente vertical sobre cinco especies de forófitos en la pluvisilva montana de la Gran Piedra, Cuba. *Bot. complut.* **40**: 23-33.
- Ruiz, J. & Fandiño, M.** (2009). Estado del bosque seco tropical e importancia relativa de su flora leñosa, islas de la vieja Providencia y Santa Catalina, Colombia, Caribe suroccidental. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* **23** (126): 5-15.
- Sanmartín-Sierra D.R., Angarita-Hernández D.F., Mercado-Gómez J.D.** (2016). Estructura y composición florística del bosque seco tropical de Sanguaré-Sucre (Colombia). *Ciencia en Desarrollo.* **7** (2): 43-56.

- Si, X., Baselga, A., Ding, P.** (2015). Revealing Beta-Diversity Patterns of Breeding Bird and Lizard Communities on Inundated Land-Bridge Islands by Separating the Turnover and Nestedness Components. *PLoS ONE*. **10** (5): e0127692.
- Soares, C.J.R.S., Sampaio, M.B., Santos-Filho, F.S., Martins, F.R., dos Santos, F.A.M.** (2019). Patterns of species diversity in different spatial scales and spatial heterogeneity on beta diversity. *Acta Botanica Brasilica*. **34** (1): 9-16. DOI: 10.1590/0102-33062019abb0054
- Tscharntke, T., Tylianakis, J.M., Rand, T.R., Didham, R.K., Fahrig, L., Batáry, P., ... Westphal, C.** (2012). Landscape moderation of biodiversity patterns and processes - eight hypotheses. *Biol. Rev.* **87**: 661-685.
- Ulrich, W., Soliveres, S., Thomas, A.D., Dougill, A.J., Maestre, F.T.** (2016). Environmental correlates of species rank – abundance distributions in global drylands. *Perspect. Plant Ecol. Syst.* **20**: 56-64.
- Ulrich, W., Matthews, T.J., Kubota, Y.** (2020). Constraints on the distribution of species abundances indicate universal mechanisms of community assembly. *Ecological Research*, 1-10. Doi: 10.1111/1440-1703.12095
- Vásquez-Grandón, A., Donoso, P., Gerding, V.** (2018). Forest Degradation: When Is a Forest Degraded? *Forests*. **9** (11):726. Doi: 10.3390/f9110726
- Villarreal H., Álvarez, M., Córdoba, M., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H. Ospina, M., Umaña, A.** (2006). Plantas. En *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*, segunda edición, p. 69-90. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia.

Artículo original

Análisis de la producción de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante el ciclo de cosechas en invernadero con diferentes láminas de riego

Analysis of the production of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in the greenhouse with different irrigation levels during the harvest cycle

✉ Javier Álvarez-Herrera¹, ✉ Gerhard Fischer^{2,*}, ✉ Javier Enrique Vélez³

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

² Consultor independiente, Investigador emérito de Colciencias, Bogotá, Colombia

³ Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

La demanda de frutas exóticas, entre ellas la uchuva, se ha venido incrementando debido a sus excelentes propiedades nutricionales y sus altos contenidos de vitaminas A, B y C y de minerales como el calcio, el hierro y el fósforo, ideales para fortalecer el sistema inmunitario. Los frutos de la uchuva tienden a rajarse, por lo que debe suministrárseles agua en cantidades adecuadas. No se conoce el efecto de dicho riego bajo condiciones de invernadero, por lo que se evaluó su manejo en el marco de un diseño completamente al azar utilizando cuatro láminas de riego (0,7, 0,9, 1,1 y 1,3 de la evaporación del tanque de clase A) y nueve repeticiones, es decir, 36 unidades experimentales. Las plantas se cultivaron en materas de 20 L con sustrato de turba rubia. Con la lámina de riego de 1,3 se obtuvo el mayor número de frutos y la mayor producción por planta a partir de la tercera recolección quincenal en el ciclo de las cosechas. La producción en invernadero fue menor cuando las plantas se sometieron a estrés hídrico (láminas de riego de 0,7 y 0,9) y debido a las altas temperaturas bajo cubierta. En las últimas cosechas la cantidad de frutos pequeños fue la más abundante. La relación entre cáliz y fruto aumentó conforme avanzó el ciclo de las cosechas. Independientemente de la lámina de riego, cuanto mayor era el tamaño del fruto, mayor la incidencia del rajado.

Palabras clave: Solanaceae; Fruta exótica; Tamaño de fruto; Masa fresca; Rajado de fruto; Relación cáliz/fruto.

Abstract

The demand for exotic fruits has been increasing due to their excellent nutritional properties. One of these is the Cape gooseberry, which has high contents of vitamins A, B, and C, as well as minerals such as calcium, iron, and phosphorous, ideal for strengthening the immune system. Cape gooseberry fruits tend to crack and, therefore, they must have an adequate supply of water. However, the effect of water supply on their production in greenhouse conditions during the harvest periods is not well known. Given the importance of irrigation management to produce Cape gooseberries, we used four irrigation levels in a completely randomized design (0.7, 0.9, 1.1, or 1.3 of the evaporation of a class A tank) with nine repetitions representing 36 experimental units. Plants were grown in 20 L pots using blonde peat as a substrate. The irrigation level of 1.3 generated the highest number of fruits and the highest production per plant as from the third biweekly harvest. The production decreased when the plants were subjected to water stress (water levels of 0.7 and 0.9) under the high temperatures of protected cultivation. In the last harvests, small fruits were the most abundant. The calyx/fruit ratio increased as the harvest cycles progressed. Regardless of the irrigation level, the larger the fruit, the greater the incidence of its cracking.

Keywords: Solanaceae; Exotic fruit; Fruit size; Fresh weight; Fruit cracking; Calyx/fruit ratio.

Citación: Álvarez-Herrera J, Fischer G, Vélez JE. Análisis de la producción de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante el ciclo de cosechas en invernadero con diferentes láminas de riego. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):109-121, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1239>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Gerhard Fischer; gerfischer@gmail.com

Recibido: 18 de junio de 2020

Aceptado: 3 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

El mercado mundial de frutas tropicales frescas es cada vez más importante (**Moreno-Miranda, et al., 2020**), sobre todo la de aquellas como la uchuva debido a sus excelentes propiedades nutricionales y su alto contenido de vitaminas A, B y C y de minerales como el calcio, el hierro y el fósforo (**Fischer, et al., 2014**), ideales para fortalecer el sistema inmunitario, especialmente frente a enfermedades respiratorias. Según **Agronet (2020)**, en Colombia el área sembrada del cultivo de uchuva aumentó entre el 2010 y 2018 de 745 a 1.311 ha, aunque el rendimiento tendió a disminuir, pues pasó de 16,1 a 12,3 t ha⁻¹, lo que constituye una reducción del 23,63 %, probablemente por la falta de agua, el manejo inadecuado de la fertilización y los excesivos costos del control de plagas y enfermedades, lo que dificulta las aplicaciones oportunas, así como los problemas de calidad de los frutos como el cuarteamiento (**Fischer & Melgarejo, 2020; Fischer & Miranda, 2012**).

Las condiciones del clima y el suelo en el sitio de cultivo y el manejo de la plantación afectan el desarrollo de la planta, la duración de los estados fenológicos, y los periodos y el volumen de la cosecha (**Fischer, et al., 2018, 2016**). Además, en la última década la variación del clima y el cambio climático perturban el crecimiento y la producción de las plantas cultivadas con un gran impacto en la seguridad alimentaria (**Dhankher & Foyer, 2018**). Asimismo, en la reducción de los rendimientos de la uchuva en Colombia ha contribuido en gran medida la incidencia de *Fusarium oxysporum* (**Villareal-Navarrete, et al., 2017**). En este contexto, el estudio de los cultivos bajo condiciones en las que hay control de los factores ecofisiológicos, como el agua, es de suma importancia (**Aldana, et al., 2014; Sánchez-Reinoso, et al., 2019; Cleves, et al., 2016**), especialmente en las zonas andinas altas, donde se concentra la producción de uchuva y el nivel del calentamiento global tiende a ser más acusado que en las zonas tropicales más bajas (**Marengo, et al., 2011**).

La planta de uchuva se desarrolla como un semiarbolito semipermanente y su hábito de crecimiento es indeterminado, es decir, las fases vegetativas y reproductivas se traslapan (**Ramírez, et al., 2013**), llegando a alturas entre 1 y 1,5 m. Toda la parte aérea de la planta desarrolla una densa pubescencia, especialmente en las hojas, que son simples, corazonadas y alternas (**Fischer & Melgarejo, 2020**). Las flores solitarias desarrollan una corola tubular amarilla, en tanto que el cáliz que cubre el fruto durante todo su desarrollo consta de cinco sépalos persistentes (similares a hojas modificadas) (**Nocetti, et al., 2020**), de unos 4 a 5 cm de largo, los cuales protegen el fruto contra plagas, la luz UV, la lluvia, el granizo y las temperaturas bajas y se transforman en una cáscara translúcida a medida que el fruto alcanza su madurez (**Fischer & Miranda, 2012**), pues transfieren sus carbohidratos al fruto (**Fischer, et al., 2015**). El fruto de la uchuva es botánicamente una baya de color amarillo anaranjado cuando está maduro, un diámetro entre 1,25 y 2,5 cm y un peso entre 4 y 10 g, y contiene hasta 350 semillas (**Fischer, et al., 2007; Fischer & Melgarejo, 2020**).

En los cultivos comerciales y bajo las condiciones agroecológicas ideales, los frutos de uchuva necesitan entre 60 y 80 días para madurar (**Ramírez, et al., 2013**) y una vez el cáliz del fruto se torna amarillo, se cosecha. Esta recolección es constante y puede alcanzar entre 12 y 18 meses dependiendo del ambiente agroecológico (**Fischer, et al., 2014**). **Angulo (2005)** evaluó la producción de plantas de uchuva en invernadero y a campo abierto y encontró que, a lo largo de 40 semanas, la mayor producción se presentó en el invernadero (1,3 kg/planta) y la cosecha alcanzó su máximo a las 17 semanas, en tanto que a campo abierto la producción comenzó ocho semanas después y llegó a su máximo en la semana 23 (1,0 kg/planta). Asimismo, **Fischer, et al. (2007)** encontraron que los máximos de producción a lo largo del ciclo de cosecha eran menores en zonas frías que en lugares donde la temperatura es más alta. **Gordillo, et al. (2004)**, por su parte, probaron diferentes láminas de riego en el cultivo de uchuva y encontraron que con un mayor coeficiente de riego (1,2) aumentó el rendimiento de frutos por planta independientemente de los diferentes tratamientos de fertilización aplicados, en tanto que bajo condiciones de invernadero y con un coeficiente de riego neto de 1,3 y 100 kg ha⁻¹ de Ca, tanto la producción como el porcentaje de frutos cuarteados disminuyeron (**Álvarez, et al., 2015**).

Álvarez, *et al.* (2012, 2014) encontraron que los frutos de uchuva se cuartejan menos con un adecuado suministro de agua. No se conoce el efecto de este factor en la producción de uchuva durante todo el ciclo de las cosechas en plantas sembradas en invernadero, pero sí se sabe que de todos los recursos que una planta exige para su crecimiento, su desarrollo y sus funciones, el agua es lo más importante (Taiz, *et al.*, 2015), por lo que un déficit hídrico reduce tanto la actividad meristemática como el alargamiento radicular, lo cual afecta el crecimiento y la producción de la planta y la calidad de los frutos (Vélez & Álvarez, 2012).

En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes láminas de riego en la producción y el cuarteamiento de los frutos de uchuva durante el ciclo de las cosechas, información que es muy importante para tomar decisiones sobre el manejo del cultivo, con el propósito de incrementar la producción y la calidad de los frutos.

Materiales y métodos

El experimento se desarrolló en un invernadero de cubierta plástica de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, ubicado a una altitud de 2.556 m s.n.m. La temperatura promedio del invernadero fue de 18 °C y la humedad relativa de 60 %.

Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos mediante el uso de sendas láminas de riego con coeficientes netos de 0,7, 0,9, 1,1 y 1,3 de la evaporación de un tanque evaporímetro de clase A. Cada tratamiento se repitió nueve veces, es decir, hubo 36 unidades experimentales (UE). Cada UE estaba compuesta por dos plantas de uchuva para un total de 72 plantas, las cuales se sembraron en materas de 32 cm de diámetro y 36 cm de profundidad. El sustrato utilizado fue turba rubia.

Se sembró material vegetal de la especie *Physalis peruviana* L., ecotipo Colombia. Las plantas, propagadas por semilla, se trasplantaron a las 16 semanas a una distancia de 2 m entre plantas y 2 m entre surcos, y se realizaron las labores tradicionales (manejo fitosanitario, podas y cosecha) que se aplican en los cultivos comerciales de las zonas productoras. Para la fertilización se aplicaron dosis (en kg ha⁻¹) de 150 de N, 220 de P₂O₅, 150 de K₂O, 60 de MgO, 40 de S, 1 de B, 3 de Zn, 2 de Cu, y 0,5 de Mn, fraccionadas desde el momento de la siembra: primero en dos aplicaciones trimestrales y luego en tres aplicaciones bimensuales. Se utilizó el sistema de tutorado en V alto (Angulo, 2005).

Las láminas de riego se aplicaron mediante un sistema por goteo (dos goteros por planta con un caudal de 4 L h⁻¹). Una vez sembradas las plantas, se aplicaron en corona las diferentes dosis de calcio establecidas, incorporándolas al sustrato y repartidas mensualmente debido a la poca movilidad que presenta este elemento en el suelo. Se calculó la aplicación de agua con base en la siguiente fórmula:

$$\text{Lámina} = \frac{\text{Etp} * C * A}{\eta_r} \quad (1),$$

donde Etp corresponde a la evapotranspiración en mm medida en el tanque evaporímetro, C al coeficiente multiplicador según tratamientos, A al área de la matera (254,4 cm²), y η_r a la eficiencia del riego por goteo (0,9).

Las diferentes variables de respuesta se midieron con los frutos obtenidos de ocho cosechas realizadas quincenalmente, usando como índice de madurez el color 5 y 6 del cáliz (Icontec, 1999). La primera cosecha se hizo en la semana 17 después del trasplante (ddt).

Las variables de respuesta evaluadas fueron la producción total de frutos por planta (g) durante todo el ciclo de producción, para lo cual se cosecharon los frutos cada 15 días y se pesaron en una balanza electrónica Acculab VIC 612 de 0,01g de precisión (Sartorius, Madrid); se determinó la masa fresca promedio del fruto (sin cáliz) durante cada cosecha tomando la producción total y dividiéndola por el número total de frutos cosechados en cada planta y cosecha; la producción por calidades comerciales (%) se midió con base en el porcentaje de la masa fresca de los frutos por planta de cada una de las categorías según la norma Icontec NTC 4580 (Icontec, 1999); los frutos se clasificaron

en tres tamaños (diámetro ecuatorial): >22 mm, grandes; 18-22 mm, medianos, y <18 mm, pequeños; el cuarteamiento total de frutos (%) se calculó dividiendo el número total de frutos cosechados por planta por el número de frutos cuarteados; el cuarteamiento de frutos por calidad comercial (%) se estableció dividiendo el número de frutos de un tamaño determinado afectados en el número total de frutos de ese tamaño; la masa fresca promedio por cáliz se estableció pesando el cáliz de cada uno de los frutos cosechados y dividiéndolo en el número de frutos por planta; por último, se determinó la relación entre cáliz y fruto tomando el peso del cáliz y dividiéndolo en el peso fresco del fruto sin cáliz a lo largo de todo el ciclo de cultivo.

Una vez comprobado el supuesto de normalidad mediante la prueba de Kolmogorv-Smirnov, se hizo un análisis de varianza (Anova) para diseños completamente al azar y, posteriormente, una prueba de comparación de promedios de Tukey al 5 %. Los datos se analizaron con el programa SAS® v. 9.2 (SAS Institute Inc., Cary NC).

Resultados y discusión

Producción por planta durante el tiempo de cosecha

Los mayores valores de masa fresca total de fruta se recolectaron al comienzo, en la primera cosecha (**Figura 1**); en la segunda la producción alcanzó un promedio de 208,2 g por planta, y a partir de allí comenzó a disminuir hasta la séptima cosecha en la que solo se obtuvieron, en promedio, 17,1 g por planta con todos los tratamientos. Después la producción volvió a incrementarse hasta los 62 g por planta, como lo observaron **Fischer, et al.** (2007), quienes concluyeron que las cosechas de uchuva tienen picos bimensuales de producción que son menos pronunciados a medida que avanza el tiempo de cosecha hasta el momento en que la cosecha es mínima (**Fischer, et al.**, 1998). Es probable que el hecho de haber cultivado la uchuva dentro del invernadero con frecuencias de riego bajas haya afectado de forma negativa la producción, pues la temperatura dentro del invernadero fue, en promedio, 3,2 °C superior a la exterior y se alcanzaron a registrar temperaturas de hasta 35 °C, las cuales son excesivas para el cultivo de uchuva y afectaron negativamente el desarrollo floral (**Fischer & Melgarejo**, 2020), así como el número y el crecimiento de los frutos (**Fischer, et al.**, 2016). Esta situación contrasta con lo reportado por **Angulo** (2005), en cuyo estudio la producción de uchuva dentro del invernadero fue 30 % mayor que la del cultivo en condiciones de libre exposición.

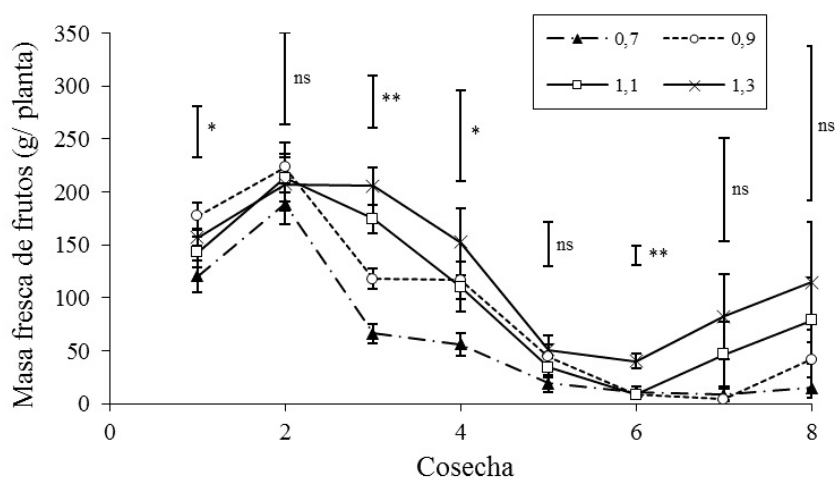


Figura 1. Producción quincenal de masa fresca de frutos de uchuva por planta en las diferentes cosechas con cada lámina de riego aplicada. La primera cosecha fue el 15 de agosto y la octava, el 21 de noviembre. Las barras verticales corresponden a la diferencia mínima significativa de Tukey. El error estándar se presenta para cada promedio (n=4). * y ** indican diferencias significativas según el Anova (p<0,05 y p<0,01, respectivamente)

Masa fresca del fruto durante el tiempo de cosecha

Los frutos más grandes se obtuvieron en las primeras recolecciones (**Figura 2**) y, luego, la masa promedio de frutos fue disminuyendo y tendió a estabilizarse a partir de la quinta cosecha. Para las dos primeras cosechas (semana 17 y 19 ddt), el promedio de la masa de frutos fue de 5,66 g, similar a los 5,68 g reportados por **Herrera, et al.** (2011), ambos en los rangos normales, y a los valores de 4,04 y 5,8 g reportados por **Guerrero, et al.** (2007) y **Fischer, et al.** (2007), respectivamente. Los frutos de las últimas cuatro cosechas apenas alcanzaron 2,26 g, es decir, una reducción de casi un 60 % en su masa fresca, lo que indica que los cultivos en condiciones más cálidas, como las de invernadero, o en sitios de menor altitud, se agotan más rápido según lo observaron **Fischer, et al.** (2007) y **Mazorra, et al.** (2003). Al igual que en el estudio de **Angulo** (2005), el máximo de cosecha se presentó en la semana 17 ddt, lo que implica que las condiciones de invernadero afectaron de forma similar el desarrollo del cultivo.

Con el coeficiente de riego de 1,3 se obtuvo la mayor masa promedio de frutos en el tiempo, con un promedio de 6,15 g, en tanto que con los coeficientes de 0,7 y 0,9 se obtuvo la menor masa promedio. En las dos primeras cosechas el efecto de la lámina de riego no fue significativo, y es probable que los tratamientos no influyeran en el comportamiento del cultivo inicialmente (**Figura 2**), por lo que es de suponerse que las plantas habían acumulado suficiente humedad en sus tejidos antes del inicio de los tratamientos.

Número de frutos

La lámina de riego con la que se obtuvo el mayor número de frutos fue la de coeficiente de 1,3 en todas las cosechas, excepto en la primera, con diferencias significativas en la tercera y la sexta cosechas. El número de frutos tuvo una tendencia ascendente hasta la tercera cosecha (semana 21 ddt) con las láminas de riego de 1,1 y 1,3, dando hasta 50 frutos por planta (**Figura 3**), y a partir de este momento el número de frutos por planta comenzó a descender hasta la sexta cosecha (semana 27 ddt), cuando tan solo se recolectaron ocho frutos por planta en promedio, lo que se atribuyó al desgaste natural de la planta y a que las temperaturas del invernadero estuvieron por encima de las recomendadas por **Fischer & Melgarejo** (2020), quienes han señalado que la temperatura adecuada para el cultivo de uchuva oscila entre los 13 y los 16 °C y que las temperaturas muy altas pueden perjudicar la floración y la fructificación.

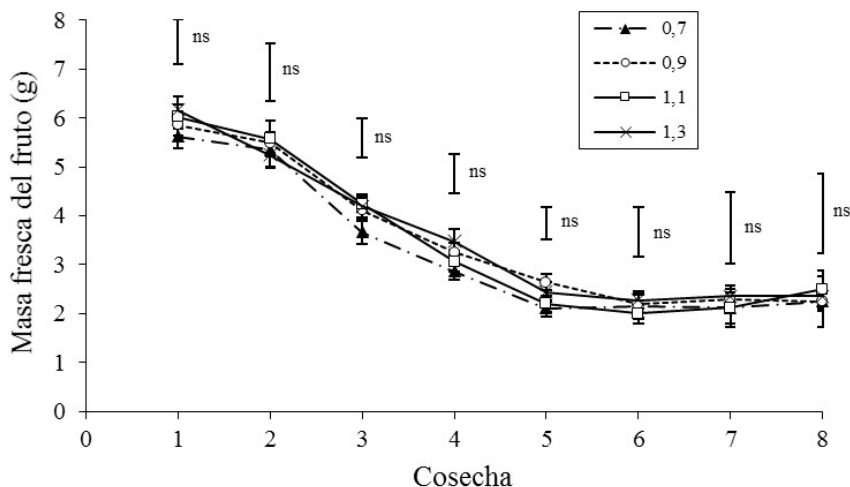


Figura 2. Masa fresca del fruto de uchuva en las diferentes cosechas quincenales con cada lámina de riego. La primera cosecha fue el 15 de agosto y la octava, el 21 de noviembre. Las barras verticales corresponden a la diferencia mínima significativa de Tukey. El error estándar se presenta para cada promedio ($n=4$). ns: no significativo según el Anova

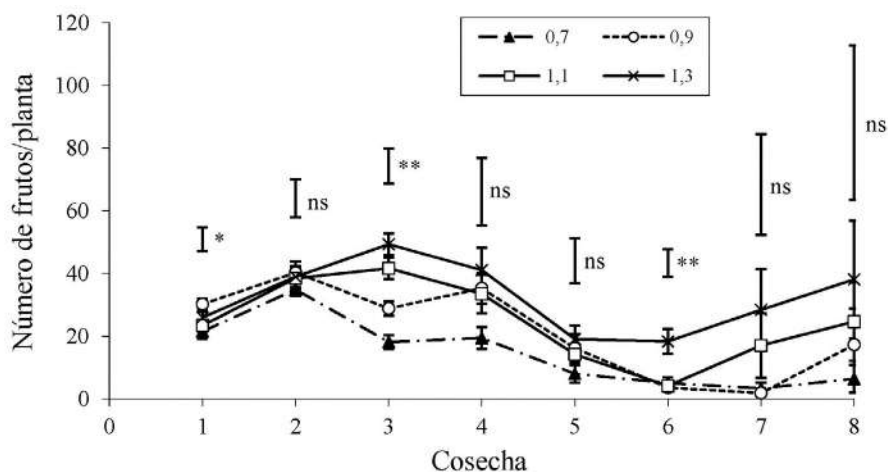


Figura 3. Número de frutos de uchuva por planta en las diferentes cosechas quincenales con cada lámina de riego aplicada. La primera cosecha fue el 15 de agosto y la octava, el 21 de noviembre. Las barras verticales corresponden a la diferencia mínima significativa de Tukey. El error estándar se presenta para cada promedio ($n=4$). ns: no significativo; * y ** indican diferencias significativas según el Anova ($p<0,05$ y $p<0,01$, respectivamente)

En la última cosecha el promedio de frutos cosechados por planta subió a 21. La disminución en el número de frutos y el incremento al final coinciden con lo reportado por Fischer, *et al.* (1998) y Fischer, *et al.* (2007), y se explica porque la planta de uchuva tiende a intercambiar las fuerzas de su desarrollo entre el crecimiento de las ramas (vegetativo) y la inducción y el desarrollo de los frutos (reproductivo) (Fischer, *et al.*, 2015). El número de frutos fue inferior al reportado por Herrera, *et al.* (2011), quienes obtuvieron producciones que oscilaron entre 265 y 2.454 frutos por planta bajo condiciones ambientales más favorables, especialmente por haber sembrado las plantas en el suelo del invernadero y no en materas.

Porcentaje de frutos por calidad comercial a lo largo del ciclo de cosecha

Los frutos de tamaño grande (>22 mm) se dieron en las dos primeras cosechas (Figura 4A), lo que puede atribuirse al menor número de frutos en esta fase de la producción, por lo que el total de los fotoasimilados se distribuyó en menos vertederos (Fischer, *et al.*, 2012). En las demás recolecciones el tamaño de los frutos no clasificó en el rango de frutos grandes. Los frutos de tamaño mediano fueron el 50 % y el 70,7 % en las dos primeras cosechas, respectivamente; después, el porcentaje de frutos de esta calidad disminuyó y a partir de la quinta cosecha el promedio de frutos medianos fue del 7,4 %. La cantidad de frutos de tamaño pequeño fue inicialmente baja y comenzó a ascender hasta llegar a la quinta cosecha, cuando su porcentaje también disminuyó, pues el uso de una lámina de riego más reducida (coeficiente de 0,7) contribuyó en gran medida a que se presentara un mayor porcentaje de frutos de tamaño pequeño y, a su vez, las láminas de riego más altas presentaron el porcentaje de frutos de mayor tamaño (Figura 4B), lo que coincide con lo observado por Álvarez, *et al.* (2015). Probablemente la menor frecuencia de riego (intervalos de irrigación más largos) origina un estrés hídrico que reduce la asimilación de carbono y la translocación de agua y fotoasimilados al fruto (Zargar, *et al.*, 2017).

Independientemente de la lámina de riego, en las dos primeras cosechas predominaron los frutos de tamaño grande (Fischer, *et al.*, 2007); entre la tercera y la quinta cosechas el predominio fue de los frutos medianos y pequeños, con una relación inversamente proporcional entre estos dos tamaños durante dicho intervalo de cosechas. A partir de la sexta y hasta la última cosecha, el tamaño de frutos predominante fue el menor, de

18 mm, situación similar a la reportada por **Guerrero, et al.** (2007), quienes mencionan que durante todas las cosechas los frutos de categoría nacional se presentaron en mayor porcentaje, lo que indica que el cultivo estaba establecido y manejado en condiciones adecuadas para su crecimiento.

CuarTEAMIENTO total de frutos a lo largo del ciclo de cosecha

El cuarteamiento de frutos en la primera cosecha fue bajo, luego aumentó y en la tercera cosecha se presentó el máximo porcentaje, lo que se explica por el mayor número de frutos en esta recolección (**Figura 3**) y permite suponer que los nutrientes como el calcio, boro y magnesio no llegaron en cantidad suficiente para contrarrestar el cuarteamiento (**Garzón-Acosta, et al.**, 2014). A partir de allí, esta fisiopatía fue menor con todas las láminas de riego, lo que coincide con la disminución del tamaño de los frutos a medida que las plantas envejecían (**Figura 5a**) observada por **Galvis, et al.** (2005), en cuyo estudio el porcentaje de cuarteamiento disminuyó en el transcurso del periodo reproductivo. Asimismo, **Gordillo, et al.** (2004) y **Cooman, et al.** (2005) encontraron que el mayor porcentaje de cuarteamiento se producía en las primeras cosechas y lo atribuyeron al reducido número de frutos de mayor grandes y, por lo tanto, más susceptibles al cuarteamiento. Estos autores

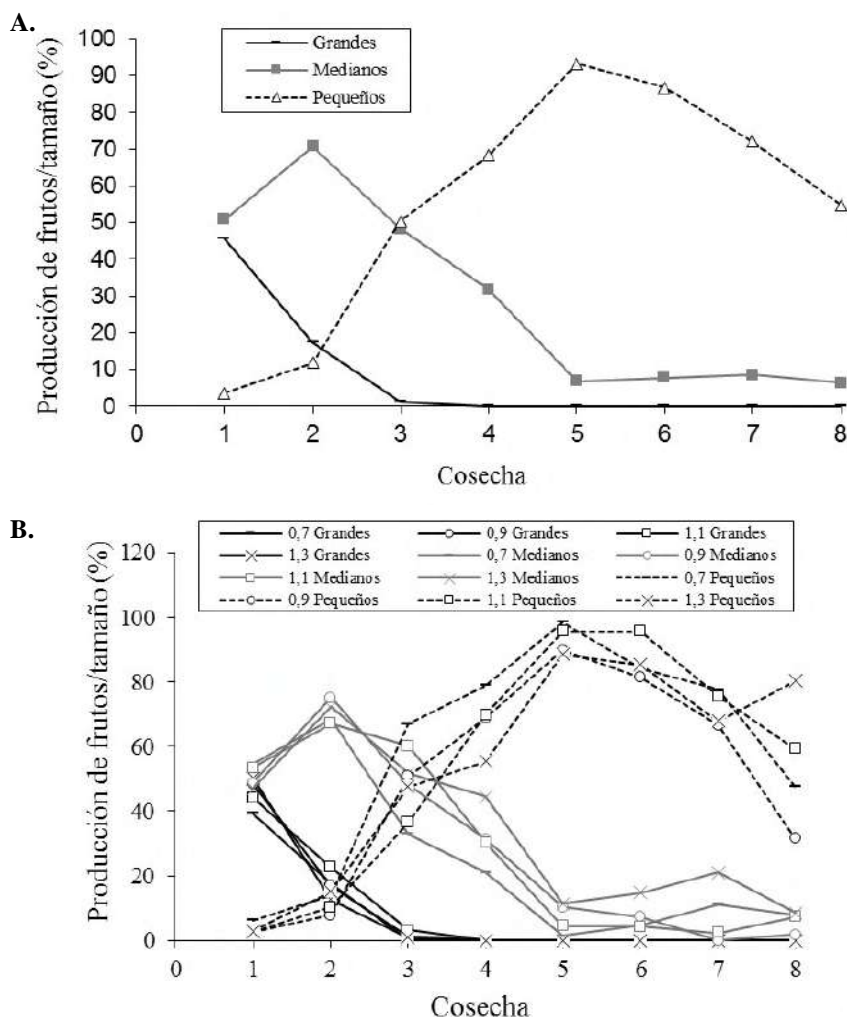


Figura 4. Producción de frutos de uchuva cosechados quincenalmente, A) según el tamaño en las diferentes cosechas realizadas y B) según el tamaño en las diferentes cosechas y la lámina de riego aplicada. La primera cosecha fue el 15 de agosto y la octava, el 21 de noviembre.

registraron en el primer mes de cosecha un promedio de 15 % de frutos cuarteados, inferior a los valores de 50, 39 y 20 % encontrados en el presente estudio para los frutos de tamaño grande, mediano y pequeño, respectivamente.

Por su parte, **Torres, et al.** (2004) obtuvieron porcentajes de cuarteamiento que alcanzaron hasta un 70 % en la primera semana de cosecha, los cuales aumentaron con las aplicaciones de agua al madurar los frutos. Así, el cuarteamiento del fruto de uchuva es el desorden fisiológico más relacionado con el exceso de agua, lo cual puede deberse a las lluvias o a riegos demasiado abundantes (**Fischer & Melgarejo, 2020**). Además, la elevada incidencia de frutos cuarteados en las primeras semanas se atribuye a que un gran porcentaje de área foliar joven, que todavía es vertedero, compite con los frutos por los fotoasimilados (**Torres, et al., 2004**), lo que también origina que elementos como el calcio, de baja movilidad en la planta, no lleguen en concentración suficiente a los frutos (**Marschner, 2012**) y desencadene el cuarteamiento. Asimismo, en el caso de unos pocos frutos la relación entre área foliar y número de frutos es muy alta, por lo cual entran muchos carbohidratos al fruto, lo que contribuye a que se rajen (**Torres, et al., 2016**).

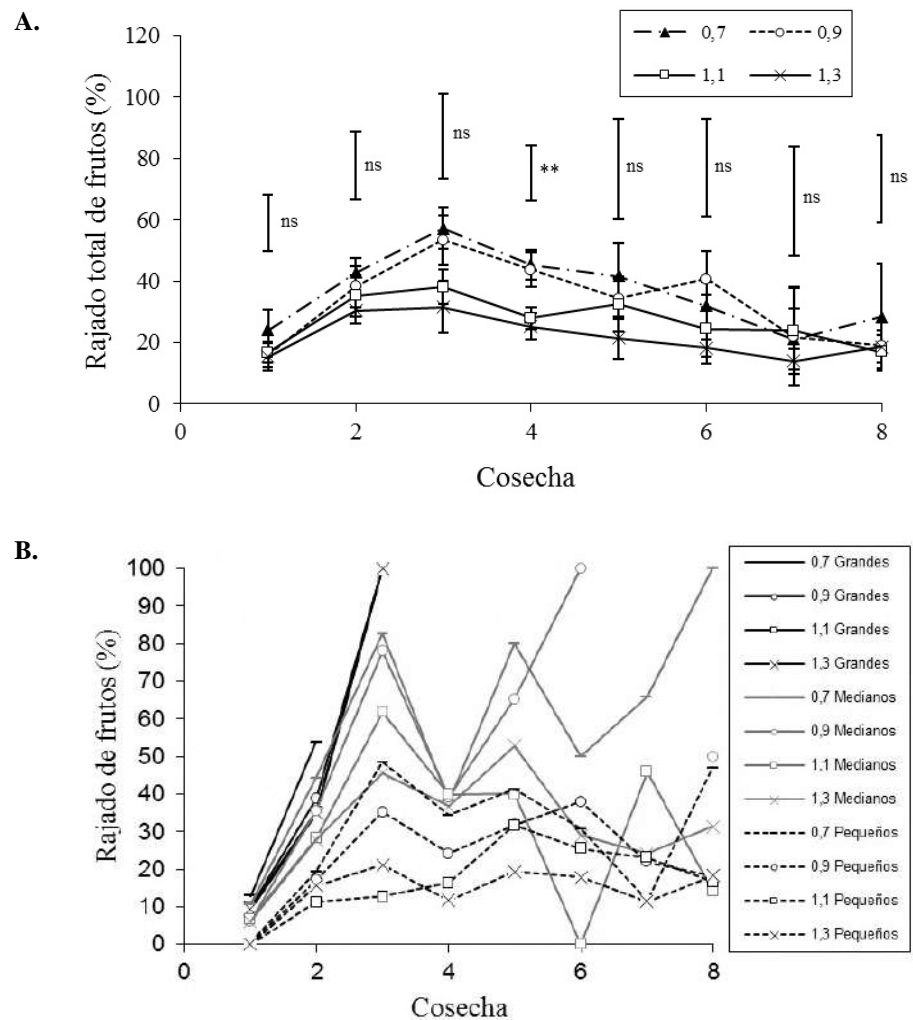


Figura 5. Porcentaje de rajado de los frutos de uchuva: A) por lámina de riego aplicada, y B) por calidad comercial durante las cosechas quincenales. La primera cosecha fue el 15 de agosto y la octava, el 21 de noviembre de 2009. Las barras verticales corresponden a la diferencia mínima significativa de Tukey. El error estándar se presenta para cada promedio ($n=4$). ns: no significativo; ** indica diferencias significativas según el Anova ($p<0,01$)

Las láminas de riego menores presentaron en promedio los mayores porcentajes de cuarteamiento en las diferentes cosechas (**Figura 5A**), lo que concuerda con lo hallado por **Torres, et al.** (2004), quienes concluyeron que los frutos de uchuva sometidos a un estrés hídrico acusado son de menor tamaño, menor masa y se cuarteán más, especialmente si se aumenta mucho la cantidad de agua aplicada de un momento a otro, como sucede cuando hay lluvias fuertes después de una época seca (**Fischer, 2005**), un fenómeno descrito también para otros frutos, por ejemplo, la granada (**Pal, et al., 2017**). Este efecto también fue reportado por **Guerrero, et al.** (2007), quienes encontraron que a mayor humedad en el suelo, mayor la producción de frutos y el porcentaje de cuarteamiento, pues los frutos no aguantaron la presión del agua excesiva contra su epidermis (**Fischer & Melgarejo, 2020**). Los autores concluyeron que el cuarteamiento de la uchuva dependiente del agua puede deberse a dos situaciones: primero, el suministro del agua (abundante) después de una época seca y, segundo, la humedad elevada y constante del suelo.

El déficit hídrico en la etapa de crecimiento del fruto hace que la planta disminuya la tasa de transpiración, con lo cual disminuye también el suministro de calcio, boro y magnesio, elementos que tienen gran influencia en la resistencia y la elasticidad de la epidermis (**Garzón-Acosta, et al., 2014; Fischer, 2005**).

Cuarteamiento de los frutos según su tamaño a lo largo del ciclo de cultivo

Se encontró que el cuarteamiento de los frutos grandes fue del 10 % en la primera cosecha y aumentó hasta un 100 % en la tercera cosecha; a partir de ese momento los frutos no alcanzaron el tamaño grande (**Figura 5b**). Los frutos de tamaño mediano se cosecharon en todo el ciclo de cultivo y presentaron un 39 % de cuarteamiento en promedio, con máximos en la tercera y la quinta cosechas (semanas 21 y 23 ddt). En los frutos de tamaño pequeño el cuarteamiento en la primera cosecha fue muy bajo, después se incrementó y permaneció constante, con un promedio de 20 %, en las demás cosechas. La tendencia general, independientemente de la lámina de riego, fue que a mayor tamaño (volumen y peso) del fruto, mayor la incidencia del cuarteamiento, lo que concuerda con los estudios de **Álvarez, et al.** (2012), **Fischer & Melgarejo** (2020); **Fischer** (2005) y **Guerrero, et al.** (2007). Según estos autores, este desorden fisiológico se debe a que la expansión de la epidermis no guarda proporción con el agrandamiento del fruto, lo que incrementa la posibilidad de que se rajen.

Marschner (2012) menciona que la asimilación de calcio en el fruto es menor según la absorción de agua. Asimismo, los frutos más grandes tienen mayor potencial de sumidero, lo que atrae más carbohidratos y propicia un crecimiento acelerado que puede rajarse el fruto (**Peet, 2009**). Este autor menciona, además, que en las condiciones de cultivo, en las que el cuarteamiento es un problema, se debe reducir tanto la cantidad de agua como de fertilizantes. **Criollo, et al.** (2014) observaron que el cuarteamiento depende mucho del genotipo, ya que los de ‘Silvania’ y ‘Kenia’, con los frutos más grandes (7,2 y 6,0 g, respectivamente), presentaron también los mayores porcentajes de cuarteamiento (8,9 y 8,1 %), comparados con el genotipo ‘Regional Nariño’ (4,8 g y 3,1 %).

Masa fresca de cáliz a lo largo del ciclo de cultivo

En la primera cosecha la masa fresca de cáliz fue de 0,45 g en promedio y disminuyó a medida que transcurrían las cosechas hasta llegar a una masa final de solo un 36 % de la inicial (0,164 g). Debe tenerse en cuenta que el cáliz está en estrecha relación con los frutos (**Fischer, 2000**) y que el tamaño de estos sigue disminuyendo hasta la última cosecha (**Figura 2**).

Angulo (2005) reportó valores superiores, de 0,8 y 1,0 g, para el cáliz de los frutos de uchuva cultivados en suelo en condiciones de invernadero y en libre exposición, respectivamente. No hubo diferencias significativas entre las láminas de riego a lo largo de las ocho cosechas recogidas, aunque en la última el uso de una lámina de riego de 0,7 de la evaporación disminuyó bastante la masa de cáliz (**Figura 6**). La variabilidad en dicha masa podría deberse a que las plantas tuvieron un gran desgaste provocado por el uso de gran parte de los fotoasimilados de reserva en las primeras cosechas, lo cual se vio reflejado tanto en la masa de los frutos como en la del cáliz; además, hacia el final del ciclo de cosechas la planta

estresada tiene muy pocas reservas y los frutos y el cáliz son más pequeños. En este sentido, **Fernandes, et al.** (2018) hallaron que cuando las plantas eran sometidas a un estrés hídrico, los frutos y el crecimiento se vieron afectados de forma drástica, en tanto que **Fischer, et al.**, (2015) registraron que el contenido de almidón disminuía de forma constante en el cáliz y, al final, en el momento de la cosecha, el contenido de carbohidratos era de tan solo 5,7 %.

Relación entre el cáliz y el fruto a lo largo del ciclo de cosechas

En promedio, dicha relación fue de 8,5% en todo el ciclo. En el caso de las primeras cuatro cosechas la relación de masa fresca entre el cáliz y el fruto fue menor al valor promedio durante todo el ciclo, posiblemente debido a una mayor translocación de los carbohidratos del cáliz al fruto durante los primeros 20 días de su desarrollo (**Fischer, et al.**, 2015), y se incrementó a partir de la cuarta cosecha hasta alcanzar un valor de 11,9 % en la última (**Figura 7**). Por otro lado, este comportamiento también se puede explicar porque que en las primeras cosechas los frutos presentaron tamaños más grandes, en tanto que al final, la

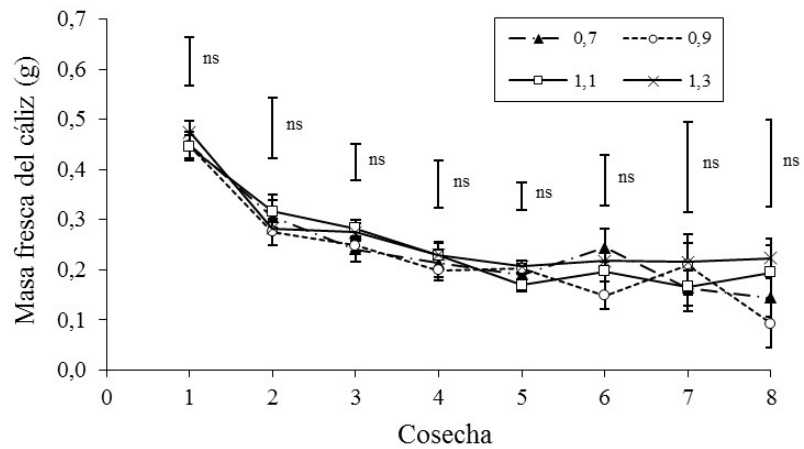


Figura 6. Masa fresca del cáliz de uchuva durante las diferentes cosechas quincenales con la lámina de riego aplicada. La primera cosecha fue el 15 de agosto y la octava, el 21 de noviembre. Las barras verticales corresponden a la diferencia mínima significativa de Tukey. El error estándar se presenta para cada promedio (n=4). ns: no significativo según el Anova

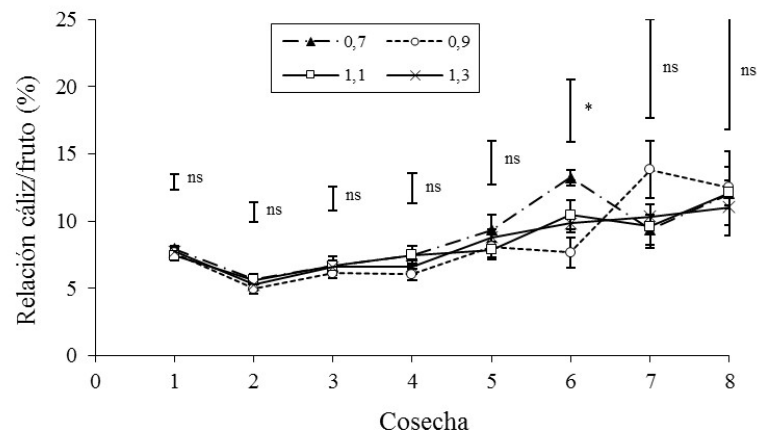


Figura 7. Relación entre cáliz y fruto de uchuva durante las diferentes cosechas quincenales con las láminas de riego aplicadas. La primera cosecha fue el 15 de agosto y la octava, el 21 de noviembre. Las barras verticales corresponden a la diferencia mínima significativa de Tukey. El error estándar se presenta para cada promedio (n=4). ns: no significativo; * indica diferencias significativas según el Anova (p<0,05).

mayoría se clasificaron como pequeños, por lo que la relación entre cáliz y fruto aumentó; sin embargo, a medida que avanzaron las cosechas el cáliz fue más grande y su masa disminuyó, aunque no en la misma proporción del fruto. **Fischer, et al.** (2015) encontraron en su estudio que el cambio en la acumulación de carbohidratos fue similar en los frutos y en el cáliz, y que los procesos de translocación de sacarosa al fruto se dieron con igual intensidad hacia el cáliz debido al fuerte potencial de vertedero que tiene el fruto en su etapa de crecimiento y maduración. Por otra parte, **Fischer, et al.** (1997) encontraron que en las etapas iniciales de crecimiento esta relación fue mayor, pues el desarrollo inicial del cáliz es mucho mayor que el del fruto (**Fischer, 2000**).

Conclusiones

El mayor tamaño, cantidad y producción de frutos por planta, así como el mayor porcentaje de cuarteamiento, se dieron en las primeras cosechas. Con la lámina de riego de 1,3 se obtuvo el mayor número de frutos y la mayor producción por planta a partir de la tercera recolección en el ciclo de cosecha. La producción de uchuva en invernadero fue menor al someter las plantas a estrés hídrico (láminas de 0,7 y 0,9) y también debido a las altas temperaturas del invernadero. En las últimas cosechas la cantidad de frutos pequeños fue mayor. La relación entre cáliz y fruto aumentó conforme avanzaba el ciclo de cosecha. Independientemente de la lámina de riego, cuanto mayor el tamaño de fruto, mayor la incidencia del cuarteamiento.

Contribución de los autores

JAH: planteamiento y ejecución del proyecto de investigación, elaboración y ajuste del manuscrito; GF: planteamiento y supervisión de la ejecución del proyecto y elaboración y ajuste del manuscrito; JEV: asesoría del proyecto y elaboración y ajuste del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Agradecimientos

Esta investigación fue parcialmente financiada por el proyecto Hermes de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, con el título “Efecto del riego y la nutrición con calcio en la producción, rajado y calidad poscosecha de la uchuva (*Physalis peruviana* L.)”, código 2010100.

Referencias

- Agronet.** (2020). Sistema de estadísticas agropecuarias. Producción nacional por producto. Uchuva. Fecha de consulta: mayo de 2020. Disponible en: <http://www.agronet.gov.co>
- Aldana, F., García, P.N., Fischer, G.** (2014). Effect of waterlogging stress on the growth, development and symptomatology of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plants. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. **38** (149): 393-400. Doi: 10.18257/raccefyfyn.114
- Álvarez-Herrera, J., Balaguera-López, H., Fischer, G.** (2012). Effect of irrigation and nutrition with calcium on fruit cracking of the Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in the three strata of the plant. Acta Hort. **928**: 163-170. Doi: 10.17660/ActaHortic.2012.928.19
- Álvarez-Herrera, J., Fischer, G., Restrepo, L.P., Quicazán, M.** (2014). Contenidos de carotenoides totales y ácido ascórbico en frutos sanos y rajados de uchuva (*Physalis peruviana* L.). Acta Hort. **1016**: 7-81. Doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1016.8
- Álvarez-Herrera, J., Fischer, G., Vélez-Sánchez, J.** (2015). Producción de frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo diferentes láminas de riego, frecuencias de riego y dosis de calcio. Rev. Colomb. Cienc. Hortíc. **9** (2): 222-233. Doi: 10.17584/rchc.2015v9i2.4177
- Angulo, R.** (2005). Crecimiento, desarrollo y producción de la uchuva en condiciones de invernadero y campo abierto. En: Fischer, G., Miranda, D., Piedrahita, W., Romero, J. (eds.). Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en Colombia. Bogotá, Colombia: Unibiblos. p. 111-129.

- Cleves, J.A., Toro, J., Martínez, L.F.** (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* **10** (1): 149-163. Doi: 10.17584/rcch.2016v10i1.4460
- Cooman, A., Torres, C., Fischer, G.** (2005). Determinación de las causas del rajado del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo cubierta. II. Efecto de la oferta de calcio, boro y cobre. *Agron. Colomb.* **23** (1): 74-82.
- Criollo, H., Lagos, T.C., Fischer, G., Mora, L., Zamudio L.** (2014). Comportamiento de tres genotipos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo diferentes sistemas de poda. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* **8** (1): 34-43. Doi: 10.17584/rcch.2014v8i1.2798
- Dhankher, O.M. & Foyer, C.H.** (2018). Climate resilient crops for improving global food security and safety. *Plant Cell Environ.* **41**: 877-884. Doi: 10.1111/pce.13207
- Fernandes, R., Cuevas, M.V, Díaz-Espejo, A., Hernández-Santana, V.** (2018). Effects of water stress on fruit growth and water relations between fruits and leaves in a hedgerow olive orchard. *Agr. Water Manage.* **210**: 32-40. Doi: 10.1016/j.agwat.2018.07.028
- Fischer, G.** (2005). El problema del rajado del fruto de la uchuva y su posible control. En: Fischer, G., Miranda, D., Piedrahita, W., Romero, J. (eds.). *Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva Physalis peruviana L. en Colombia.* Bogotá, Colombia: Unibiblos. p. 55-82.
- Fischer, G.** (2000). Crecimiento y desarrollo. En: Flórez, V.J., Fischer, G., Sora, A.D. (eds.). *Producción, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.).* Bogotá, Colombia: Unibiblos. p. 9-26.
- Fischer, G., Almanza-Merchán, P.J., Miranda, D.** (2014). Importancia y cultivo de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Rev. Bras. Frutic.* **36** (1): 1-15. Doi: 10.1590/0100-2945-441/13
- Fischer, G., Ebert, G., Lüdders, P.** (2007). Production, seeds and carbohydrate contents of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits grown at two contrasting Colombian altitudes. *J. Appl. Bot. Food Qual.* **81**: 29-35.
- Fischer, G., Lüdders, P., Torres, F.** (1997). Influencia de la separación del cáliz de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) sobre el desarrollo del fruto. *Rev. Comalfi* **24** (1-2): 3-16.
- Fischer, G. & Melgarejo, L.M.** (2020). The ecophysiology of Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) - an Andean fruit crop. A review. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* **14** (2). Doi: 10.17584/rcch.2020v14i2.10893
- Fischer, G., Melgarejo, L.M., Cutler, J.** (2018). Pre-harvest factors that influence the quality of passion fruit: A review. *Agron. Colomb.* **36** (3): 217-226. Doi: 10.15446/agron.colomb.v36n3.71751
- Fischer, G. & Miranda, D.** (2012). Uchuva (*Physalis peruviana* L.). En: Fischer, G. (ed.). *Manual para el cultivo de frutales en el trópico.* Bogotá, Colombia: Produmedios. p. 851-873.
- Fischer, G., Ramírez, F., Almanza-Merchán, P.J.** (2012). Inducción floral, floración y desarrollo del fruto. En: Fischer, G. (ed.). *Manual para el cultivo de frutales en el trópico.* Bogotá, Colombia: Produmedios. p. 120-140.
- Fischer, G., Ramírez, F., Casierro-Posada, F.** (2016). Ecophysiological aspects of fruit crops in the era of climate change. A review. *Agron. Colomb.* **34** (2): 190-199. Doi: 10.15446/agron.colomb.v34n2.56799
- Fischer, G., Torres, F., Lüdders, P.** (1998). Efecto de la altitud sobre los componentes de la producción en uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Cienc. Agric.* **4**: 156-170.
- Fischer, G., Ulrichs, C., Ebert, G.** (2015). Contents of non-structural carbohydrates in the fruiting Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) plant. *Agron. Colomb.* **33** (2): 155-163. Doi: 10.15446/agron.colomb.v33n2.515462
- Galvis, J.A., Fischer, G., Gordillo, O.P.** (2005). Cosecha y poscosecha de la uchuva. En: Fischer, G., Miranda, D., Piedrahita, W., Romero, J. (eds.). *Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva (Physalis peruviana L.) en Colombia.* Bogotá, Colombia: Unibiblos. p. 165-190.
- Garzón-Acosta, C.P., Villarreal-Garzón, D.M., Fischer, G., Herrera, A.O., Sanjuanelo, D.** (2014). La deficiencia de fósforo, calcio y magnesio afecta la calidad poscosecha del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Acta Hortíc.* **1016**: 83-88. Doi: 10.17660/ActaHortic.2014.1016.9
- Gordillo, O., Fischer, G., Guerrero, R.** (2004). Efecto del riego y de la fertilización sobre la incidencia del rajado en frutos de uchuva (*Physalis peruviana* L.) en la zona de Silvanía (Cundinamarca). *Agron. Colomb.* **22** (1): 53-62.
- Guerrero, B., Velandia, M., Fischer, G., Montenegro, H.** (2007). Los ácidos carboxílicos de extractos vegetales y la humedad del suelo influyen en la producción y el rajado del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* **1** (1): 9-19. Doi: 10.17584/rcch.2007v1i1.1141

- Herrera, A.M., Ortiz, J., Fischer, G., Chacón, M.** (2011). Behavior in yield and quality of 54 cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) accessions from north-eastern Colombia. *Agron. Colomb.* **29** (2): 189-196.
- Icontec.** (1999). Frutas frescas. Uchuva. Especificaciones. Norma Técnica Colombiana NTC 4580. Bogotá, Colombia: Instituto Colombiano de Normas Técnicas.
- Marengo, J.A., Pabón, J.D., Díaz, A., Rosas, G., Ávalos, G., Montealegre, E., Villacis, M., Solman, S., Rojas M.** (2011). Climate change: evidence and future scenarios for the Andean region. En: Herzog, S., Martínez, R., Jorgensen, P.M., Tiessen, H. (eds.). *Climate change and biodiversity in the tropical Andes*. Paris, Francia: IAI-SCOPE-UNESCO. p. 110-127.
- Marschner, P.** (ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants*. 3ª edición. Londres, Inglaterra: Academic Press. 649 p.
- Mazorra, M.F., Quintana, A.P., Miranda, D., Fischer, G., Chaves, B.** (2003). Análisis sobre el desarrollo y la madurez fisiológica del fruto de la uchuva (*Physalis peruviana* L.) en la zona de Sumapaz (Cundinamarca). *Agron. Colomb.* **21** (3): 175-189.
- Moreno-Miranda, C., Pilamala, A., Moreno-Miranda, R., Molina, J.I., Cerda-Mejía, L., Rama, D.** (2020). Análisis de las dimensiones sociales, productivas y de gobernanza de la cadena de *Physalis peruviana*: un estudio de caso de la zona interandina en Ecuador. *Cienc. Tecnol. Agropecu.* **21** (2): e1304. Doi: 10.21930/rcta.vol21_num2_art:1304
- Nocetti, D., Núñez, H., Puente, L., Espinosa, A., Romero, F.** (2020). Composition and biological effects of goldenberry byproducts: an overview. *J. Sci. Food Agric.* **2020**. Doi: 10.1002/jsfa.10386
- Pal, R.K., Singh, N.V., Maity, A.** (2017). Pomegranate fruit cracking in dryland farming. *Curr. Sci.* **112** (5): 896-897.
- Peet, M.M.** (2009). Physiological disorders in tomato fruit development. *Acta Hort.* **821**: 151-160. Doi: 10.17660/ActaHortic.2009.821.16
- Ramírez, F., Fischer, G., Davenport, T.L., Pinzón, J.C.A., Ulrichs, C.** (2013). Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) phenology according to the BBCH phenological scale. *Sci. Hortic.* **162**: 39-42.
- Sánchez-Reinoso, A.D., Jiménez-Pulido, Y., Martínez-Pérez J.P., Pinilla C.S., Fischer G.** (2019). Chlorophyll fluorescence and other physiological parameters as indicators of waterlogging and shadow stress in lulo (*Solanum quitoense* var. *septentrionale*) seedlings. *Rev. Colomb. Cienc. Hortíc.* **13** (3): 325-335. Doi: 10.17584/rcch.2019v13i3.100171
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I.M., Murphy, A.** (2015). *Plant physiology and development*. 6ª edición. Sunderland, M.A., USA: Sinauer Associates. 761 p.
- Torres, C., Cooman, A., Fischer, G.** (2004). Determinación de las causas del rajado del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) bajo cubierta. I. Efecto de la variación del balance hídrico. *Agron. Colomb.* **22** (2): 140-146.
- Torres, C., Fischer, G., Miranda, D.** (2016). Principales fisiopatías del cultivo de uchuva (*Physalis peruviana* L.). En: Miranda, D., Carranza, C., Fischer, G. (eds.). *Problemas de campo asociados al cultivo de uchuva (Physalis peruviana L.)*. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia. p. 139-146.
- Vélez, J.E. & Álvarez, J.G.** (2012). Riego en frutales. En: Fischer G. (ed.). *Manual para el cultivo de frutales en el trópico*. Bogotá, Colombia: Produmedios. p. 186-204
- Villareal-Navarrete, A., Fischer, G., Melgarejo, L.M., Correa, G., Hoyos-Carvajal, L.** (2017). Growth response of the Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) to waterlogging stress and *Fusarium oxysporum* infection. *Acta Hort.* **1178**: 161-168. Doi: 10.17660/ActaHortic.2017.1178.28
- Zargar, S.M., Gupta, N., Nazir, M., Mahajan, R., Malik, F.A., Sofi, N.R., Shikari, A.B., Salgotra, R.K.** (2017). Impact of drought on photosynthesis: Molecular perspective. *Plant Gene.* **11**: 154-159. Doi: 10.1016/j.plgene.2017.04.003

Artículo original

Biogeografía y riqueza de los líquenes de Colombia

Biogeography and richness of lichens in Colombia

Edier Soto Medina*, David Díaz, Javier Montaña

Universidad del Valle, Grupo de ecología y diversidad vegetal, Cali, Colombia

Resumen

El objetivo de este trabajo fue analizar la riqueza de los líquenes y las relaciones biogeográficas entre zonas de vida en Colombia, así como definir especies y géneros indicadores. Para ello se compiló información de distintos herbarios nacionales, bases de datos y publicaciones. Se usó la clasificación en zonas de vida de Colombia para definir las localidades de recolección de los líquenes. Se encontraron tres agrupaciones principales: regiones de bosque húmedo (Amazonía y Chocó), bosques secos y Orinoquía, y bosques andinos (premontano a páramo). Estas regiones formaron grupos en un gradiente que abarca desde zonas de vida de elevaciones bajas hasta el páramo. En cuanto a las relaciones fitogeográficas, fue posible establecer una mayor afinidad entre los bosques húmedos de las zonas de Amazonía y Chocó, entre los bosques premontanos, montanos y páramos, y entre los bosques secos interandinos y del Caribe. Las regiones con mayor riqueza y especies de distribución restringida fueron la andina y las de bosque húmedo. La riqueza exhibió un patrón decreciente con la elevación y unimodal con la latitud, con mayores valores en las latitudes medias.

Palabras clave: Biogeografía; Líquenes; Endemismo; Riqueza; Colombia.

Abstract

Our objective was to analyze the richness of lichens and the biogeographic relationships between life zones in Colombia, as well as to define indicator species and genera. For this purpose, we compiled information from different national herbaria, databases, and publications. We used the classification of Colombian life zones to define the localities for lichen collection. We found three main groupings: Humid forest regions (Amazonia and Chocó), dry forests and Orinoquía, and Andean forests (from premontane to paramo). These regions formed groups on a gradient from low elevation life zones to paramo. Regarding the phytogeographic relationships, we found a greater affinity between the humid forests of the Amazon and Chocó, between the premontane, montane, and paramo forests, and between the inter-Andean and Caribbean dry forests. The regions with the greatest richness and species of restricted distribution were the Andean and humid forests. The richness showed a decreasing pattern with elevation and a unimodal one with latitude and higher values at mid-latitudes.

Keywords: Biogeography; Lichens; Endemism; Richness; Colombia.

Citación: Soto Medina E, Díaz D, Montaña J. Biogeografía y riqueza de los líquenes de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):122-135, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1224>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Edier Soto Medina;
ediersot@gmail.com

Recibido: 22 de mayo de 2020

Aceptado: 3 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Aunque los líquenes son producto de una de las interacciones mutualistas mejor conocidas (Lutzoni, *et al.*, 2018), es difícil definirlos debido a su carácter simbiótico. Tradicionalmente se los define como holobiontes conformados por un hongo (micobionte) y una o varias poblaciones fotosintéticas de algas o cianobacterias (fotobiontes) (Hawksworth, 1988), pero la interacción micobionte-fotobionte debe presentar propiedades emergentes y el talo conformado debe ser morfológicamente diferente al de las especies separadas (Ahmadjian, 1982). Recientemente se han encontrado más integrantes de la simbiosis y se tiene una visión más holística del líquen como un microhábitat en donde varias especies de hongos del clado Dikarya, microalgas y bacterias coexisten en un intrincado sistema simbiótico (Banchi, 2018; Arnold, *et al.*, 2009; Muggia & Grube, 2010; U'Ren, *et al.*, 2012; Spribille, *et al.*, 2016, Hawksworth & Grube, 2020).

Además de ser una de las regiones con mayor riqueza de especies del mundo, el Neotrópico tiene una gran diversidad de líquenes y se estima que es posible encontrar una media de 600 especies por hectárea (Lücking, 2008; Lücking, *et al.*, 2011). Los ecosistemas neotropicales tienen una historia dinámica, con cambios abruptos en la diversidad vegetal y una posible relación con la orogénesis de la cordillera de los Andes, que cambió el drenaje del río Amazonas y alteró por completo el paisaje en la región incrementando la diversidad (Hoorn, *et al.*, 2010). Uno de los países neotropicales con mayor biodiversidad y menos explorados es Colombia, pues de las cerca de 3.600 especies de líquenes que se estima existen en el país, solo se han registrado alrededor de 1.800, es decir, que falta por registrar casi la mitad de la riqueza estimada (Sipman & Aguirre, 2016; Lücking, *et al.*, 2009). Una de las razones de esta gran riqueza de especies es que, por su posición privilegiada con respecto al istmo de Panamá, Colombia está compuesta por tierras tropicales de una gran diversidad. Además, con la posterior formación de los Andes, se establecieron nuevas zonas de vida (como los valles interandinos) que potenciaron la ya considerable riqueza del territorio (Antonelli & Sanmartin, 2011) y transformaron la ecología de sus ecosistemas tropicales mediante intrincadas y complejas interacciones biológicas.

El catálogo actual de la flora del país incluye angiospermas, helechos briofitos y líquenes, con 24.000 especies de plantas y 1.750 de líquenes (Bernal, *et al.*, 2016). Este catálogo ha sido un gran avance para el conocimiento de la flora de Colombia, pero aún hay enormes vacíos biogeográficos, taxonómicos y ecológicos. Algunas aproximaciones biogeográficas se enfocaron en las regiones donde ha habido más recolecciones, como la andina y la Amazonía (Rangel-Ch., 2004), pero no se ha analizado la liquenobiota del bosque seco, la del Chocó ni la del Caribe, lo que implica que tampoco se han analizado las relaciones fitogeográficas con base en los líquenes de las regiones y los biomas de Colombia.

La vida no se distribuye de manera uniforme; por ejemplo, las especies presentan patrones que van desde una amplia distribución (por ejemplo, las especies pantropicales) hasta los de distribución restringida debido a eventos de dispersión y a las particularidades ecológicas de estos organismos (Hutchinson, 1965; Feuerer & Hawksworth, 2007). Se pensaba que los hongos liquenizados tenían patrones similares a los de los microorganismos y, por ende, se ajustaban a la hipótesis de que todo está en todos lados, pero el ambiente selecciona (*“everything is everywhere, but the environment selects”*) (Baas-Becking, 1934), lo que permite analizar la conexión entre las agrupaciones espaciales no solo por su cercanía, si no por las especies que conformen las comunidades biológicas de cada agrupación. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue analizar la riqueza de los líquenes y las relaciones biogeográficas entre zonas de vida en Colombia, así como definir especies y géneros indicadores.

Materiales y métodos

Recopilación de la información

Se hizo una búsqueda de registros de hongos liquenizados en Colombia en distintas bases de datos y herbarios a nivel nacional (GBIF, SIB, COL, Univalle) y, además, se consultaron los registros de trabajos de grado y los artículos disponibles (Peláez, *et al.*, 2013; Vargas-Mendoza, *et al.*, 2014; Díaz-Escandón, *et al.*, 2016; Feria & García, 2019). Posteriormente, los nombres se actualizaron en las bases de datos del Index Fungorum y Mycobank.

Se depuraron los datos de las localidades y se catalogaron en 11 regiones según la propuesta del IAvH (IDEAM, *et al.*, 2017): 1) bosque húmedo del Amazonas (BHAm); 2) bosque húmedo del Chocó (BHCho); 3) bosque húmedo del Magdalena (BHMag); 4) bosque premontano; 5) Caribe; 6) montano; 7) Orinoquía; 8) páramo; 9) bosque seco del Caribe (SecoCar); 10) bosque seco del valle geográfico del río Cauca (SecoCau); 11) bosque seco del Magdalena (SecoMag); región andina (premontano a páramo); bosque seco (general), y bosque húmedo (Amazonas y Chocó), para así estimar el número de especies por zona de vida.

Análisis de los datos

Inicialmente se estimó el número de especies y géneros de cada zona de vida y se determinó el número de especies y géneros indicadores o endémicos de cada región (especies o géneros con presencia exclusiva en esa región). Se hicieron análisis de agrupamiento (enlazamiento simple) basados en especies y géneros para establecer las relaciones entre las regiones utilizando el índice de Jaccard. Para definir qué géneros determinan los agrupamientos en las regiones, se hizo un análisis de agrupamiento de dos vías (McCune & Grace, 2002), así como un escalamiento no métrico multidimensional (*non-metric multidimensional scaling*, NMS) para establecer las relaciones entre las zonas de vida, pero separando las andinas según el sistema cordillerano (cordillera Occidental, Central, Oriental y Sierra Nevada de Santa Marta), así como para establecer un potencial gradiente de la líquenobiota y obtener un modelo multivariado para clasificar zonas de vida con base en registros de líquenes. Se usó el índice de similitud de Jaccard para el NMS. Todos los análisis se efectuaron en PAST® 4.0 (Hammer, *et al.*, 2001).

Por último, se estimó un mapa de la riqueza de los líquenes de toda Colombia (solo de los lugares con datos de líquenes). Para este fin, se asignaron coordenadas a todas las especies en las localidades de recolección y en DIVA-GIS se estimó la riqueza por cada celda de 0,5 ° (Hijmans, *et al.*, 2001). También se calculó la elevación por celda de muestreo (promedio), con el fin de evaluar su relación con la riqueza de especies de líquenes.

En cuanto a la riqueza de especies, se usaron los estimadores de riqueza Chao 1 y Jackknife 1 para estimar la riqueza por región y determinar qué tanto se conoce de la diversidad en cada región.

Resultados

Se registraron cerca de 1.617 especies de hongos liquenizados para toda Colombia agrupados en 259 géneros y 66 familias. La región paramuna presentó 419 especies, la montana 475, la premontana 421 y Chocó 405, en tanto que en el Caribe solo se registraron 60 especies, es decir que las regiones montana y premontana, el páramo y Chocó aportaron el mayor número de géneros. Al considerar las regiones en un sentido más amplio, en la región de zonas bajas (Ama + Cho) se encontraron 357 especies, en la Andina, 504 y en el bosque seco, 141 (Tabla 1). En cuanto a los géneros, en la región Amazonía+Chocó se registraron 127, en el bosque seco, 91 y en los Andes, 181.

De las especies encontradas, 903 están presentes exclusivamente en una región (56 %), 321 en dos (19 %), 262, en 3 a 4 regiones (16 %) y 23 especies se registraron en 8 a 14 regiones (0,5 %). En cuanto a las especies indicadoras por región, en el páramo hubo el mayor número de especies restringidas, seguido por el bosque húmedo del Chocó y el premontano, en tanto que en el bosque seco del Magdalena y el Caribe se registraron menos especies restringidas (Tabla 1). En términos de regiones en el más amplio sentido, los bosques húmedos (Amazonía+Chocó) tuvieron 316 especies restringidas, la región Andina, 289 y el bosque seco, 132. En términos de géneros indicadores, el páramo presentó el mayor número (21), seguido por la Amazonía (15), y Chocó (11), en tanto que en las regiones Caribe, Caribe seco, Valle seco y Magdalena seco, no se registraron géneros (Tabla 1). En la región andina se registraron 65 géneros de distribución restringida, en el bosque húmedo de zonas bajas, 37 y en el seco, 10.

Relación entre regiones

El análisis de agrupamiento por especies de líquenes evidenció la existencia de dos grupos grandes: uno formado por ecosistemas andinos (Andes) y otro por el resto de regiones. El segundo grupo se subdividió en un ecosistema húmedo de zonas bajas (Amazonía y Chocó) y en otro de bosques secos, el Caribe y la Orinoquía. Los grupos más pequeños estaban conformados por el bosque seco del Cauca, el bosque húmedo del Magdalena y el bosque seco del Caribe, así como por el bosque seco del Magdalena y la Orinoquía. El análisis desde la perspectiva de los géneros evidenció un patrón similar al basado en las especies (Figura 1).

Tabla 1. Número de géneros y especies restringidos de cada región analizada

Región	Especies	Géneros	Recolecciones	Especies restringidas	Géneros restringidos	Especies RES (%)	Géneros RES (%)
BHAma	275	78	291	117	15	43	19,2
BHCho	385	103	790	158	12	41	11,7
BHMag	229	81	317	64	3	28	3,7
Premontano	385	118	803	86	8	22	6,8
Caribe	66	27	64	14	0	21	0,0
Montano	449	118	1518	127	8	28	6,8
Orinoquía	168	56	194	48	4	29	7,1
Paramo	400	99	1273	203	23	51	23,2
SecoCar	142	57	163	51	0	35	0,0
SecoCau	181	83	449	65	0	36	0,0
SecoMag	79	38	111	12	0	15	0,0
Andina	890	181	-	289	65	32	35,9
Seco	320	91	-	132	10	41	11,0
Amazonía+Cho	556	127	1078	316	38	57	29,6

BHAma= bosque húmedo Amazonía, BHCho= bosque húmedo Chocó, BHMag= bosque húmedo Magdalena, SecoCar= bosque seco Caribe, SecoCau= seco Cauca, SecoMag= seco del Magdalena

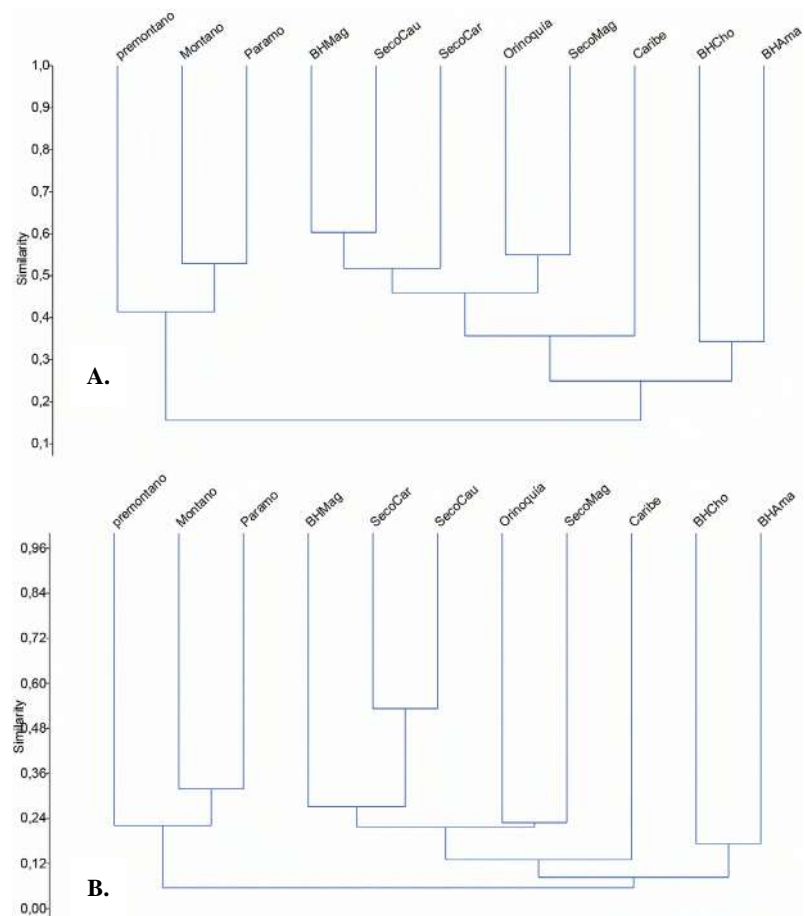


Figura 1. Análisis de agrupamiento para géneros (A) y especies (B) entre regiones de Colombia

Las relaciones de recambio de especies entre zonas de vida evidenciaron varios patrones (**Tabla 2**). La liquenobiota de los bosques húmedos tuvo gran afinidad con la de los bosques del Chocó y Amazonas, incluida la Orinoquía. En contraste, en estos bosques de elevaciones bajas se registró poca similitud con los páramos (3,3-5,0 %) y los bosques montanos (13,67-14,82 %). Debe señalarse que en el bosque húmedo del Chocó se registró una gran similitud con el bosque seco del Magdalena. Asimismo, el bosque húmedo de esta región mostró una mayor afinidad con el bosque seco de la misma región, el bosque seco del río Cauca y el bosque del Caribe, pero poca similitud con el bosque húmedo de la Amazonía y el páramo. La Orinoquía, además de su gran similitud con los bosques de la Amazonía, Chocó y Magdalena, también tuvo una alta afinidad con los bosques secos y el Caribe; en esta zona de vida se reportaron índices de similitud con poca variación, con valores bajos solo en los páramos y el bosque montano (**Tabla 2**). Los bosques secos presentaron altas afinidades entre sí y con los bosques húmedos de la Amazonía; el bosque seco del río Cauca tuvo una mayor afinidad con el bosque seco del Magdalena, el cual registró gran similitud con el bosque húmedo del Magdalena y el Chocó. Estos bosques secos también tuvieron gran afinidad con el bosque premontano.

En cuanto al bosque del Caribe, se registró su gran afinidad con los bosques premontanos y húmedos del Magdalena, y poca afinidad con los bosques altoandinos, aunque fue la zona de vida de elevaciones bajas de mayor similitud con el páramo. Por otro lado, los páramos registraron poca afinidad con los bosques húmedos, la Orinoquía y los bosques secos, y tuvo los valores promedios de similitud más bajos comparados con las otras zonas de vida (en promedio de 11,63 %), patrón que también se registró en el bosque húmedo de la Amazonía (16,17 %).

El NMS tuvo un patrón similar al encontrado en el análisis de agrupamiento, con una clara separación entre el bosque seco, el húmedo, el premontano, el montano y el páramo (**Figura 2**). Estas regiones formaron un gradiente a lo largo del primer eje del NMS, con los bosques de elevaciones bajas (húmedo y seco) al lado izquierdo y los páramos al lado derecho. También se encontró un agrupamiento con respecto a la cordillera a lo largo del segundo eje del NMS. Solamente el bosque montano y el páramo de la Sierra Nevada mostraron un agrupamiento.

Géneros indicadores o endémicos

En la composición de los géneros se evidenció un patrón de separación entre regiones, lo que se vio reflejado en la presencia de géneros potencialmente indicadores en cada región

Tabla 2. Similitud entre las zonas de vida con base en su liquenobiota

	Porcentaje										
	BHAma	BHCho	BHMag	Premontano	Caribe	Montano	Orinoquía	Páramo	SecoCar	SecoCau	SecoMag
BHAma		17,26	8,78	7,36	4,76	3,78	9,45	1,60	7,12	7,36	5,87
BHCho	34,31		13,55	13,31	3,04	7,19	9,14	1,36	8,18	13,40	9,32
BHMag	32,66	34,21		15,54	13,65	5,34	25,64	2,14	20,83	33,42	24,77
Premontano	24,59	30,38	34,53		6,00	29,64	8,81	14,64	9,32	18,85	6,13
Caribe	22,53	11,25	30,69	13,63		1,77	13,02	1,35	12,34	8,97	17,14
Montano	14,0	18,2	16,80	51,62	6,07		2,52	31,89	3,21	7,52	1,96
Orinoquía	31,50%	23,38	51,50	22,64	42,99	11,86		1,12	19,11	19,33	22,90
Páramo	7,99	4,75	8,44	31,23	4,79	52,90%	4,50		1,11	4,30	1,30
SecoCar	24,43	21,41	50,21	22,98	38,05	11,54%	50,32	6,27%		53,27	18,98
SecoCau	22,12	32,15	60,29	43,17	21,92	24,31%	39,07	12,56	53,36		22,14
SecoMag	23,46	19,76	46,95	19,04	44,83	8,10%	54,96	3,18	51,83	35,78	

BHAma= bosque húmedo Amazonía, BHCho= bosque húmedo Chocó, BHMag= bosque húmedo Magdalena, SecoCar= bosque seco Caribe, SecoCau= seco Cauca, SecoMag= seco del Magdalena

analizada (**Tabla 3**). El análisis de agrupamiento de dos vías permitió establecer cuáles especies definían las regiones en un sentido amplio y cuáles eran indicadoras de una región específica. Este análisis permite establecer los géneros que conforman el bosque seco, la región andina y el bosque húmedo, así como los géneros de amplia distribución en las regiones (**Figura 3**).

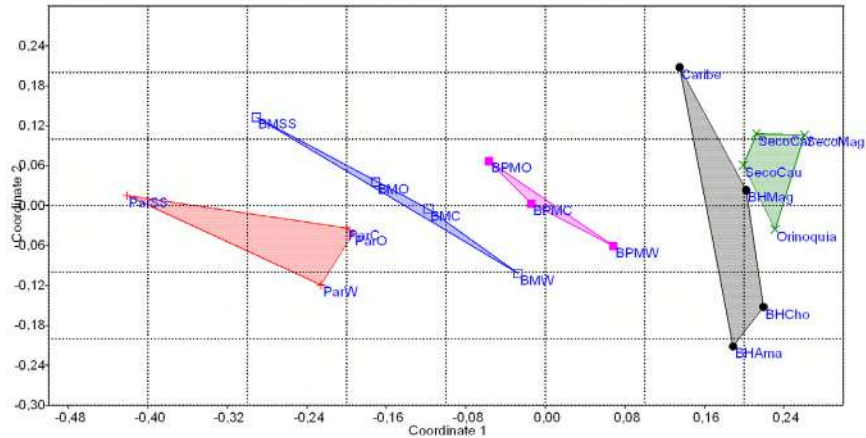


Figura 2. NMS (*non-metric multidimensional scaling*) para zonas de vida basado en hongos liquenizados

Tabla 3. Géneros de líquenes indicadores por región

Región	Géneros
BHAmá	<i>Arthotheliopsis, Brasilicia, Caleniopsis, Dimelaena, Eremothecella, Lasioloma, Loflammea, Loflammiopsis, Microtheliopsis, Phylloblastia, Phyllogyalidea, Physcidia, Platythecium, Rubrotricha,</i>
BHCho	<i>Amazonomyces, Malmidea, Clypeopyrenis, Distopyrenis, Fibrillithecis, Graphina, Lecania, Myeloconis, Pyrenidium, Sulzbacheromyces, Thecaria, Wirthiotrema</i>
BHMAG	<i>Anthracothecium, Bogoriella, Sulcopyrenula,</i>
Premontano	<i>Acanthotheciopsis, Architrypethelium, Auriculora, Gomphillus, Redingeria, Rinodina, Schismatomma,</i>
Montano	<i>Acarospora, Corella, Candelariella, Nephromopsis, Flavopunctelia, Phlyctis, Relicina,</i>
Orinoquia	<i>Mycoporum, Polyblastidium, Flegographa, Erythroducton</i>
Páramo	<i>Acantholichen, Alectoria, Baeomyces, Bryoria, Cetraria, Cetrariastrum, Coccotrema, Cryptococcus, Flavoparmelia, Hypogymnia, Lepraria, Megaspora, Menegazzia, Micarea, Parmelia, Parmelina, Placopsis, Psoroma, Solorina, Thamnolia, Umbilicaria</i>
Amplia	<i>Arthonia, Bacidina, Coccocarpia, Graphis, Coenogonium, Herpothallon, Leptogium, Malmidea, Ocellularia, Parmotrema, Phaeographis, Porina, Phyllopsora, Pyrenula, Trypethelium</i>
Amazonas + Chocó	<i>Aderkomyces, Aulaxina, Bapalmuia, Byssolecania, Calenia, Chroodiscus, Coniarthonia, Gyrotrema, Sporopodium, Amazonomyces, Arthotheliopsis, Brasilicia, Caleniopsis, Clypeopyrenis, Dimelaena, Distopyrenis, Eremothecella, Fibrillithecis, Lasioloma, Lecania, Loflammea, Loflammiopsis, Malcolmiella, Microtheliopsis, Myeloconis, Phylloblastia, Phyllogyalidea, Physcidia, Platythecium, Pyrenidium, Rubrotricha, Sclerophyton, Sulzbacheromyces, Thecaria, Triclinum, Wirthiotrema,</i>
Seco	<i>Bactrospora, Lecanographa, Peltula, Ramonia, Sanguinotrema, Schistophoron, Sporostigma</i>
Andes	<i>Acantholichen, Acanthotheciopsis, Acarospora, Alectoria, Anzia, Architrypethelium, Auriculora, Baeomyces, Bryoria, Bunodophoron, Candelariella, Cetraria, Cetrariastrum, Cladina, Coccotrema, Collema, Cora, Corella, Cryptococcus, Dibaeis, Diploschistes, Erioderma, Hypotrachyna, Flavoparmelia, Flavopunctelia, Gomphillus, Phyllogyalidea, Gyalideopsis, Hypogymnia, Icmadophila, Leioderma, Lepraria, Sanguinotrema, Lobariella, Megaspora, Menegazzia, Micarea, Nephromopsis, Normandina, Oropogon, Pannaria, Parmelia, Parmeliella, Parmelina, Parmotremopsis, Peltigera, Phlyctis, Phlyctidia, Phyllophthalmaria, Placopsis, Pseudocyphellaria, Psoroma, Punctelia, Redingeria, Relicina, Rhizocarpon, Rinodina, Schismatomma, Solorina, Sticta, Tephromela, Thamnolia, Umbilicaria, Xanthoparmelia</i>

BHAmá= bosque húmedo Amazonía, BHCho= bosque húmedo Chocó, BHMAG= bosque húmedo Magdalena

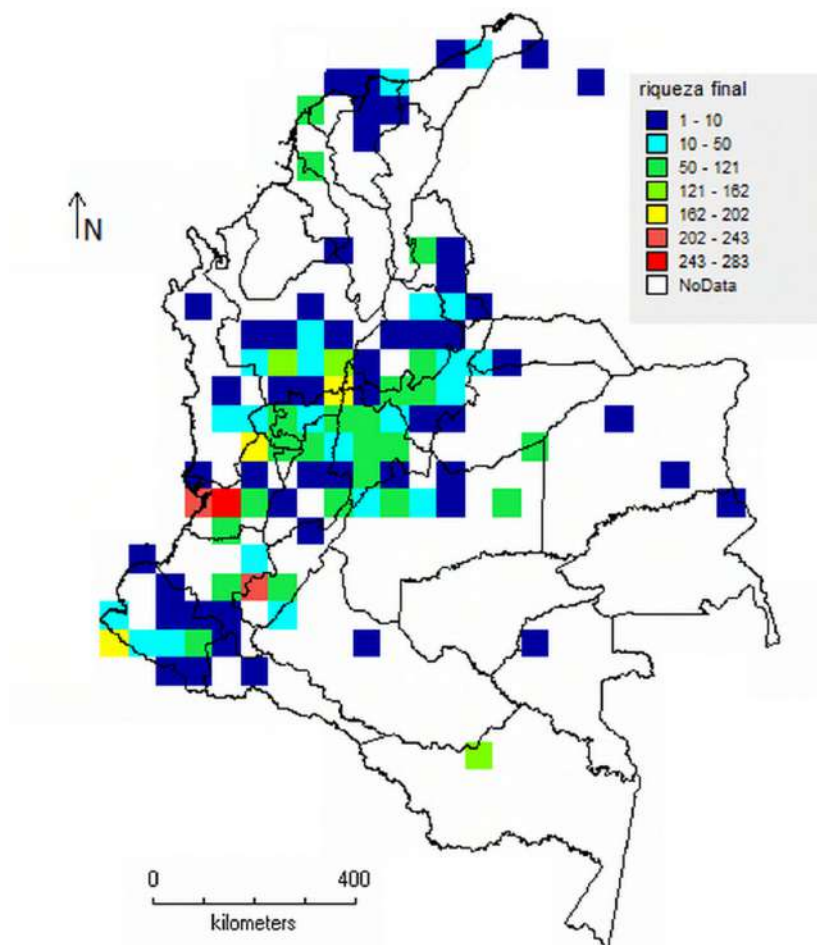


Figura 4. Mapa de riqueza de especies de líquenes de Colombia

Riqueza de líquenes por regiones

La mayor riqueza estimada se registró en las regiones de páramo y bosque montano, en tanto que fue más baja en el bosque seco (**Tabla 4**). Este patrón se observó para todos los estimadores de riqueza usados. Las curvas de acumulación de especies sugieren que se ha muestreado entre 42 y 79 % de la diversidad de líquenes de cada región. El bosque seco fue la región con menor representatividad y el bosque húmedo del Chocó, el de la más alta. Para Colombia se estimaron entre 1.971 y 2.980 especies, lo cual se refleja en un 54 a 82 % de representatividad del muestreo.

Discusión

Este estudio constituye una aproximación a la composición y riqueza de líquenes de las distintas zonas de vida en Colombia. Los resultados evidenciaron la presencia de cerca de 1.617 especies de hongos liquenizados en su territorio, agrupadas en 259 géneros y 66 familias siendo las tres familias de mayor riqueza Graphidaceae, Parmeliaceae y Ramalinaceae, patrón diferente al que se ha propuesto en el gran árbol de las familias de mayor riqueza en el trópico: Graphidaceae, Trypetheliaceae y Pyrenulaceae (**Mendonça, 2019**). Por zonas de vida, el bosque montano fue el que más especies registró (449 especies), seguido del páramo (400 especies), el bosque premontano y el bosque húmedo del Chocó (385 especies), en tanto que el Caribe solo registró 66 especies. Asimismo, la región montana, la premontana, el páramo y el Chocó fueron las que más géneros registraron.

Esta mayor diversidad en las zonas de vida andinas y de bosque húmedo con elevaciones bajas puede explicarse por el efecto de un mayor muestreo y, posiblemente, una mayor diversidad inherente a estas zonas.

Previamente se habían reportado 189 especies de hongos liquenizados en el Chocó (385 en este estudio), 322 en la Amazonía (275), 379 en el Caribe (208), 131 en la Orinoquía (168), 285 en los páramos (400), 632 en el bosque premontano (385) y 758 en el montano (449), lo que se aparta en mucho de este estudio, tal vez porque antes no se había considerado la liquenobiota del bosque seco (Caribe, Cauca, Magdalena) y el bosque húmedo del Magdalena. Las diferencias en el número de especies reportadas se deben, primero, a los conceptos de zonas de vida manejados y a la incorporación de nuevos registros en el presente estudio. En este sentido, en el reporte anterior en el Caribe

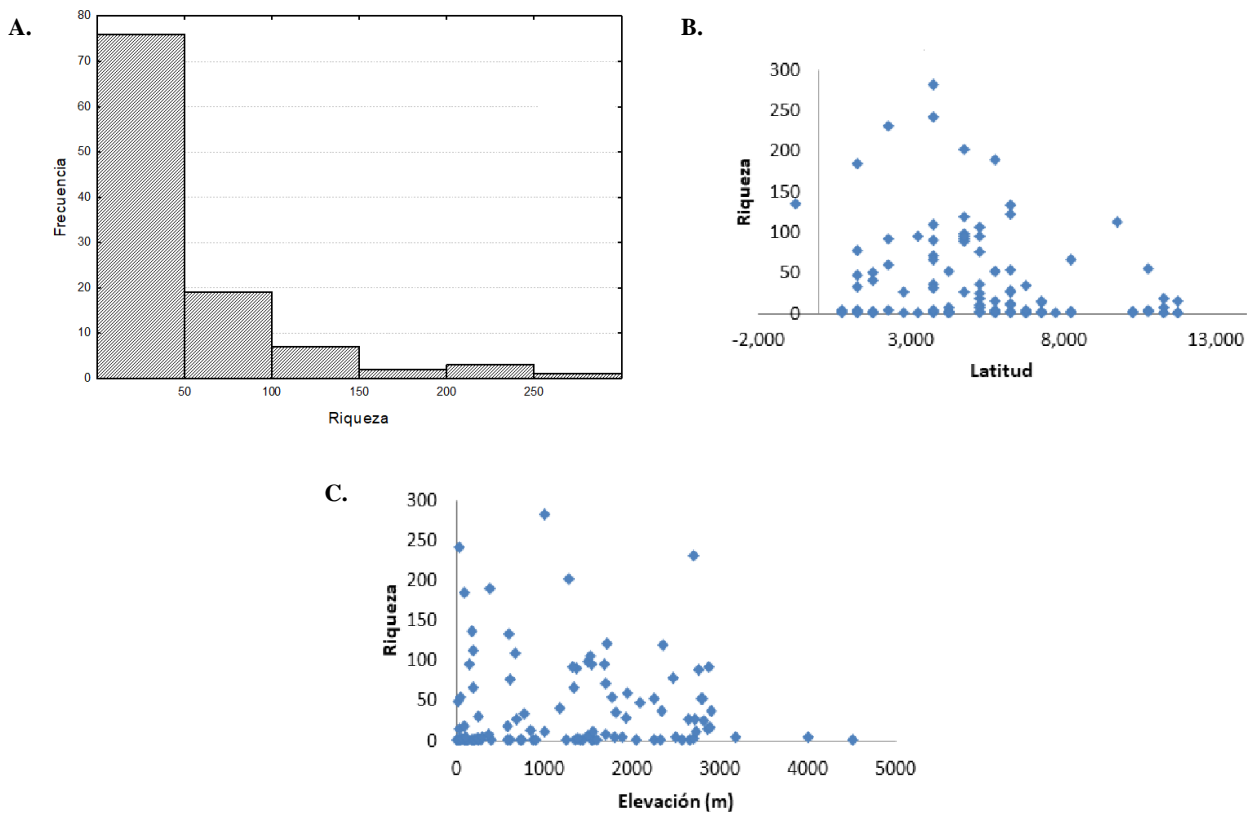


Figura 5. Riqueza de líquenes por celda (A), latitud (B) y elevación (C)

Tabla 4. Riqueza de especies de líquenes estimada por región

Región	Observado	Jackknife 1	Jackknife 2	Bootstrap	% muestreo		
					Jackknife 1	Jackknife 2	Bootstrap
Páramo	671	1108,14	1471,86	844,939			
Premontano	571	989,882	1315,47	741,061	57,7	43,4	77,1
Bosque Seco	488	860,636	1158,62	637,286	56,7	42,1	76,6
Montano	658	1093,94	1434,16	834,783	60,1	45,9	78,8
Chocó	574	961,2	1211,1	739,596	59,7	47,4	77,6
Colombia	1616	2452	2979,75	1971,64	65,91	54,23	81,96

se tuvieron en cuenta todas las formaciones vegetales, desde el bosque seco hasta el páramo, en tanto que en este se analizaron por separado los bosques secos y los húmedos del Caribe. Por otro lado, para el Chocó solo se contaba con registros puntuales en Cauca, Nariño y Chocó, en tanto que en este se incluyen registros en varias localidades del Cauca y el Valle del Cauca, lo cual explica el notorio incremento del número de especies para esta región. En cuanto a la Amazonía, no fue posible acceder a todos los registros y en las zonas de vida de la región andina, el menor registro para el bosque premontano y el montano se explicaría por la clasificación de las localidades, que antes frecuentemente carecían de georreferencias adecuadas. Por el otro lado, se cuenta con buenos registros para los páramos y se incorporaron listados recientes de otros en Colombia, lo cual incrementó el número de especies para esta zona de vida.

Además, en este estudio se reportan solo nueve especies de amplia ecología, en tanto que 903 tenían una distribución restringida. En estudios previos se registró un menor número de especies de distribución restringida y uno mayor de especies de amplia distribución, lo cual se explicaría por la inclusión de nuevos registros, los nuevos conceptos de especie y las nuevas especies consideradas en este estudio, lo que aumenta el número de aquellas con distribución restringida. Por otro lado, se encontró un mayor porcentaje de especies endémicas de las zonas de vida de páramo y de bosque húmedo de Amazonía y Chocó, así como de la Orinoquía, en tanto que fue más bajo en los bosques secos del Cauca y el Magdalena, en los bosques del Caribe y en los bosques húmedos del Magdalena; también se reportaron porcentajes intermedios en los bosques premontanos y montanos. Estos resultados coinciden con lo encontrado en otros grupos de organismos con mayor endemismo en los páramos, los bosques altoandinos y los bosques de la Amazonía, que son, a la vez, fuente de especies (fuente-sumidero) (**Kattan & Franco, 2004; Antonelli, et al., 2018**). En contraste, los bosques premontanos y del Caribe registraron un fuerte efecto en masa desde estas fuentes, lo cual explica el bajo endemismo. El patrón de distribución restringida fue más acusado cuando se consideraron los géneros de líquenes, los cuales mostraron un mayor nivel de “endemismo” en las regiones andinas y de bosques húmedos.

La composición de géneros mostró patrones de separación entre las regiones, lo que se vio reflejado en especies y géneros potencialmente indicadores de cada región según el análisis de agrupamiento de dos vías, en el que se establecieron los géneros que definen las regiones en sentido amplio y las zonas de vida. Los hongos liquenizados se han usado ampliamente como bioindicadores de contaminación atmosférica y continuidad ecológica (**Riva-Plata, et al., 2008**), tanto a nivel de especie como de biotopos (**Ramírez-Moran, et al., 2016**). En este caso se observó que los líquenes tienen un gran potencial como bioindicadores en las zonas de vida de Colombia tanto a nivel de especie como de géneros, lo que se explicaría por la selectividad ecológica de los líquenes, la cual produce ensamblajes únicos a lo largo de gradientes climáticos y ecológicos.

Las relaciones de recambio de especies entre las zonas de vida adoptaron varios patrones. En la Orinoquía se evidenció un alto intercambio de especies con los bosques secos y húmedos, lo que indica que en esta región se da un tipo de transición hacia la liquenobiota de bosque seco (Caribe, Magdalena y río Cauca). El bosque premontano tuvo una gran afinidad con los bosques montanos, los secos y del Caribe, lo cual indica un flujo de especies de los bosques secos y montanos hacia los bosques premontanos. Por otro lado, los páramos fueron las regiones de menor afinidad con el resto de regiones, excepto con los bosques montanos. Los páramos están compuestos por especies principalmente meridionales, con un nivel de endemismo y una tasa de especiación elevados, lo que da lugar a una zona de vida única (**Madriñán, et al., 2013**). Asimismo, los bosques de la Amazonía y el Chocó se consideran puntos calientes y fuente de especies para otras regiones neotropicales (**Antonelli, et al., 2018**). La gran similitud entre los bosques húmedos de la Amazonia y el Chocó coincide con lo encontrado en animales, plantas y líquenes folícolas, lo cual se atribuye a que estas regiones son refugios de vida del Pleistoceno, el Pleioceno y el Mioceno (**Carvalho, 2013; Latrubesse, et al., 2010**;

van der Hammen, 1991; Santos, *et al.*, 2019). Sin embargo, estos bosques presentan diferencias tanto en especies como géneros, lo cual indica que a pesar del surgimiento de los Andes, estas dos regiones previamente conectadas se ha diferenciado (Hoorn, *et al.*, 2010; Pennington & Dick, 2010).

Las relaciones biogeográficas de los hongos liquenizados se han estudiado poco, sobre todo en el trópico. Sin embargo, algunos estudios han abordado la biogeografía histórica a gran escala (Arcadia, 2013) y las relaciones de riqueza y la composición de las especies en ecorregiones de Italia (Martelos, *et al.*, 2020). En el Neotrópico se han hecho estudios como el de Santos, *et al.* (2019) que muestran las afinidades biogeográficas de los líquenes folícolas de los *brejos de altitude* de Brasil con otras regiones del Neotrópico, como el Chocó y la Amazonía, lo que evidencia su diversidad excepcional, resultado similar al de este estudio. También se ha encontrado que los líquenes son indicadores de la diferenciación de los *brejos de altitude* de la Catinga (Leite, *et al.*, 2015).

Este trabajo es el primero que trata de establecer las afinidades biogeográficas entre distintas ecorregiones de Colombia. La riqueza de especies de líquenes estimada para el país fluctuó entre 1.972 y 2.980, lo cual indica que faltan muchas especies por reportar en el país. En estudios previos se estimó un número de 3.600 especies para Colombia (Lücking, *et al.*, 2009), es decir, casi 700 especies más. Esta diferencia se debe principalmente a los algoritmos usados para estimar dicha riqueza: en este estudio se estimó usando cada zona de vida como unidad de muestreo, en tanto que Lücking, *et al.* (2009) emplearon el área y los tipos de ecosistemas, lo que implicaría que en dicho estudio se habría estimado mejor la riqueza de líquenes del país. El mapa de la riqueza de especies de líquenes evidenció que esta era mayor en las zonas del Chocó, Amazonas y Andes, comparada con las de bosque seco. Varios grupos de organismos han registrado una elevada riqueza en estas regiones (Kattan & Franco, 2004; Gentry, 1982; Madriñán, *et al.*, 2013; Soto, *et al.*, 2019), lo que se ha relacionado con factores históricos y climáticos que han favorecido una gran diversificación. Los bosques húmedos del Amazonas y el Chocó fueron los más diversos en hongos liquenizados, un patrón que ocurre en plantas y animales (Antonelli, *et al.*, 2018), y que en estos ecosistemas se ha asociado con una elevada productividad debido a las altas temperaturas y la precipitación.

La riqueza de hongos liquenizados con respecto al gradiente de elevación en Colombia evidenció un decrecimiento monotonico, con un ligero aplanamiento en elevaciones bajas. Este patrón se ha observado en plantas y animales (Gentry, 1982; Kattan & Franco, 2004; Soto, *et al.*, 2019) asociado con factores climáticos. El patrón encontrado en este estudio es contrario al registrado en el catálogo de plantas (Bernal, *et al.*, 2015), en el que la riqueza responde a un patrón unimodal, con un pico en elevaciones medias. Esta diferencia se debe a las distintas formas de estimación de la riqueza: basada en bandas altitudinales en el catálogo de plantas y en celdas geográficas en este estudio. Debe señalarse que Colombia tiene distintos sistemas de gradientes altitudinales en los valles interandinos secos y las planicies húmedas de la Amazonía y el Chocó, por lo que se presentan distintos gradientes de riqueza asociados con las particularidades climáticas del gradiente altitudinal (Kattan & Franco, 2004). En este sentido, la aproximación adoptada en este estudio permite evidenciar esas variaciones, aunque debe estudiarse cada gradiente.

Por último, este es el primer análisis de las relaciones biogeográficas y la riqueza de los líquenes en Colombia. La Amazonía, el Chocó biogeográfico y los páramos fueron las regiones con mayor riqueza y endemismo de especies y géneros. En cuanto a las relaciones fitogeográficas, fue posible establecer una mayor afinidad entre los bosques húmedos de la Amazonía y el Chocó, entre los bosques premontanos, montanos y páramos, y entre los bosques secos interandinos y del Caribe. En la Orinoquía se registró una mayor relación con el bosque seco del Magdalena, pero también tuvo un alto recambio de especies con la Amazonía. Estas diferencias entre regiones implican la presencia de especies y géneros indicadores de cada región. La riqueza de especies de

líquenes evidenció un patrón unimodal con la latitud y decreciente con la elevación, lo cual se relacionaría con factores climáticos. Al considerar las amenazas que se ciernen sobre los bosques húmedos y secos de Colombia, los resultados del estudio en estas zonas de vida resaltan la importancia de generar estrategias de conservación, pues estos organismos son muy sensibles a la perturbación.

Contribución de los autores

JM: elaboración y depuración de las bases de datos; DD: obtención de los datos; ES: análisis.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Ahmadjian, V.** (1982). Holobionts have more parts. *Int. Lichenological Newsletter*. **15** (2): 19.
- Antonelli, A. & Sanmartin, I.** (2011). Why are there so many plant species in the Neotropics? *JSTOR*. **60** (2): 403-414.
- Antonelli, A., Zizka, A., Antunes C.F., Scharn, R., Bacon, C., Silvestro, D., Condamine, F.** (2018). Amazonia is the primary source of Neotropical biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **115**: 201713819. Doi: 10.1073/pnas.1713819115
- Arnold, A.E., Miadlikowska J., Higgins K.L., Sarvate S.D, Gugger P., Way A., Hofstetter V., Kauff F., Lutzoni F.** (2009). A phylogenetic estimation of trophic transition networks for ascomycetous Fungi: are lichens cradles of symbiotrophic fungal diversification? *Syst Biol*. **58**: 283-297.
- Arcadia, L.** (2013). Lichen biogeography at the largest scales. *The Lichenologist*. **45** (04): 565-578. Doi: 10.1017/S0024282913000170
- Baas-Becking, L.G.M.** (1934). *Geobiologie of inleiding tot de milieukunde*, The Hague, the Netherlands: W.P. Van Stockum & Zoon. 263 p.
- Bernal R., Gradstein S.R., Celis M.** (2016). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Carvalho, C. J. B.** (2013). Áreas de endemismo. En C. J. B. Carvalho & E. A. B. Almeida (Eds.). *Biogeografía da América do Sul: Padrões e Processos* (pp. 41-50). São Paulo: Roca.
- Díaz-Escandón, D., Soto-Medina, E., Lücking, R., Silverstone-Sopkin, P. A.** (2016). Corticolous lichens as environmental indicators of natural sulphur emissions near the sulphur mine El Vinagre (Cauca, Colombia). *The Lichenologist*. **48**: 147-159.
- Feria, S. & García, S.** (2019). Composición y riqueza de líquenes cortícolas en tres fragmentos de bosque seco tropical, Sucre – Colombia. Tesis de pregrado. Universidad de Sucre. 155 p.
- Feurerer, T. & Hawksworth, D. L.** (2007). Biodiversity of lichens, including a world-wide analysis of checklist data based on Takhtajan's floristic regions. *Biodiversity and Conservation*. **16**: 85-98. Doi: 10.1007/s10531-006-9142-6
- Gentry, A.H.** (1982). Patterns of Neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology*. **5**: 1-84.
- Guarino, L., Jarvis, A., Hijmans, R.J., Maxted, N.** (2002). 36 Geographic Information Systems (GIS) and the Conservation and Use of Plant Genetic Resources. *Managing Plant Genetic Diversity*. pp 387-404.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D.** (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. **4**: 9.
- Hawksworth, D.** (1988). The variety of fungal-algal symbioses, their evolutionary significance, and the nature of lichens. *Botanical Journal of the Linnean Society*. **96**: 3-20. Doi: 10.1111/j.1095-8339.1988.tb00623
- Hawksworth, D. & Grube, M.** (2020). Lichens redefined as complex ecosystems. *New Phytologist*. **227**: 1281-1283.
- Hijmans, R.J., Cruz, M., Rojas, E., Guarino, L.** (2001). DIVAGIS, Version 1.4. A geographic information system for the management and analysis of genetic resources data. Manual. International Potato Center, Lima, Peru. 38 p.
- Hoorn, C., Wesselingh, F. P., ter Steege, H., Bermúdez, M. A., Mora, A., Sevink, J., Antonelli, A.** (2010). Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution and biodiversity. *Science*. **330**: 927-931.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Alexander von Humboldt (I.Humboldt), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés” (Invemar) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2017). Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia (MEC) [mapa], Versión 2.1, escala 1:100.000.
- Kattan, G. & Franco, P.** (2004). Bird diversity along elevational gradients in the Andes of Colombia: Area and mass effects. *Global Ecology and Biogeography*. **13**: 451-458. Doi: 10.1111/j.1466-822X.2004.00117
- Latrubesse, E. M., Cozzuol, M., da Silva-Caminha, S. A., Rigsby, C. A., Absy, M. L., Jaramillo, C.** (2010). The Late Miocene paleogeography of the Amazon Basin and the evolution of the Amazon River system. *Earth-Science Reviews*. **99**: 99-124.
- Leite, A., Barreto, X., Menezes, A., Anjos de, S., de Sousa, L., Aptroot, A., Lüicking, R., dos Santos, V. M., da Silva Cáceres, M. E.** (2015). Epiphytic microlichens as indicators of phytosociological differentiation between Caatinga and Brejos de Altitude. *Acta Botanica Brasilica*. **29** (4): 457-466.
- Lüicking, R.** (2008). Taxonomy: A discipline on the brink of extinction: Are DNA barcode scanners the future of biodiversity research? *Archives des Sciences*. **61**: 75-88.
- Lüicking, R., Rivas-Plata, E., Chaves, J. L., Umaña, L., Sipman, H. J. M.** (2009). How many tropical lichens are there... really? In *Diversity of Lichenology. Jubilee Volume*. A. Thell, M. R. D. Seaward & T. Feuerer (eds). *Bibliotheca Lichenologica*. **100**: 399-418.
- Lüicking, R., Seavey, F., Common, R., Beeching, S.Q., Breuss, O., Buck, W.R., Crane, L., Hodges, M., Hodkinson, B.P., Lay, E., Lendemer, J.C., McMullin, R.T., Mercado-Díaz, J.A., Nelsen, M.P., Rivas Plata, E., Safranek, W., Sanders, W.B., Schaefer, H.P., Seavey, J.** (2011). The lichens of Fakahatchee Strand Preserve State Park, Florida: proceedings from the 18th tuckerman workshop. *Bull. Florida Mus. Nat. Hist.* **49**: 127-186.
- Madrrián S, Cortés A.J., Richardson J.E.** (2013). Páramo is the world's fastest evolving and coolest biodiversity hotspot. *Frontiers in Genetics*. **4**: 192.
- McCune, B., Grace J.B.** (2002). *Analysis of Ecological Communities*. MjM Software, Glenden Beach, Oregon, USA. 304 p.
- Martellos, S., d'Agostino, M., Chiarucci, A., Nimis, P.L. and Nascimbene, J.** (2020). Lichen Distribution Patterns in the Ecoregions of Italy. *Diversity*. **12**: 294.
- Mendonça, C. de O., Aptroot, A., Lüicking, R., Cáceres, M. E. da S.** (2020). Global species richness prediction for Pyrenulaceae (Ascomycota: Pyrenulales), the last of the “big three” most speciose tropical microlichen families. *Biodiversity and Conservation*. **29** (3): 1059-1079.
- Muggia, L. & Grube, M.** (2010). Fungal composition of lichen thalli assessed by single strand conformation polymorphism. *Lichenologist*. **42**: 461-473.
- Pennington, R. T. & Dick, C. W.** (2010). Diversification of the Amazonian flora and its relation to key geological and environmental events: a molecular perspective. In C. Hoorn & F. P. Wesselingh (Eds.). *Amazonia, landscape and species evolution* (pp. 373-385). Oxford: Blackwell.
- Peláez, R., Moncada, B., Lüicking, R.** (2013). Líquenes asociados a palma de moriche (*Mauritia flexuosa*) y vegetación de bosque de galería en San Martín, Meta. Tesis de pregrado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 119 p.
- Rahbek, C.** (2005). The role of spatial scale and the perception of large-scale species-richness patterns. *Ecol. Lett.* **8**: 224-239.
- Ramírez-Morán, N.A., León-Gómez M., Lüicking R.** (2016). Uso de biotipos de líquenes como bioindicadores de perturbación en fragmentos de bosque altoandino (Reserva biológica “Encenillo”, Colombia). *Caldasia*. **38** (1): 31-52.
- Rangel-Ch., J.O.** (2004). Ecosistemas del Chocó biogeográfico: síntesis final. En: Rangel-Ch., J.O. (ed). *Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica*: 937-976. Instituto de Ciencias Naturales. Bogotá, D.C.
- Rivas-Plata, E., Lüicking, R., Lumbsch, H.T.** (2008). When family matters: an analysis of Thelotremaaceae (lichenized Ascomycota: Ostropales) as bioindicators of ecological continuity in tropical forests. *Biodivers. Conserv.* **1**: 1-33.
- Santos, J. C., Coloma, L. A., Summers, K., Caldwell, J. P., Ree, R., Cannatella, D. C.** (2009). Amazonian amphibian diversity is primarily derived from late Miocene Andean lineages. *PLoS Biology*. **7** (3): e1000056.
- Santos, V. M., Silva Cáceres, M. E., Lüicking, R.** (2019). Diversity of foliicolous lichens in isolated montane rainforests (Brejos) of northeastern Brazil and their biogeography in a Neotropical context. *Ecological Research*. **35** (1): 1-16.

-
- Soto-Medina E. A., Lücking R., Silverstone-Sopkin P. A., Torres A. M.** (2019). Changes in functional and taxonomic diversity and composition of corticolous lichens in an altitudinal gradient in Colombia. *Cryptogamie, Mycologie*. **40** (6): 97-115.
- Spribile, T., Tuovinen, V., Resl, P., et al.** (2016). Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens. *Science*. **353**: 488-492.
- U'Ren J.M., Lutzoni F., Miadlikowska J., todos los autores.** (2012). Host and geographic structure of endophytic and endolichenic fungi at a continental scale. *Am J Bot.* **99**: 898-914.
- Van der Hammen, T.** (1991). Palaeoecological background: Neotropics. In N. Myers (Ed.), *Tropical forests and climate* (pp. 37-47). Dordrecht: Springer.
- Vargas-Mendoza, L., Herrera, L., Moncada, B.** (2014). Expedición liquénica en Chámeza-Casanare. Tesis de pregrado. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 145 p.

Ciencias Naturales

Artículo original

Avances en la producción de líneas de tomate *Solanum lycopersicum* Mill. con resistencia genética al perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae)

Advances in the production of *Solanum lycopersicum* Mill. tomato lines with genetic resistance to the fruit borer *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae)

Franco Alirio Vallejo Cabrera

Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Palmira, Colombia

Artículo de posesión para admisión como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen

El perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae) es una de las principales plagas del cultivo del tomate en Colombia y reduce la producción hasta en un 77 %. Todas las variedades comerciales de tomate son sensible a la plaga. El control químico es el método más utilizado mediante la aplicación de insecticidas altamente tóxicos cuya eficiencia puede verse comprometida debido a la biología del insecto. La resistencia genética a esta plaga como método de control sostenible y económico se ha estudiado y aprovechado poco. En el presente artículo se hace una síntesis del estudio del Grupo de investigación en mejoramiento genético y producción de hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia, cuyo objetivo fue obtener líneas de tomate con resistencia genética al perforador del fruto *N. elegantalis* en especies silvestres del género *Solanum* spp. Dicha resistencia, presente en las especies silvestres del género, pudo ser transferida con relativo éxito mediante hibridación sexual a la variedad comercial UNAPAL Maravilla, de la especie *Solanum lycopersicum*. Los retrocruzamientos, acompañados de selección, permitieron obtener líneas recombinantes RC4 con resistencia al perforador y peso promedio del fruto, color y formato similares al del padre recurrente.

Palabras clave: Hibridación interespecífica; *Solanum habrochaites*; Retrocruzamiento; Introgresión genética; Selección.

Abstract

The fruit borer *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae) is one of the main pests of tomato crops in Colombia reducing its production by up to 77 %. All commercial tomato varieties are susceptible to the pest. Chemical insecticides are the most used control method whose efficiency is doubtful due to the biology of the insect. Genetic resistance to this pest is poorly understood and exploited. This paper is a synthesis of the studies carried out by the research group on “Genetic improvement and vegetable production” at *Universidad Nacional de Colombia* in search of tomato lines with genetic resistance to the fruit borer from wild species of *Solanum* spp. We were able to transfer such resistance by sexual hybridization to the commercial variety UNAPAL Maravilla of the species *Solanum lycopersicum*. Backcrossing accompanied by selection allowed us to obtain recombinant RC4 plants with fruit borer resistance and average fruit weight close to that of the recurrent parent.

Keywords: Interspecific hybridization; *Solanum habrochaites*; Backcrossing; Genetic introgression; Selection.

Citación: Vallejo Cabrera FA. Avances en la producción de líneas de tomate *Solanum lycopersicum* Mill. con resistencia genética al perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):136-146, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1205>

Editor: Jairo Castaño-Zapata

***Correspondencia:**

Franco Alirio Vallejo Cabrera;
favallejoc@unal.edu.co

Recibido: 7 de mayo de 2020

Aceptado: 6 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

El tomate *Solanum lycopersicum* Mill. es la hortaliza más importante en Colombia y en el mundo dada la superficie sembrada, el volumen y el valor de la producción, así como por su consumo y el sustento económico que representa para pequeños, medianos y grandes agricultores. Sus frutos se consumen frescos y se utilizan como materia prima para la industria. En el 2018 en Colombia se cultivaron 11.227 hectáreas con un rendimiento promedio de 46,67 ton/ha y una producción total de 527.313 toneladas. (FAOSTAT, 2018). Sus frutos tienen un gran valor nutricional por el alto contenido de beta carotenos (licopeno), vitamina A y C, minerales (calcio, hierro, fósforo y potasio) y aminoácidos (tiamina y lisina). El licopeno es un poderoso antioxidante que se asocia con la baja incidencia de cáncer en humanos (Burbano & Vallejo, 2017).

El perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae) es una de las plagas que más afecta la producción de tomate, causando pérdidas estimadas entre el 13 y el 77 % de los cultivos (Vallejo, 1999; Eiras & Blackmer, 2003; Almirón, et al., 2018). Inicia su ataque en los bordes del cultivo y, posteriormente, lo coloniza totalmente. Las hembras hacen la oviposición al inicio de la floración o de la formación de los primeros frutos, lo que produce un daño considerable porque, al nacer, la larva se introduce rápidamente en el fruto, lo consume por dentro y sale para transformarse en pupa dejando un orificio que permite la entrada de otros insectos o patógenos que deterioran completamente el fruto (Casas, et al., 2012). Figuras 1 y 2.

En Colombia todas las variedades e híbridos del tomate son sensibles al perforador del fruto. El único método de control que están utilizando los agricultores para salvaguardar la producción comercial es la aplicación de insecticidas químicos altamente tóxicos; sin embargo, debido a que la larva perfora rápidamente el fruto después de eclosionar y permanece en su interior durante su desarrollo larval, dicho control es difícil y de cuestionable eficiencia (Salinas, et al., 1993).

La resistencia varietal, es decir la habilidad de una planta para defenderse del ataque de un insecto plaga, es la mejor forma de control, pero poco se ha estudiado y utilizado esta resistencia en el cultivo del tomate; solamente en Brasil y en Colombia se han hecho algunas investigaciones tendientes a dilucidar el mecanismo de la resistencia. Esta es una alternativa altamente deseable y ecológicamente sostenible, que disminuye el uso de insecticidas, los riesgos de contaminación ambiental y de salud, y garantiza una producción limpia y económicamente rentable (Vallejo & Estrada, 2013).

El tomate *Solanum lycopersicum* Mill. tiene una gran variedad de parientes silvestres que poseen resistencia a 16 insectos plagas (Rick, 1973; Vallejo, 1999) y, por lo tanto, constituyen una fuente adecuada de germoplasma para la obtención de cultivares resistentes a tales insectos. Entre estos parientes silvestres se encuentran las especies *Solanum*

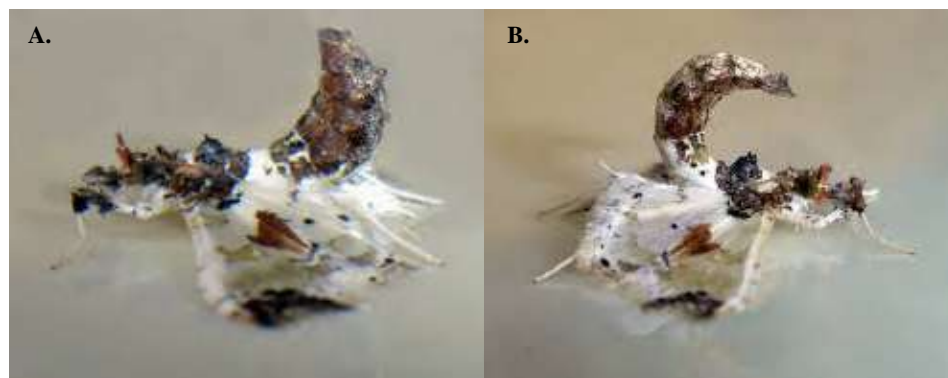


Figura 1. Perforador del fruto del tomate *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidoptera: Crambidae). **A)** Hembra. **B)** Macho (Casas, et al., 2012)



Figura 2. Fruto de tomate dañado por el perforador *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée 1854) (Lepidóptera: Crambidae) (Casas, *et al.*, 2012)

habrochaites, ubicada en el acervo genético secundario, y *Solanum peruvianum*, ubicada en el acervo genético terciario, las cuales se consideran posibles fuentes de resistencia al perforador del fruto del tomate. Ambas especies se distribuyen en las vertientes occidental y central de los Andes, entre el sur del Ecuador, pasando por el Perú, y la zona norte de Chile (Rick, 1973; Vallejo, 1999).

La especie *S. habrochaites* posee dos variedades, *glabratum* y *typicum*. Ambas poseen frutos muy pequeños de color verde con rayas o verde oscuro en estado maduro, pero la forma *typicum* posee tallos, hojas y frutos más pilosos y flores de mayor tamaño. La forma *glabratum* se cruza sin dificultad y en ambas direcciones con el tomate cultivado, en tanto que la *typicum* presenta incompatibilidad unilateral con el tomate cultivado, obteniéndose semilla solo cuando se emplea el tomate cultivado como progenitor femenino. Kennedy (2003) reportó que el follaje de estas dos formas era letal para varias especies de insectos plaga debido a la presencia de tóxicos como las metil cetonas (2 tridecanona y 2 undecanona), presentes en los tricomas glandulares de tipo VI.

Ortiz (2012) estudió la heredabilidad del contenido de 2 tridecanona en cruzamientos de *S. lycopersicum* con *S. habrochaites* como factores de resistencia a insectos y encontró una segregación normal en la generación F₂, con valores extremos de baja frecuencia y abundancia de individuos con valores intermedios, lo que indica que se pueden seleccionar plantas con contenidos elevados de 2 tridecanona sin descuidar los caracteres de interés comercial en la búsqueda de nuevas líneas mejoradas. Los altos contenidos de 2 tridecanona en la especie *S. habrochaites* (cuatro veces superior a la variedad UNAPAL Maravilla) y en las plantas seleccionadas en la F₂, se relacionaron con el mecanismo de resistencia de la antibiosis. La especie *S. peruvianum*, por su parte, es una planta alógama, autoincompatible y no se cruza fácilmente con el tomate cultivado; sus frutos son muy pequeños, de color verde o verde blanco en estado maduro (Rick, 1980).

La variedad UNAPAL Maravilla es un cultivar de tomate tipo “chonto” producido por el Grupo de investigación en mejoramiento genético y producción de hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia. Su porte es intermedio (1,60 metros de altura), es de floración precoz y se cosecha a los 65 días. Se destaca por la alta producción por

planta (8 a 9 kilos) y el peso promedio del fruto es de 150 gramos. El fruto es ovalado, bilocular o trilocular y de consistencia firme, lo que permite la fácil manipulación durante el proceso de cosecha y poscosecha. (Vallejo & Estrada, 2004). El objetivo de este trabajo fue producir líneas de tomate con resistencia genética al perforador del fruto *N. elegantalis* (Guenée) a partir de especies silvestres del género *Solanum* spp.

Materiales y métodos

Las investigaciones se realizaron en el Centro Experimental de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, ubicado en el municipio de Candelaria, Valle del Cauca, corregimiento El Carmelo, a 3° 24' N y 76° 26' O y 980 m s.n.m., categorizado como una zona cálida moderada y semiárida, con 24 °C de temperatura promedio, 69 % de humedad relativa y 1.009 mm de precipitación promedio anual (Pardey, 2008).

Evaluación de la introducción de especies silvestres del género *Solanum* spp. resistentes al perforador del fruto

Se evaluó la resistencia a *N. elegantalis* de 12 especies silvestres del género *Solanum* spp. Como testigo sensible se usó la variedad UNAPAL Maravilla de la especie *S. lycopersicum* obtenida por la Universidad Nacional de Colombia (Tabla 1). Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones; la parcela experimental estaba compuesta por siete plantas. Con el fin de obtener una población adecuada del insecto en el campo, se sembraron surcos intercalados con la variedad sensible UNAPAL Maravilla. Para calificar la resistencia al perforador se utilizó la escala propuesta por Vallejo, et al. (2008) (Tabla 2). Se cuantificó el porcentaje de frutos afectados por el perforador, el número de orificios de salida y el número de larvas por fruto. De acuerdo con el porcentaje de frutos afectados, se le otorgó una calificación a cada introducción.

Se evaluó la respuesta del perforador del fruto a los mecanismos de resistencia de dos de las especies silvestres de *S. habrochaites* var. *glabratum* (PI 134417 y PI 134418) y una de *S. habrochaites* var. *typicum* (LA 1264) previamente caracterizadas como resistentes. Las plantas se sembraron dentro de una casa de mallas de forma circular en baldes plásticos también dispuestos en forma circular. Se utilizó el diseño completamente al azar con ocho repeticiones, así como la prueba de antixenosis o no preferencia. Se hicieron cinco liberaciones del insecto plaga y se midió el porcentaje de frutos con oviposiciones por planta, el número de huevos por fruto y el número de huevos por planta.

Tabla 1. Introducción de especies silvestres del género *Solanum* spp. evaluadas para determinar la resistencia al perforador del fruto del tomate *Neoleucinodes elegantalis*

Código de introducción	Especie
PI 134418	<i>S. habrochaites</i> var <i>glabratum</i>
PI 134417	<i>S. habrochaites</i> var <i>glabratum</i>
PI 126449	<i>S. habrochaites</i> var <i>glabratum</i>
PI 127826	<i>S. habrochaites</i> var <i>typicum</i>
PI 127827	<i>S. habrochaites</i> var <i>typicum</i>
LA 1223	<i>S. habrochaites</i> var <i>typicum</i>
LA 1362	<i>S. habrochaites</i> var <i>typicum</i>
LA 1264	<i>S. habrochaites</i> var <i>typicum</i>
LA 2092	<i>S. habrochaites</i> var <i>typicum</i>
PI 251305	<i>S. habrochaites</i> var <i>typicum</i>
LA 0444	<i>S. peruvianum</i>
LA 0444-1	<i>S. peruvianum</i>
UNAPAL Maravilla	<i>S. Lycopersicum</i> (testigo sensible)

Fuente: Vallejo, et al., 2008

Tabla 2. Clasificación de las plantas de tomate según el porcentaje de frutos afectados por el perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis*

Frutos afectados (%)	Clasificación
0 - 5	Muy resistente
6 - 5	Resistente
6 -20	Ligeramente sensible
21 - 50	Sensible
51 -100	Muy sensible

Fuente: Vallejo, *et al.*, 2008**Introgresión de la resistencia presente en la introducción PI 134418 de la especie silvestre *Solanum habrochaites* var. *glabratum* en la variedad UNAPAL Maravilla**

Se utilizó la introducción PI 134418 de la especie silvestre *S. habrochaites* var. *glabratum*, muy resistente al perforador, como progenitor donante y la variedad UNAPAL Maravilla de *S. lycopersicum*, muy sensible al insecto, como progenitor recurrente. Se obtuvieron las generaciones F1, F2, RC1, RC2, RC3 y RC4. A partir de la RC1 se seleccionaron las plantas según su resistencia y peso promedio de fruto, con el fin de avanzar a las siguientes generaciones de retrocruzamientos.

Se evaluaron conjuntamente los progenitores P1 (introducción PI 134418 de *S. habrochaites* var. *glabratum*) y P2 (variedad UNAPAL Maravilla de *S. lycopersicum*) y las generaciones F1, F2, RC1, RC2, RC3 y RC4. Se utilizó el diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se cuantificó el porcentaje de frutos afectados, el peso promedio, el color y el formato del fruto. Con base en el porcentaje de frutos afectados se otorgó una calificación a cada generación.

Resultados y discusión**Evaluación de la resistencia al perforador del fruto de especies silvestres del género *Solanum* spp.**

De las 12 introducciones de especies silvestres evaluadas, solamente tres de *S. habrochaites* var. *glabratum* (PI 134417, PI 134418 y PI 126449), dos de *S. habrochaites* var. *typicum* (LA 1264 y LA 2092) y una de *S. peruvianum* (LA 444-1) lograron crecer, desarrollarse y fructificar normalmente. Las otras seis presentaron anomalías en el crecimiento y el desarrollo y, por lo tanto, no alcanzaron la fructificación, probablemente debido a las diferentes condiciones ambientales del sitio de evaluación en comparación con la región de origen de estas especies y su alto grado de autoincompatibilidad (Rick, 1971).

De las introducciones silvestres que alcanzaron a fructificar, ninguna presentó frutos afectados o dañados por el perforador, en tanto que el 60,3 % de los frutos del testigo sensible UNAPAL Maravilla se vio afectado por el perforador. Ninguna de las introducciones silvestres presentó frutos con orificios de salida de larvas ni larvas dentro del fruto, en tanto que el testigo sensible presentó tres orificios de salida y dos larvas dentro del fruto, lo que indicaba que cada fruto fue atacado, en promedio, por cinco larvas del perforador (Tabla 3).

Con base en esta información, las introducciones PI 134417, PI 134418 y PI 126449 de la especie silvestre *S. habrochaites* var. *glabratum*, LA 1264 y LA 2092 de *S. habrochaites* var. *typicum* y LA 444-1 de *S. peruvianum*, se clasificaron como muy resistentes al perforador del fruto, en tanto que la variedad UNAPAL Maravilla se clasificó como muy sensible al insecto (Tabla 3).

En 1993, Salinas, *et al.* reportaron una introducción de la especie *S. habrochaites* var. *glabratum* como altamente resistente al perforador del fruto, por cuanto no presentaba ningún fruto afectado. Parra, *et al.* (1997) evaluaron por su parte especies silvestres de

Tabla 3. Resistencia al perforador del fruto *Neoleucinodes elegantalis* en introducciones de especies silvestres del género *Solanum* spp.

Introducción	Frutos afectados (%)	Orificios de salida	Frutos con orificios de salida (%)	Larvas por fruto	Clasificación
PI 134417	0,0	0,0	0,0	0,0	Muy resistente
PI 134418	0,0	0,0	0,0	0,0	
PI 126449	0,0	0,0	0,0	0,0	
LA 1264	0,0	0,0	0,0	0,0	
LA 2092	0,0	0,0	0,0	0,0	
LA 444-1	0,0	0,0	0,0	0,0	
Testigo	60,30	3,00	57,20	2,00	Muy sensible

Fuente: Vallejo, *et al.*, 2008

Solanum spp. como posibles fuentes de resistencia al insecto *Scrobipalpula absoluta* y concluyeron que las introducciones silvestres de *S. habrochaites* var. *typicum* fueron resistentes, lo que sugiere que dicha resistencia estaba relacionada con el tamaño pequeño del fruto y su alta pubescencia, que dificultaba la oviposición del insecto adulto y la locomoción de la larva en el fruto.

Salazar (2013) evaluó cinco introducciones de tomate tipo Cherry, con el fin de determinar su grado de resistencia al perforador del fruto usando como testigo resistente la especie silvestre *S. habrochaites* var. *glabratum* y como testigo sensible el híbrido comercial FT 006. Los resultados indicaron que la especie silvestre no presentó frutos afectados por el insecto plaga, confirmando, una vez más, la resistencia, en tanto que las introducciones de tomate Cherry presentaron menor incidencia en comparación con el testigo sensible, el híbrido FT 006.

Mecanismos de resistencia al perforador del fruto en especies silvestres del género Solanum spp.

En cuanto al número de frutos con oviposición por planta, se observaron diferencias significativas entre las tres introducciones silvestres y el testigo sensible UNAPAL Maravilla. Las introducciones PI 134417, PI 134418 y LA 1264 presentaron la menor oviposición de frutos por planta (7,3, 6,8 y 0,5, respectivamente) en comparación con el testigo, con 70,0 frutos con oviposición por planta (Tabla 4).

Estos resultados confirman la gran resistencia de las introducciones silvestres y la marcada sensibilidad del testigo UNAPAL Maravilla. La oviposición tan reducida en las introducciones silvestres, comparada con la encontrada en el testigo sensible, sugiere un efecto antixenótico en el perforador del fruto.

En cuanto al número de huevos por fruto, se presentaron diferencias significativas entre las introducciones. La introducción LA 1264 presentó un valor significativamente menor comparado con las introducciones PI 134417 y PI 134418 y con el testigo UNAPAL Maravilla, y no se presentaron diferencias significativas entre las introducciones PI 134417, PI 134418 y el testigo UNAPAL Maravilla (Tabla 4). Es importante mencionar que el número de huevos por fruto está condicionado por la actividad reproductiva natural del insecto, sobre la cual no es posible tener control.

En el número de huevos por planta se presentaron diferencias significativas entre el testigo sensible UNAPAL Maravilla y las tres introducciones silvestres del género *Solanum* spp. En el testigo sensible se reportó un promedio significativamente mayor que el promedio de las introducciones PI 134417, PI 134418 y LA 1264. Asimismo, la introducción LA 1264 presentó un valor significativamente menor que el de las introducciones PI 134417 y PI 134418.

Tabla 4. Frutos por planta con oviposiciones, número de huevos por fruto y número de huevos por planta de *Neoleucinodes elegantalis* en diferentes introducciones de especies de *Solanum* spp. en condiciones de casa de malla

Introducciones	Variable	Promedio	CV (%)	Pr>F
UNAPAL Maravilla	Frutos con oviposición por planta	70,0 a		
PI 134417		7,3 b	13,86	<,0001
PI 134418		6,8 b		
LA 1264		0,5 c		
UNAPAL Maravilla	Número de huevos por fruto	3,1 a		
PI 134417		2,9 a	21,33	<,0065
PI 134418		3,2 a		
LA 1264		2,4 b		
UNAPAL Maravilla	Número de huevos por planta	153,0 a		
PI 134417		82,0 b	38,68	<,0002
PI 134418		70,0 b		
LA 1264		12,0 c		

CV= Coeficiente de variación; Pr= Probabilidad; F = Prueba F de Fisher; Los promedios con la misma letra no fueron significativamente diferentes según la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) ($p < 0,01$). Fuente: Casas, *et al.*, 2012.

Hay evidencia de la presencia de diferentes mecanismos de resistencia que le permiten a las especies silvestres del género *Solanum* spp. defenderse de diversos insectos plagas, entre ellos, las barreras físicas (tricomas) y las químicas (sustancias tóxicas en los tricomas y liberación de volátiles repelentes) (Vallejo, 1999). Luckwill (1943) identificó en el género *Solanum* spp. siete tipos de tricomas, los no glandulares (tipos II, III y V) y los glandulares (tipos I, IV, VI y VII). Kennedy (2003) y Simmonds & Gurr (2005) mencionaron que los tricomas glandulares y no glandulares en las plantas del género *Solanum* spp. son componentes fundamentales de su defensa frente a insectos plagas.

Por su parte, De Sousa, *et al.* (2002) estudiaron los metabolitos secundarios en las especies silvestres de *Solanum* como responsables de los mecanismos de resistencia al perforador del fruto del tomate. Encontraron que los tricomas de tipo VI presentes en la especie *S. habrochaites* var. *glabratum* están asociados con el metabolito 2 tridecanona, el cual es extremadamente tóxico para los huevos y las larvas neonatas.

En las introducciones de especies silvestres del género *Solanum* spp. los huevos se encontraron adheridos a los tricomas de tipo I, lo que sugiere un efecto antixenótico sobre el insecto adulto de *N. elegantalis*, dado que se presentó una alteración en su comportamiento reproductivo comparado con la variedad UNAPAL Maravilla, en la cual la ovoposición se presentó sobre el fruto. Las larvas que eclosionaron de los huevos depositados en los tricomas de tipo I morían rápidamente y muy cerca de los coriones al descender y llegar a la superficie del fruto donde se encuentran los tricomas de tipo IV y VI. Asimismo, se detectó que algunas larvas que intentaban escapar de la superficie del fruto ascendían nuevamente por los tricomas de tipo I, donde morían después de un corto tiempo. Estas reacciones de las larvas neonatas sugieren un posible efecto antibiótico.

Por otra parte, se observaron algunas pocas posturas sobre la superficie de los frutos de las introducciones de especies silvestres PI 134417, PI 134418 y LA 1264, cuyas larvas eclosionadas morían a pocos milímetros de los coriones, lo que indica una alteración en la biología del insecto relacionada con un posible efecto antibiótico sobre su primer estadio de desarrollo.

Los tricomas glandulares de tipo I, IV y VI presentes en las tres especies silvestres introducidas atraparon a las larvas neonatas del perforador, limitando sus movimientos y ocasionándoles la muerte por la acción de los metabolitos secundarios presentes en ellos.

En este sentido, **Simmonds, et al.** (2004) mencionaron que al liberarse los contenidos de los tricomas glandulares 2 tridecanona y 2 undecanona y entrar en contacto con la plaga pueden causarle irritación, atraparla e, inclusive, matarla.

Las reacciones negativas observadas en el comportamiento reproductivo y la biología del insecto evidenciaron un posible efecto antibiótico y antixenótico (conferido principalmente por la presencia de tricomas glandulares de tipo IV y VI en los frutos de las introducciones silvestres PI 134417, PI 134418 y LA 1264) sobre el perforador del fruto *N. elegantalis*.

Introgresión de la resistencia presente en la introducción PI 134418 de la especie silvestre *Solanum habrochaites* var. *glabratum* en la variedad UNAPAL Maravilla de la especie *Solanum lycopersicum* Mill.

Se produjo semilla híbrida solamente cuando se cruzó UNAPAL Maravilla como progenitor femenino con tres introducciones silvestres de *S. habrochaites* var. *glabratum* (PI 134417, PI 134418 y PI 126449) y con tres de *S. habrochaites* var. *typicum* (PI 127826, PI 126445 y LA 1264) usadas como progenitores masculinos (**Tabla 5**), lo que indicaba la presencia de compatibilidad unidireccional. Los cruzamientos con las introducciones silvestres de *S. peruvianum* no produjeron semilla híbrida debido a la marcada barrera de incompatibilidad, ya que esta especie pertenece al acervo genético terciario (**Rick, 1980**).

La eficiencia de los cruzamientos fue muy baja, fluctuó entre 5,8 y 11,9 %, posiblemente porque las dos variedades de *S. habrochaites* pertenecen al acervo genético secundario, y se presenta cierto grado de incompatibilidad (**Moyle & Graham, 2005**).

En todas las hibridaciones interespecíficas se produjo una mayor cantidad de semillas normales (entre 82 y 320) que anormales (entre 24 y 219), pero la germinación fue relativamente baja, fluctuando entre 6,9 y 57,5 %; sin embargo, esto permitió realizar sucesivos retrocruzamientos para obtener líneas de tomate con resistencia al perforador del fruto.

La eficiencia del retrocruzamiento uno (RC1) fue muy baja, fluctuando entre 6,5 y 9,1 %, por lo cual se necesitaron muchos retrocruzamientos para producir semilla híbrida en cantidades adecuadas. El problema se agravó cuando se avanzó al retrocruzamiento dos (RC2), en el cual se obtuvo semilla únicamente en el retrocruzamiento con la introducción silvestre PI 134418 (61 semillas), con una eficiencia del 1,5 % (**Tabla 6**), lo que se debió, posiblemente, a la presencia de incompatibilidad en la introducción silvestre y a la distancia genética con el tomate cultivado *S. lycopersicum*. Al estudiar la base genética de la incompatibilidad de híbridos entre *S. lycopersicum* y *S. habrochaites*, **Moyle & Graham (2005)** encontraron una reducción importante en la fertilidad del polen de las plantas híbridas en comparación con la de los progenitores, lo que probablemente sea la causa de la poca eficiencia del cruzamiento y la baja producción de semillas híbridas.

Tabla 5. Eficiencia de cruzamiento, germinación de la semilla y número de semillas normales y anormales en los cruzamientos interespecíficos entre la variedad UNAPAL Maravilla, *Solanum lycopersicum* y las introducciones silvestres del género *Solanum* spp.

Cruzamiento	Número de cruzamientos	Eficiencia de cruzamiento (%)	Número de semillas normales/anormales	Germinación de semilla (%)
UNAPAL x PI 134417	274	11,7	320-219	21,5
UNAPAL x PI 134418	396	6,3	279-119	32,7
UNAPAL x PI 127826	217	7,4	320- 55	6,9
UNAPAL x PI 126445	150	6,0	111- 33	11,5
UNAPAL x PI 126449	218	11,9	432-187	57,5
UNAPAL x LA 1264	156	5,8	82- 24	39,3

Fuente: **Restrepo, et al., 2007**

Al evaluar los progenitores y las generaciones F1, RC1, RC2, RC3 y RC4, se observó que el daño promedio del perforador fue mayor en el padre recurrente UNAPAL Maravilla (57,52 %) que en el padre donante PI 134418 de la especie *S. habrochaites* var. *glabratum* (1,27 %), con la generación híbrida F1 (7,14 %) y con todas las generaciones de retrocruzamiento, el cual fluctuó entre 8,20 y 14,22 %, por lo que se puede sugerir que el método de retrocruzamiento con selección fue efectivo para mantener cierta cantidad de la resistencia otorgada por el progenitor PI 134418 de *S. habrochaites* var. *glabratum* (Tabla 7).

Asimismo, a medida que se avanzó en las generaciones de retrocruzamientos con selección se fue recuperando el peso promedio del fruto, el color rojo intenso y el formato tipo chonto del progenitor recurrente UNAPAL Maravilla. En la generación RC1 el peso promedio del fruto fue de 16,98 gramos, el color varió entre amarillo y rojo y el formato fue ovoide, y en la generación RC4, el peso promedio del fruto fue de 74,67 gramos, el color fue rojo y el formato fue tipo chonto, lo que nuevamente demuestra que el método de mejoramiento por retrocruzamiento con selección fue efectivo para recuperar el peso promedio del fruto, su color y el formato del progenitor recurrente (Tabla 7).

Al analizar individualmente las plantas del retrocruzamiento RC4, se logró identificar una recombinante con un 4,65 % de frutos afectados por el insecto plaga, peso promedio de 130,67 gramos, color rojo intenso y formato de fruto tipo chonto, lo cual indicó que se logró la introgresión de la resistencia de la especie silvestre *S. habrochaites* var. *glabratum* a la variedad comercial UNAPAL Maravilla, y se pudieron recuperar las buenas características agronómicas de esta variedad.

Tabla 6. Eficiencia de los retrocruzamientos uno y dos (RC1 y RC2) y número de semillas normales obtenidas

Padre donante	RC1		RC2	
	Eficiencia (%)	Semillas normales	Eficiencia (%)	Semillas normales
PI 134417	8,0	363	0,0	0,0
PI 134418	9,1	302	1,5	61,0
PI 126449	6,5	429	0,0	0,0
LA 1264	8,1	102	0,0	0,0

Fuente: Restrepo, *et al.*, 2007

Tabla 7. Frutos afectados por el perforador del fruto (%), peso promedio del fruto (g), formato y color del fruto maduro en generaciones P1 (*S. habrochaites* var. *glabratum*, introducción PI 134418), P2 (UNAPAL Maravilla), y F1, RC1, RC2, RC3 y RC4

Generación	Plantas seleccionadas	Promedio de frutos afectados (%)	Peso promedio de fruto (g)	Densidad tricomas	Color de fruto	Formato de fruto
P1	-	1,27 a	2,37 a	5,0 a	Verde	Redondo
P2	-	52,52 b	136,04 b	2,0 b	Rojo	Chonto
F1	-	7,14 c	17,88 c	4,0 a	Amarillo/rojo	Ovoide
RC1	3	13,23 d	16,98 c	2,6 b	Amarillo/rojo	Ovoide
RC2	2	14,22 d	30,85 d	2,6 b	Rojo	Ovoide
RC3	9	8,20 e	79,71 e	2,6 b	Rojo	Chonto
RC4	3	9,76 e	74,67 e	2,6 b	Rojo	Chonto

Los promedios seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes según la prueba de diferencia mínima significativa (DMS) ($p < 0,01$). Fuente: Pérez, 2010

Vallejo, et al. (2008) reportaron una asociación positiva y muy significativa entre el peso promedio del fruto y el número de frutos afectados por el perforador (0,85), lo que indica que a medida que se recuperaba el peso promedio del fruto se aumentaba el número de frutos afectados; sin embargo, **Pérez** (2010) demostró que la asociación positiva entre una mayor sensible a la plaga y un mayor peso del fruto se pudo romper con el método de retrocruzamiento acompañado de la selección, que se obtuvo en la RC4 y en líneas recombinantes resistentes con peso promedio, color y formato del fruto similares al del padre recurrente UNAPAL Maravilla. En el grupo de investigación se continúa avanzando en generaciones de retrocruzamiento con selección para recuperar aún más el peso promedio del fruto y mantener la resistencia al perforador del fruto y otras características agronómicas del padre recurrente deseables.

En cuanto a la densidad de tricomas en el fruto, se observó una diferencia altamente significativa entre los dos progenitores y que la introducción silvestre PI 134418 presentó una densidad de 5,0 tricomas por milímetro cuadrado, en tanto que la de la variedad UNAPAL Maravilla fue de 2,0 tricomas por milímetro cuadrado. Las cuatro generaciones de retrocruzamiento (RC1, RC2, RC3 y RC4) no presentaron diferencias significativas entre sí ni con el progenitor recurrente UNAPAL Maravilla (**Tabla 5**), lo que indica que a medida que se recuperaba el peso promedio del fruto, la densidad de los tricomas permanecía baja (2,6 tricomas por milímetro cuadrado) y estadísticamente igual a la del progenitor recurrente UNAPAL Maravilla (2,0 tricomas por milímetro cuadrado); ello sugiere que los tricomas no necesariamente son los responsables de la resistencia al perforador del fruto.

Vallejo, et al. (2008) reportaron resultados diferentes y mencionan que el peso promedio del fruto presentó una asociación negativa y significativa (-0,59) con la densidad de tricomas, lo que sugería que a medida que aumentaba el peso promedio del fruto, se disminuía la densidad de tricomas, es decir, que los tricomas probablemente no son los únicos responsables de la resistencia al perforador del fruto.

Conclusiones

La resistencia genética al perforador del fruto del tomate presente en las especies silvestres de *Solanum* spp. puede ser transferida por hibridación sexual a la variedad UNAPAL Maravilla de la especie *S. lycopersicum* con mayor o menor éxito. Los tricomas glandulares presentes en las introducciones silvestres del género *Solanum*, y las sustancias químicas asociadas con ellas, ejercieron un efecto antixenótico y antibiótico en el perforador del fruto. El retrocruzamiento y la selección fueron efectivos para producir líneas recombinantes en la generación RC4, con resistencia al perforador y con peso promedio, color y formato del fruto similares a los del padre recurrente.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

Referencia

- Almiron, L., Aguirre, M.R.A., Veloso, L., Cáceres, S.** (2018). Gusano rosado del tomate *Neoleucinodes elegantalis* (Guenè 1854 (Lepidoptera: Crambidae). Estación Experimental Agropecuaria Bella Vista, Argentina. Hoja de Divulgación 47.
- Aragao, C.A., Maluf, W.R., Danta, B.F., Gavilanes, M., Cardoso, M.D.** (2000). Tricomas foliares asociados a resistencia al acaro rajado (*Tetranychus urticae* Koch) em linhagens de tomateiro com alto teor de 2-Tridecanona nos folíolos. *Cienc. Agrotec.* **24**: 81-93.
- Barbosa, L.V. & Maluf, W.R.** (1996). Heritability of 2-tridecanone-mediated arthropod resistance in an interspecific segregating generation of tomato. *Rev. Bras. Genet.* **19** (3): 465-468.
- Burbano, E. & Vallejo, F.A.** (2017). Producción de líneas de tomate "chonto" *Solanum lycopersicum* Mill., con expresión del gen *sp* responsable del crecimiento determinado. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* **11** (1): 63-71.
- Casas, N., Vallejo, F.A., Estrada, E.I.** (2012). Mecanismos de resistencia a *Neoleucinodes elegantalis* en germoplasma silvestre del género *Solanum* spp. *Horticultura Brasileira.* **30** (1): S4833-S4850.

- De Sousa, C., Viana Bailez, A., Blackmer, J.** (2002). Toxicity of tomato allelochemicals to eggs and neonate larvae of *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) Service (Lep: Crambidae). p. 295. In: Abstracts, Entomology International Congress Proceedings. Agricultural Research Service, Washington DC.
- Díaz-Montilla, A.E., Solís, M.A., Kondo, T.** (2013). The tomato fruit borer, *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae), as insect pest of neotropical Solanaceous fruits. In: Potential invasive pest of agricultural crops. (ed. J. Peña). CAB International. 137-159 p.
- Eiras, A. & Blackmer, J.** (2003). Time of eclosion and larval behavior of the tomato fruit borer, *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae) on tomato, *Lycopersicon esculentum*. Sci. Agric. **60** (1): 195-197.
- FAOSTAT.** (2018). Base de datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Fecha de consulta: 14 de abril, 2020. Disponible en: www.fao.org/faostat/en/data
- Kennedy, G. G.** (2003). Tomato, pest, parasitoids and predators: tritrophic interactions involving the genus *Lycopersicon*. Annu. Rev. Entomol. **48**: 51-72.
- Luckwill, L. C.** (1943). The genus *Lycopersicon*: an historical, biological and taxonomic survey of the wild and cultivated tomatoes. Aberdeen University studies. **120**: 1-44.
- Moyle, L.C. & Graham, E.B.** (2005). Genetics of hybrid incompatibility between *Lycopersicon esculentum* and *L. hirsutum*. Genetics. **169** (1): 355-373.
- Ortiz, A.** (2012). Heredabilidad del contenido de 2 tridecanona en cruzamientos de *Solanum lycopersicum* con *Solanum habrochaites* como factores de resistencia a *Tuta absoluta* Meyrick. Tesis de doctorado. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira.
- Pardey, C.** (2008). Caracterización y evaluación de accesiones de *Capsicum* del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira y determinación del modo de herencia a potyvirus (Pepdmv). Tesis de Doctorado en Ciencias Agrarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. Colombia.
- Parra, A., Vallejo, F.A., Barona, A.** (1997). Evaluación de especies silvestres del género *Lycopersicon* como fuente de resistencia al insecto plaga *Scrobipalpus absoluta* (Meyrick). Acta Agronómica. **47** (4): 45-47.
- Pérez, M.** (2010). Mejoramiento genético en *Solanum lycopersicum* para resistencia al pasador del fruto, *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) (Lepidoptera: Crambidae). Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 101 p.
- Restrepo, E.F., Vallejo, F.A., Lobo, A.** (2008b). Evaluación de poblaciones segregantes producidas a partir de cruzamientos entre tomate cultivado y la accesión silvestre PI 134418 de *Solanum habrochaites* var *glabratum* resistente al pasador del fruto. Acta Agronómica. **57** (1): 1-8.
- Rick, C.M.** (1973). Potential genetic resource in tomato species: clues from observations in native habits. In: Genes, Enzymes and populations. Ed. Svb Plenum, New York. 255-269 p.
- Rick, C.M.** (1980). Tomato. In: Fehr, W.R. and H.H. Hadley (eds). Hybridization of crop plants. Madison. pp 669-680.
- Salazar, J. A.** (2013). Evaluación de la incidencia del pasador del fruto, *Neoleucinodes elegantalis*, en tomate tipo Cherry. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira.
- Salinas, A.H., Estrada, E.I., Vallejo, F.A.** (1993). Evaluación de la resistencia al pasador del fruto del tomate *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) en materiales de *Lycopersicon hirsutum* y *Lycopersicon pimpinellifolium* y su transferencia a materiales cultivados de tomate *Lycopersicon esculentum*, Mill. Acta Agronómica. **43** (1-4): 44-56.
- Simmonds, A.T., Gurr, G., McGrath, D., Martin, P., L.H. Nicol, L.H.** (2004). Entrapment of *Helicoverpa armigera* on glandular trichomes of *Lycopersicon* species. Australian Journal Entomology. **43**: 196-200.
- Simmonds, A.T. & Gurr, D.** (2005). Trichomes of *Lycopersicon* species and their hybrids: effects on pest and natural enemies, The Royal Entomological Society, Agricultural and Forest Entomology. **8**: 1-11.
- Vallejo, F.A., Restrepo, E.F., Lobo, M.** (2008). Resistencia al perforador del fruto del tomate derivado de especies silvestres de *Solanum spp.* Revista Facultad Nacional de Agronomía. **61** (1): 4316-4324.
- Vallejo, F.A.** (1999). Mejoramiento genético y producción de tomate en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 216 p.
- Vallejo, F.A. & Estrada, E.I.** (2004). Producción de hortalizas de clima cálido. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 27-100 p. ISBN: 958-8095-28.
- Vallejo, F.A. & Estrada, E.I.** (2013). Mejoramiento genético de plantas. 2 ed. Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. 456 p. ISBN: 958-8095-11-5.

Artículo original

Actualización nomenclatural y taxonómica del *Catálogo de Líquenes de Colombia*

Nomenclatural and taxonomic update to the *Catálogo de Líquenes de Colombia*

Robert Lücking^{1,5,*}, Bibiana Moncada^{2,5}, Edier Soto-Medina^{3,5}, Diego Simijaca^{2,4,5}, Harrie J. M. Sipman¹

¹ Botanischer Garten und Botanisches Museum, Freie Universität Berlin, ,

² Licenciatura en Biología, Universidad Distrital Francisco José de Caldas,

³ Grupo de Ecología y Diversidad Vegetal, Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad del Valle, Cali, Colombia,

⁴ Centro de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes, México.

⁵ Grupo Colombiano de Lichenología (GCOL).

Resumen

Presentamos una actualización nomenclatural y taxonómica del *Catálogo de Líquenes de Colombia*. Como resultado, el número de nombres reportados se reduce de 1821 a 1793, el total de taxones aceptados de 1732 a 1675, y el número de especies de 1672 a 1634. El número de reportes dudosos o excluidos, que incluye nombres con estado nomenclatural o taxonómico no resuelto, se aumenta de 80 a 109. El número de géneros reportados para Colombia aumenta de 272 a 306; se excluyen 29 géneros anteriormente reportados y se incluyen 63 géneros hasta la fecha no reportados. La actualización reduce el total de familias de 73 a 69; resulta en la eliminación de 13 familias y la inclusión de 9 familias anteriormente no reportadas. Basado en la revisión de material antes reportado bajo nombres incorrectos, se reportan tres nuevos registros para Colombia: *Caloplaca granularis* (Müll.Arg.) Zahlbr., *Haematomma persoonii* (Fée) A. Massal. y *Ochrolechia subpallescens* Verseghy. Además, confirmamos la presencia de las especies: *Physcia crispula* Müll.Arg., *Pseudocyphellaria citrina* (Gyeln.) Lücking, Moncada & S. Stenroos, *Pseudocyphellaria sandwicensis* (Zahlbr.) Moncada & Lücking, *Pseudocyphellaria xanthosticta* (Pers.) Moncada & Lücking, *Sticta sylvatica* (Huds.) Ach., *Usnea crenulata* Truong & P. Clerc y *Usnea mexicana* Vain. También se introducen 16 novedades nomenclaturales: *Ancistrosporella gracilior* (Nyl.) Lücking comb. nov. (basionimo: *Opegrapha gracilior* Nyl.); *Bacidia neofusconigrescens* Lücking nom. nov. (sinónimo reemplazado: *Lecidea millegrana* var. *fusconigrescens* Nyl.) [non *Bacidia fusconigrescens* (Kremp.) Zahlbr.]; *Diploschistes bartlettii* (Lumbsch) Lücking comb. et stat. nov. (basionimo: *Diploschistes muscorum* subsp. *bartlettii* Lumbsch); *Gymnographopsis koreaiensis* (Sipman) Lücking & Sipman comb. nov. (basionimo: *Graphis koreaiensis* Sipman); *Imshaugia angustior* (Nyl.) Sipman (basionimo: *Parmelia angustior* Nyl.); *Kalbographa cabbalistica* (Nyl.) Lücking comb. nov. (basionimo: *Graphis cabbalistica* Nyl.; sinónimo nuevo: *Graphina caracasana* Müll.Arg.); *Leptogium pseudolivaceum* Lücking nom. nov. (sinónimo reemplazado: *Collema olivaceum* Hook.) [nom. illeg., non *Leptogium olivaceum* F. Wilson]; *Malmidea demutans* (Nyl.) Lücking comb. nov. (basionimo: *Lecidea demutans* Nyl.); *Ocellularia leucocarpoides* (Nyl.) Lücking comb. nov. (basionimo: *Thelotrema leucocarpoides* Nyl.; sinónimo nuevo: *Ocellularia fuscospora* Lücking & Pérez-Ort.); *Phaeographis decolorascens* (Nyl.) Lücking comb. nov. (basionimo: *Graphis decolorascens* Nyl.); *Phlyctis endecamera* (Nyl.) Lücking & Sipman comb. nov. (basionimo: *Platygrapha endecamera* Nyl.); *Sprucidea fuscula* (Nyl.) Lücking comb. nov. (basionimo: *Lecidea fuscula* Nyl.); *Sticta rudiusscula* (Vain.) Moncada & Lücking comb. et stat. nov. (basionimo: *Sticta damicornis* f. *rudiusscula* Vain.); *Sticta subdenudata* Moncada & Lücking nom. nov. (sinónimo reemplazado: *Sticta laciniata* var. *denudata* Nyl.) [non *Sticta denudata* Taylor]; *Thallooloma scribillans* (Nyl.) Lücking comb. nov. (basionimo: *Graphis scribillans* Nyl.; sinónimo nuevo: *Graphis anguiniformis* Vain.); y *Yoshimuriella denudata* (Taylor) Moncada & Lücking comb. nov. (basionimo: *Sticta denudata* Taylor).

Citación: Lücking R, Moncada B, Soto-Medina E. Actualización nomenclatural y taxonómica del *Catálogo de Líquenes de Colombia*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):147-189, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1266>

Editor: Carolina Romero-Hernández

***Correspondencia:**

Robert Lücking; r.luecking@bgbm.org

Recibido: 11 de julio de 2020

Aceptado: 13 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Palabras clave: *Caloplaca lucifuga*, *Cladonia*, *Haematomma puniceum*, *Hafellia disciformis*, *Mycoblastus glabrescens*, *Ochrolechia pallescens*, *Pseudocyphellaria crocata*, *Usnea longissima*.

Abstract

We present a nomenclatural and taxonomic update of the *Catálogo de Líquenes de Colombia*. As a result, the number of reported names is reduced from 1821 to 1793, the total of accepted taxa from 1732 to 1675, and the number of species from 1672 to 1634. The number of doubtful or excluded reports, which includes names with unresolved nomenclatural or taxonomic status, increases from 80 to 109. The number of genera reported for Colombia increases from 272 to 306; 29 previously reported genera are excluded, and 63 genera not reported previously are included. The update reduces the total of families from 73 to 69; it results in the elimination of 13 families and the addition of 9 previously unreported families. We include three new records for Colombia: *Caloplaca granularis* (Müll.Arg.) Zahlbr., *Haematomma persoonii* (Fée) A. Massal., and *Ochrolechia subpallescens* Verseghy. Furthermore, we confirm the presence of the following species: *Physcia crispula* Müll. Arg., *Pseudocyphellaria citrina* (Gyeln.) Lücking, Moncada & S. Stenroos, *Pseudocyphellaria sandwicensis* (Zahlbr.) Moncada & Lücking, *Pseudocyphellaria xanthosticta* (Pers.) Moncada & Lücking, *Sticta sylvatica* (Huds.) Ach., *Usnea crenulata* Truong & P. Clerc, and *Usnea mexicana* Vain. We also introduce 16 nomenclatural novelties: *Ancistrosporella gracilior* (Nyl.) Lücking comb. nov. (bas.: *Opegrapha gracilior* Nyl.); *Bacidia neofusconigrescens* Lücking nom. nov. (replaced syn.: *Lecidea millegrana* var. *fusconigrescens* Nyl.) [non *Bacidia fusconigrescens* (Kremp.) Zahlbr.]; *Diploschistes bartlettii* (Lumbsch) Lücking comb. et stat. nov. (bas.: *Diploschistes muscorum* subsp. *bartlettii* Lumbsch); *Gymnographopsis koreaiensis* (Sipman) Lücking & Sipman comb. nov. (bas.: *Graphis koreaiensis* Sipman); *Imshaugia angustior* (Nyl.) Sipman (bas.: *Parmelia angustior* Nyl.); *Kalbographa cabbalistica* (Nyl.) Lücking comb. nov. (bas.: *Graphis cabbalistica* Nyl.; new syn.: *Graphina caracasana* Müll.Arg.); *Leptogium pseudolivaceum* Lücking nom. nov. (replaced syn.: *Collema olivaceum* Hook.) [nom. illeg., non *Leptogium olivaceum* F. Wilson]; *Malmidea demutans* (Nyl.) Lücking comb. nov. (bas.: *Lecidea demutans* Nyl.); *Ocellularia leucocarpoides* (Nyl.) Lücking comb. nov. (bas.: *Thelotrema leucocarpoides* Nyl.; new syn.: *Ocellularia fuscospora* Lücking & Pérez-Ort.); *Phaeographis decolorascens* (Nyl.) Lücking comb. nov. (bas.: *Graphis decolorascens* Nyl.); *Phlyctis endecamera* (Nyl.) Lücking & Sipman comb. nov. (bas.: *Platygrapha endecamera* Nyl.); *Sprucidea fuscula* (Nyl.) Lücking comb. nov. (bas.: *Lecidea fuscula* Nyl.); *Sticta rudiusscula* (Vain.) Moncada & Lücking comb. et stat. nov. (bas.: *Sticta damicornis* f. *rudiusscula* Vain.); *Sticta subdenudata* Moncada & Lücking nom. nov. (replaced syn.: *Sticta laciniata* var. *denudata* Nyl.) [non *Sticta denudata* Taylor]; *Thalloleoma scribillans* (Nyl.) Lücking comb. nov. (bas.: *Graphis scribillans* Nyl.; new syn.: *Graphis anguiniformis* Vain.); and *Yoshimuriella denudata* (Taylor) Moncada & Lücking comb. nov. (bas.: *Sticta denudata* Taylor).

Key words: *Caloplaca lucifuga*, *Cladonia*, *Haematomma puniceum*, *Hafellia disciformis*, *Mycoblastus glabrescens*, *Ochrolechia pallescens*, *Pseudocyphellaria crocata*, *Usnea longissima*

Introducción

El *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia* (Bernal, et al., 2016, 2020) es la mayor fuente de referencia para la diversidad vegetal de Colombia, considerado un país megadiverso (Myers, et al., 2000, Arbeláez-Cortés, 2013). La base de datos que forma base del *Catálogo* fue lanzado en 2015 y continua como un repositorio público permanente (Bernal, et al., 2020). La primera versión permanente fue publicada en formato de libro un año después (Bernal, et al., 2016). En esta versión, Sipman & Aguirre-C. (2016) reportaron 1674 especies de hongos liquenizados para Colombia, las cuales pertenecen a 274 géneros y 74 familias (Sipman & Aguirre-C., 2016); sin embargo, nuestro conteo resultó en 1672 especies, 272 géneros y 73 familias aceptadas.

Debido a estudios moleculares, la clasificación de hongos liquenizados ha experimentado cambios sustanciales en las últimas dos décadas (Lücking, et al., 2017a). Incluso después de la primera versión impresa del *Catálogo*, había cambios en el concepto de familias y géneros en muchos grupos de hongos liquenizados. En parte, esos cambios se reflejan en actualizaciones del *Catálogo* en línea (Bernal, et al., 2020). Sin embargo, una base de datos no clasifica como una publicación efectiva según el *Código Internacional*

de *Nomenclatura para Algas, Hongos y Plantas* (Greuter & Rankin-Rodríguez, 2018, Turland, *et al.*, 2018), la cual requiere material impreso o material electrónico permanente en forma de PDF con número ISSN o ISBN (Art. 29–31). Por lo tanto, la única referencia válida para la nomenclatura y taxonomía de las especies listadas en el *Catálogo* es la versión impresa (Bernal, *et al.*, 2016) y para obtener referencias válidas para actualizaciones, es necesario publicarlas efectivamente según el mismo *Código*.

Con el objetivo de presentar una actualización nomenclatural y taxonómica efectiva del *Catálogo* de *Líquenes* (Sipman & Aguirre-C., 2016), revisamos todos los nombres reportados en la versión impresa, los cuales suman 1821 e incluyen 60 nombres infra-específicos y 80 nombres dudosos, además de 1672 especies aceptadas. Cuando aplicaba, para cada nombre actualizamos la posición genérica y la clasificación de géneros a nivel de familia. Además, para taxones que no habían sido estudiados críticamente, revisamos el material tipo para aclarar su posición taxonómica. En esta lista, no incluimos nuevos reportes basados en material no publicado anteriormente; estas adiciones las daremos a conocer en publicaciones separadas.

Materiales y métodos

La versión formalmente publicada (PDF) del listado de líquenes del *Catálogo* (Sipman & Aguirre-C., 2016) fue transformada en una versión *Excel* para facilitar el análisis de los nombres. Para todos los nombres de líquenes reportados en el *Catálogo*, revisamos el estado nomenclatural y taxonómico, así como la asignación para familia, revisamos la literatura especializada para cada grupo e hicimos una búsqueda en bases de datos de literatura como *Recent Literature of Lichens* (RLL; Timdal, 2010) [<http://nhm2.uio.no/botanisk/lav/RLL/RLL.HTM>] y *Google Scholar* [<https://scholar.google.com>]. Para el caso de nombres de aplicación dudosa, revisamos muestras en los herbarios COL y B para verificar identificaciones previas.

Los nombres revisados fueron agrupados en varias categorías, las cuales incluyen los nombres verificados como reportados en el *Catálogo* o los nombres para las cuales aplican cambios en su nomenclatura, taxonomía o clasificación.

Resultados y discusión

Revisamos un total de 1821 nombres reportados en el *Catálogo* (Sipman & Aguirre-C., 2016), los cuales incluyen nueve autótonimos, 1,672 especies aceptadas, 60 taxones infra-específicos aceptados y 80 especies dudosas, originalmente reportadas en el *Catálogo* entre [corchetes].

Después de la revisión nomenclatural y taxonómica, quedaron 1181 nombres confirmados en su nomenclatura y asignación a familia, sin incluir los autótonimos (**Tabla Suplementaria S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1266/2948>). Para 15 nombres, se proponen nuevas combinaciones o nombres nuevos, cinco de ellos también con cambio en la asignación a familia (véase **Parte I**); 19 nombres adicionales son anotados, incluso varios casos de nombres mal aplicados (véase **Parte II**). Un total de 54 entradas vienen con una actualización nomenclatural o taxonómica y cambio en la asignación a familia (véase **Parte III**); 195 con una actualización nomenclatural o taxonómica (véase **Parte IV**); y 233 con un cambio en la asignación a familia (véase **Parte V**). Para 37 nombres, se corrigen errores de ortografía (véanse ejemplos en la **Parte VI**). El estado nomenclatural o taxonómico de un total de 32 nombres quedó sin resolver, ya que falta la revisión de material tipo (véase **Parte VII**). Además de 15 nombres dudosos, en parte anotados separadamente, definitivamente se excluyen 76 nombres de la liquenobiota Colombiana por reportes erróneos o falta de muestras para confirmar las identificaciones (véase **Parte VIII**).

En comparación con el *Catálogo* (Sipman & Aguirre-C., 2016) y después de excluir los autótonimos, con este trabajo se reduce el número de nombres de taxones diferentes reportados de 1812 a 1784. Sin tomar en cuenta reportes dudosos o excluidos, el total de

taxones aceptados en el *Catálogo* (1732) se reduce a 1675, de los cuales en el *Catálogo* 1672 corresponden a especies, que en el presente trabajo son 1634 (**Tabla 1**). El número de reportes dudosos o excluidos, o de nombres con estado nomenclatural o taxonómico no resuelto, se aumenta de 80 en el *Catálogo* a 109 en el presente trabajo.

Con la actualización nomenclatural y taxonómica, el número de familias reportadas en el *Catálogo* (73) baja a 69 (**Tabla 1**). Sin embargo, la actualización resulta en cambios sustanciales de clasificación. Se eliminan 16 familias de la lista (**Tabla Suplementaria S1**): Arthopyreniaceae, Aspidotheliaceae (= Thelenellaceae), Atheliaceae, Biatorrellaceae, Clavariaceae, Crocyniaceae (= Ramalinaceae), Letrouitiaceae (= Brigantiaeaceae), Lobariaceae (= Peltigeraceae), Mycoblastaceae (= Tephromelataceae), Nephromataceae (= Peltigeraceae), Phyllobatheliaceae (= Strigulaceae), Podoscyphaceae, Porpidiaceae (= Lecideaceae), Tricholomataceae y Trichotheliaceae (= Porinaceae). Por otro lado, se agregan las siguientes 12 familias (**Tabla Suplementaria S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1266/2948>): Cystocoleaceae, Fuscideaceae, Hygrophoraceae, Lecanographaceae, Opegraphaceae, Ophioparmaceae, Porinaceae, Ramboldiaceae, Roccellographaceae, Schaereriaceae, Tephromelataceae y Trapeliaceae.

El número de géneros de hongos liquenizados reportados para Colombia en esta actualización aumenta de 272 a 306. Además de este aumento, hay cambios sustanciales en los géneros reportados. Se excluyen 29 géneros (**Tabla Suplementaria S1**): *Bacidiopsis*, *Cetrariastrum*, *Chaenothecopsis*, *Clavulinopsis*, *Crocynia*, *Cryptothelium*, *Everniastrum*, *Graphina*, *Hemithecium*, *Laurera*, *Leprocaulon*, *Leptotrema*, *Leucogramma*, *Lobaria*, *Lopadium*, *Maronina*, *Mycoblastus*, *Mycocalicium*, *Mycomicrothelia*, *Omphalina*,

Tabla 1. Nombres en la liquenobiota Colombiana reportados en el *Catálogo* (Sipman & Aguirre-C., 2016) comparado con el trabajo actual

Categoría	Catálogo 2016	Catálogo actualizado	Cambio de familia	Cambio de género o sinonimia
Especies				
Aceptadas	1672	1634	294	230
Dudosas/excluidas	[80]	[15/76 = 91]	[10]	[—]
Subespecies				
Aceptadas	3	3	0	2
Dudosas/excluidas	[—]	[—]	[—]	[—]
Variedades				
Aceptadas	42	32	10	23
Dudosas/excluidas	[—]	[9/1 = 10]	[—]	[—]
Formas				
Aceptadas	15	6	5	7
Dudosas/excluidas	[—]	[8/0 = 8]	[—]	[—]
Autónimos	[9]	[9]	[—]	[—]
Total nombres	1821	1793	319	262
Total aceptados	1732	1675	309	262
Géneros				
Aceptados	272	306		
Dudosos/excluidos	[9]	[2/12 = 14]		
Familias				
Aceptadas	73	69		
Dudosas/excluidas	[1]	[0/5 = 5]		

Parmelinopsis, *Phaeographina*, *Phlyctidia*, *Platygraphopsis*, *Polychidium*, *Psorotheciopsis*, *Rimelia*, *Triclinum* y *Xanthoria*. Por otro lado, se incluyen 63 géneros anteriormente no reportados (**Tabla Suplementaria S1**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1266/2948>): *Allographa*, *Alyxoria*, *Ancistrosporella*, *Aquacidia*, *Asteristion*, *Astrochapsa*, *Athallia*, *Bellicidia*, *Bogoriella*, *Brownliella*, *Calogaya*, *Coniocarpon*, *Cora*, *Corella*, *Crespoa*, *Crocodia*, *Cryphonia*, *Dimidiographa*, *Emmanuelia*, *Enchylium*, *Flavoplaca*, *Fouragea*, *Fuscidea*, *Glaucotrema*, *Gyalolechia*, *Huneckia*, *Jocotoa*, *Kalbographa*, *Lepidocollema*, *Lepra*, *Leptogidium*, *Leucodermia*, *Linhartia*, *Malmographina*, *Myriolecis*, *Myriostigma*, *Nebularia*, *Neoprotoparmelia*, *Nigrovothelium*, *Niorma*, *Pallidogramme*, *Parainoa*, *Parallopsora*, *Parmelinella*, *Phylloporis*, *Podostictina*, *Polyblastidium*, *Polycauliona*, *Pseudochapsa*, *Puiggariella*, *Raciborskiella*, *Racoplaca*, *Rexiella*, *Rhabdodiscus*, *Rolueckia*, *Rostania*, *Rusavskia*, *Sanguinotrema*, *Sprucea*, *Synarthonia*, *Varicellaria*, *Xanthomendoza* y *Zwackhia*.

La revisión de muestras en COL y B de nombres previamente excluidos (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016) resulta en tres nuevos registros para Colombia: *Caloplaca granularis* (Müll.Arg.) Zahlbr., previamente identificado como *Caloplaca lucifuga* Thor (*Caloplaca* “lucifera” en **Sipman & Aguirre-C.**, 2016), *Haematomma persoonii* (Fée) A. Massal., previamente identificada como *Haematomma puniceum* (Ach.) A. Massal., y *Ochrolechia subpallescens* Verseghy, previamente identificada como *Ochrolechia pallescens* (L.) A. Massal. Además, confirmamos la presencia de dos especies reportadas para Colombia, pero no incluidas en el Catálogo: *Usnea crenulata* Truong & P. Clerc y *Usnea mexicana* Vain., frecuentemente mal identificadas como *Usnea longissima* Ach. (**Truong, et al.**, 2013). Otras tres especies se agregan a la lista por la aplicación errónea del nombre de *Pseudocyphellaria crocata* (L. Vain.): *Pseudocyphellaria citrina* (Gyeln.) Lücking, Moncada & S. Stenroos, *Pseudocyphellaria sandwicensis* (Zahlbr.) Moncada & Lücking y *Pseudocyphellaria xanthosticta* (Pers.) Moncada & Lücking (**Lücking, et al.**, 2017b). Con respecto a dos nombres previamente excluidos de la liquenobiota Colombiana, *Physcia crispula* Müll.Arg. y *Sticta sylvatica* (Huds.) Ach. (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016), se confirma su presencia en el país.

Parte I: Nuevas combinaciones y otras novedades nomenclaturales (16)

Ancistrosporella gracilior (Nyl.) Lücking **comb. nov.** (Roccellaceae)

Index Fungorum 558058

Bas.: *Opegrapha gracilior* Nyl., *Annls Sci. Nat. Bot. Sér. 5*, 7: 337 (1867). Tipo. Colombia, Santander, Pie de Cuesta; 1200 m; 1863, A. Lindig s.n. (H-Nyl 6539, H9505335, holotipo!).

Nylander (1867) originalmente consideró el material tipo como una variedad de *O. leucophila* Nyl. y posiblemente quería establecerlo así, pero en el protólogo da el nombre como *O. gracilior* Nyl., así que técnicamente la describió como especie. **Ertz** (2018) se refirió a este material y lo consideró posiblemente conespecífico con *Ancistrosporella leucophila* (Nyl.) Ertz. Otra especie descrita por **Nylander** (1863a) de Colombia, *O. onchospora* Nyl., también fue incluida en *Ancistrosporella* por **Ertz** (2018), como *A. onchospora* (Nyl.) Ertz. Las tres especies coinciden en las ascosporas en forma de gancho terminal pero se distinguen morfológicamente como sigue: *A. leucophila* con talo grueso blanquecino y lirelas cortas con disco parcialmente expuesto; *A. gracilior* con talo grueso blanquecino y lirelas elongadas con disco cerrado; y *A. onchospora* con talo fino marrón y lirelas elongadas con disco parcialmente expuesto.

Bacidia neofusconigrescens Lücking **nom. nov.** (Ramalinaceae)

Index Fungorum 558059

Sin. remplazado: *Lecidea millegrana* var. *fusconigrescens* Nyl., *Acta Soc. Sci. Fenn.* 7(2): 461 (1863); *Lecanora millegrana* var. *fusconigrescens* Nyl. in *Krempelhuber, Flora* 61: 493 (1878) [error ortográfico: *Lecidea millegrana* var. *fusconigrescens* Nyl.];

Patellaria millegrana var. *fusconigrescens* (Nyl.) Müll.Arg., Flora 64: 523 (1881); *Bacidia millegrana* var. *fusconigrescens* (Nyl.) Zahlbr., Cat. Lich. Univers. 4: 223 (1926) [1927] [non *Bacidia fusconigrescens* (Kremp.) Zahlbr.]. Tipo. Colombia, Cundinamarca, Villeta; 1200 m; A. Lindig 2764 (N-Nyl 17268, H9510535, holotipo!).

Nylander (1863a) estableció este taxon como variedad de *Bacidia* (*Lecidea*) *millegrana* (Taylor) Zahlbr. La revisión del material tipo reveló que se distingue de esta última morfológicamente por los apotecios de color casi negro con margen negro, mientras el material tipo de *B. millegrana* de Argentina tiene apotecios de color marrón negruzco con margen marrón. Por lo tanto, consideramos que el taxon de Colombia debe ser reconocido a nivel de especie.

Desafortunadamente, la combinación del epíteto *fusconigrescens* dentro del género *Bacidia* está bloqueada por *B. fusconigrescens* (Kremp.) Zahlbr., basado en *Lecanora fusconigrescens* Kremp. Originalmente, **Krempelhuber** (1878) introdujo este nombre como combinación basada en “*Lecanora*” *millegrana* var. *fusconigrescens* Nyl., un error por *Lecidea millegrana* var. *fusconigrescens* Nyl. Sin embargo, **Müller** (1880) estableció el nombre *Lecanora fusconigrescens* Kremp. como nombre de una nueva especie, en la nueva combinación *Patellaria fusconigrescens* (Kremp.) Müll.Arg., y así explícitamente excluyó el nombre de Nylander como sinónimo. El material identificado por Krempelhuber bajo este nombre, de Argentina, representa un taxon diferente, separándose por esporas más delgadas y apotecios más pálidos.

Diploschistes bartlettii (Lumbsch) Lücking **comb. et stat. nov.** (Graphidaceae)

Index Fungorum 558060

Bas.: *Diploschistes muscorum* subsp. *bartlettii* Lumbsch, Herzogia 7: 602 (1987). Tipo. Nueva Zelandia, North Island, NW Ruahina limestone plateau; 1200 m; 1983, *Bartlett* 25905 (BM, holotipo, no visto).

Este taxon es generalmente tratado como una subespecie de *Diploschistes muscorum* (Scop.) R. Sant. que se distingue por ascas con 8 esporas, mientras subsp. *muscorum* tiene ascas con 4 esporas (**Rivas Plata, et al.**, 2010). La subsp. *bartlettii* es más frecuente en el Hemisferio Sur, mientras que subsp. *muscorum* es más común en el Hemisferio Norte. Sin embargo, en países como Colombia o India se presentan las dos subespecies (**Pant & Upreti**, 1993; **Sipman & Aguirre-C.**, 2016). Por lo tanto, parece más prudente considerar los dos taxones como especies separadas.

Gymnographopsis koreaiensis (Sipman) Lücking & Sipman **comb. nov.** (Graphidaceae)

Index Fungorum 558061

Bas.: *Graphis koreaiensis* Sipman, Acta Bot. Fenn. 150: 165 (1994). Tipo. Guiana Francesa, Saül, 2–3 km SSW de Saül; ca. 03°35' N, 53°13' W, ca. 300 m; epifítico en sotobosque; 12 de Enero 1988, *Sipman* 31725 (B, holotipo!).

Esta especie combina caracteres atípicos para el género *Graphis* en sentido estricto (**Staiger**, 2002; **Lücking**, 2009; **Lücking & Kalb**, 2018), particularmente el talo ecoriticado, los labios poco desarrollados y las ascosporas no amiloides (**Sipman**, 1994). Sin datos moleculares no es posible comprobar su posición exacta en la clasificación de Graphidaceae, aunque las dos opciones más probables son *Fissurina* y *Gymnographopsis* (**Lücking & Rivas Plata**, 2008). Recientemente, se confirmó que el último género también puede crecer sobre corteza (**Miranda-González, et al.**, 2020); por lo tanto, proponemos la recombinación de *Graphis koreaiensis* dentro de este género.

Kalbographa cabbalistica (Nyl.) Lücking **comb. nov.** (Graphidaceae)

Index Fungorum 558062

Bas.: *Graphis cabbalistica* Nyl., Acta Soc. Sci. Fenn. 7(2): 474 (1863); *Graphina cabbalistica* (Nyl.) Müll.Arg., Flora 63: 281 (1880); *Phaeographina cabbalistica* (Nyl.) Müll.Arg., Mém. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève 29(8): 51 (1887). Tipo. Colombia, Bogotá; July 1860, A. Lindig 797 (H-Nyl 6112, H9507929, lectotipo!, aquí designado, Index Fungorum 558074). Colombia, Bogotá; A. Lindig 797/2736 (H-Nyl 6987, H9507928, paratipo!).

Sin.: *Graphina caracasana* Müll.Arg., Flora 63: 281 (1880); *Kalbographa caracasana* (Müll.Arg.) Lücking, Biblioth. Lichenol. 96: 188 (2007). Tipo. Venezuela, Distrito Federa, Caracas; 1876, *Ernst* 66 (G-G00293874, holotipo!).

Revisión del material tipo de *Graphis cabbalistica* Nyl. reveló que corresponde exactamente a *Graphina caracasana* Müll.Arg. en su morfología y las ascosporas pequeñas, submuriformes de color marrón oscuro, características para el género *Kalbographa* (Lücking, 2007). El nombre de Nylander (1863a) por lo tanto tiene prioridad.

***Imshaugia angustior* (Nyl.) Sipman comb. nov.** (Parmeliaceae)

Index Fungorum 558063

Bas.: *Parmelia angustior* Nyl., Annl. Sci. Nat. Bot. Sér. 4, 11: 215 (1859); *Parmeliopsis angustior* (Nyl.) Nyl., Syn. Meth. Lich. 2: 56 (1869); *Imshaugia angustior* (Nyl.) Sipman in Bernal, et al., Phytoneuron 22: 1 (2015) [nom. inval., ICN Art. F.5]. Tipo. Colombia; *J. Goudot s.n.* (H-Nyl 34312, H9505564, holotipo!).

Esta combinación fue introducida por Sipman en Bernal, et al. (2015). Sin embargo, no fue válida por falta de registro del nombre en *Mycobank* o *Index Fungorum*, así que se valida aquí.

***Leptogium pseudolivaceum* Lücking nom. nov.** (Collembateae)

Index Fungorum 558064

Sin. reemplazado: *Collema olivaceum* Hook. in Kunth, Syn. Pl. (Paris) 1: 38 (1822); *Leptogium olivaceum* (Hook.) Zahlbr., Cat. Lich. Univers. 3: 146 (1925) [nom. illeg., non *Leptogium olivaceum* F. Wilson, Victorian Nat. 6: 62 (1889)]. Tipo. Australia, Victoria, Traawool, Beaconfield; F. R. M. Wilson s.n. (BM-BM001097118, lectotipo!).

El nombre *Leptogium olivaceum* (Hook.) Zahlbr. ha sido usado en varios trabajos sobre líquenes del Neotrópico (Imshaug, et al., 1956, Dix, 1957, Marcano, et al., 1996, Sipman, 1997, Sipman & Wolf, 1998, Benítez, et al., 2012, Coca, et al., 2012, Chuquimarca, et al., 2019), sin notar que esta combinación es ilegítima, ya que tiene prioridad el nombre primeramente establecido por Wilson (1889) para una especie no relacionada de Australia, la cual ahora se considera un sinónimo de *Collema subconveniens* Nyl.. Por lo tanto, se propone un nombre de reemplazo. Zahlbruckner (1932) propuso la sinonimia de *Leptogium foveolatum* Nyl. con *Leptogium olivaceum* (Hook.) Zahlbr., lo que ofrece la posibilidad de usar el primero como nombre prioritario para la especie; sin embargo, Kitaura & Marcelli (2012) demostraron que se trata de dos especies diferentes.

***Malmidea demutans* (Nyl.) Lücking comb. nov.** (Malmideaceae)

Index Fungorum 558065

Bas.: *Lecidea demutans* Nyl., Annl. Sci. Nat. Bot. Sér. 5, 7: 322 (1867) [non *Lecidea demutans* Stirt. ≡ *Buellia demutans* Zahlbr.]. Tipo. Colombia, Guainía, Río Negro, 1200 m; 1863, A. Lindig 44 (H-Nyl 20405, H9509980, holotipo!).

El material tipo tiene una anotación de C. Printzen de 1998, lo que sugiere una afinidad con *Bryobilimbia hypnorum* (Lib.) Fryday, Printzen & S. Ekman. Sin embargo, las características morfológicas y anatómicas indican que se trata de una especie de *Malmidea*. Se asemeja a *M. nigromarginata* (Malme) Lücking & Breuss (Breuss & Lücking, 2015), de la cual se distingue principalmente por ascosporas menores de 7–10 × 3.5–4.5 µm (*M. nigromarginata*: 10–14 × 4–6 µm).

***Ocellularia leucocarpoides* (Nyl.) Lücking comb. nov.** (Graphidaceae)

Index Fungorum 558066

Bas.: *Thelotrema leucocarpoides* Nyl., Acta Soc. Sci. Fenn. 7(2): 454 (1863); *Leptotrema leucocarpoides* (Nyl.) Zahlbr., Cat. Lich. Univers. 2: 636 (1923). Tipo. Colombia, Cundinamarca, Fusagasugá; 1900 m; A. Lindig 2864 (jH-Nyl 22494, H9507985, lectotipo!, designado aquí, Index Fungorum 558075; G-G00292327, M-M0034920, M-M0034921, M-M0034922, ¡isolectotipos!). Colombia, Cune; 1200–2000 m; A. Lindig s.n. (paratipo, no visto).

Sin.: *Ocellularia fuscospora* Lücking & Pérez-Ort., Lichenologist 47: 308 (2015). Tipo. Cuba, Holguín, Yamanigüey, 20°34'24"N, 74° 44'05"W, 22 m, dry forest, on fallen tree trunk, 6 March 2006, Pérez-Ortega 650 (jMA, holotipo!, F, ¡isotipo!).

Thelotrema leucocarpoides fue considerado un sinónimo posible de *Leucodecton compunctum* (Ach.) A. Massal. (Rivas Plata, et al., 2010). Sin embargo, estudio del material tipo reveló que se trata de una especie del grupo de *Ocellularia bahiana* (Ach.) Frisch, idéntica a *O. fuscospora* Lücking & Pérez-Ort., recién descrita de Cuba (Lücking & Pérez-Ortega, 2015).

***Phaeographis decolorascens* (Nyl.) Lücking comb. nov.** (Graphidaceae)

Index Fungorum 558067

Bas.: *Graphis decolorascens* Nyl., Anns Sci. Nat. Bot. Sér. 5, 7: 335 (1867); *Sarcographa decolorascens* (Nyl.) Zahlbr., Cat. Lich. Univers. 2: 460 (1923). Tipo. Colombia, Río Magdalena; 1863; A. Lindig s.n. (N-Nyl 7027, H9507933, holotipo!).

Esta especie corresponde al género *Phaeographis* ya que no presenta partes carbonizadas en el excípulo.

***Phlyctis endecamera* (Nyl.) Lücking & Sipman comb. nov.** (Phlyctidaceae)

Index Fungorum 558068

Bas.: *Platygrapha endecamera* Nyl., Acta Soc. Sci. Fenn. 7(2): 477 (1863); *Phlyctella endecamera* (Nyl.) Nyl., Lich. Nov. Zeland.: 73 (1888). Tipo. Colombia, Cundinamarca, La Peña; May 1860, A. Lindig 705 (H-Nyl 6779, H9507251, holotipo!).

Esta especie fue listada en el Catálogo como *Phlyctis endecamera* (Nyl.) Nyl. (Sipman & Aguirre-C., 2016). Sin embargo, Nylander nunca publicó esta combinación y por lo tanto la proponemos aquí con otra autoría.

***Sprucidea fuscula* (Nyl.) Lücking comb. nov.** (Malmideaceae)

Index Fungorum 558069

Bas.: *Lecidea fuscula* Nyl., Acta Soc. Sci. Fenn. 7(2): 460 (1863); *Buellia fuscula* (Nyl.) Zahlbr., Meddn Göteb. Bot. Trädg. 2: 22 (1925); *Bacidia fuscula* (Nyl.) Zahlbr., Cat. Lich. Univers. 4: 202 (1926). Tipo: Colombia, Villeta; 2000 m; Lindig 767 p.p. (H-NYL 17349, H9508941, lectotipo!, Awasthi & Mathur, 1987). Colombia, Villeta; 2000 m; Lindig 767 p.p. (H-NYL 4790, H9508942, paratipo!).

Esta especie fue listada bajo el nombre *Lecidea* 'fuscuscula' Nyl. tanto en el Catálogo (Sipman & Aguirre-C., 2016) como en un informe sobre el estado de conservación de musgos y líquenes de Colombia (Aguirre-C. & Rangel-C., 2007). El nombre correcto, *L. fuscula* Nyl., fue incluido en el Catálogo como sinónimo. Revisión del material tipo reveló que representa una especie del género *Sprucidea* M. Cáceres, Aptroot & Lücking, recientemente establecido (Cáceres, et al., 2017). *Sprucidea fuscula* se asemeja a *S. penicillata* (Aptroot, M. Cáceres, Lücking & Sparrius) M. Cáceres, Aptroot & Lücking en la longitud de las ascosporas y la ausencia de pigmento rojo en el talo, pero se distingue por los apotecios oscuros con margen fino pero distinto y por las ascosporas un poco más delgadas (30–40 × 1–1.5 µm). Excepto por la ausencia de pigmento rojo y por las ascosporas largas, *S. fuscula* concuerda en la morfología de los apotecios y el talo con *S. rubropenicillata* M. Cáceres, Aptroot & Lücking.

***Sticta rudiusscula* (Vain.) Moncada & Lücking comb. et stat. nov.** (Peltigeraceae subfam. Lobararioideae)

Index Fungorum 558070

Bas.: *Sticta damicornis* f. *rudiusscula* Vain., Hedwigia 38(Beibl.): 124 (1899); *Sticta rudiusscula* (Vain.) Moncada & Lücking in Moncada, El género *Sticta* (Schreb.) Ach. en Colombia: Taxonomía, Ecogeografía e Importancia: 172 (2012). Tipo: Colombia, Bogotá; Weir 89 (TUR).

Este taxón fue listado en el Catálogo como *Sticta damicornis* f. *rudiusscula* Vain., ya que la combinación anterior (Moncada, 2012) no había sido válidamente publicada.

Sticta subdenudata Moncada & Lücking **nom. nov.** (Peltigeraceae subfam. Lobarioideae)
Index Fungorum 558071

Sticta subdenudata Moncada & Lücking in Moncada, El género *Sticta* (Schreb.) Ach. en Colombia: Taxonomía, Ecogeografía e Importancia: 172 (2012) [nom. inval.].

Sin. reemplazado: *Sticta laciniata* var. *denudata* Nyl., Syn. Meth. Lich. 1(2): 354 (1860) [non *Sticta denudata* Taylor \equiv *Yoshimuriella denudata* (Taylor) Moncada & Lücking (vease abajo)]; *Sticta damicornis* f. *denudata* (Nyl.) Malme, Arkiv Bot. 26A(14): 12 (1935). Tipo: Venezuela, Galipan; *Funck & Schlim* 395 (N-Nyl 33681, H9510836, holotipo!).

Moncada (2012) demostró que *Sticta laciniata* var. *denudata* es una especie bien delimitada, pero la combinación del epíteto dentro del género *Sticta* está bloqueada por el nombre *S. denudata* Taylor. El nombre de reemplazo necesario fue propuesto en el trabajo mencionado pero requiere de validación aquí.

Thalloloma scribillans (Nyl.) Lücking **comb. nov.** (Graphidaceae)

Index Fungorum 558072

Bas.: *Graphis scribillans* Nyl., Acta Soc. Sci. Fenn. 7(2): 471 (1863); *Graphina scribillans* (Nyl.) Zahlbr., Cat. Lich. Univers. 2: 424 (1923). Tipo. Colombia, Bogotá; 2400 m; A. Lindig 714 (H-Nyl 7666, H9507893, holotipo!).

Sin.: *Graphis anguiniformis* Vain. [como ‘anguinaeformis’], Acta Soc. Fauna Flora Fenn. 7(2): 110 (1890); *Graphina anguiniformis* (Vain.) Zahlbr. [como ‘anguinaeformis’], Cat. Lich. Univers. 2: 398 (1923); *Thalloloma anguiniforme* (Vain.) Staiger [como ‘anguinaeforme’], Biblioth. Lichenol. 85: 427 (2002). Tipo. Brasil, Minas Gerais, Carassa; 1885, E. A. Vainio s.n. (TUR-Vain 27335, holotipo!, M-M0085732, isotipo!; Vainio, Lich. Bras. Exs. 274).

Revisión del material tipo de *Graphis scribillans* Nyl. demostró su afinidad con el género *Thalloloma*. No pudimos encontrar diferencias con *Graphis anguiniformis* Vain., recombinada en *Thalloloma* por **Staiger** (2002); por lo tanto, consideramos ese último nombre como sinónimo de *T. scribillans*.

Yoshimuriella denudata (Taylor) Moncada & Lücking **comb. nov.** (Peltigeraceae subfam. Lobarioideae)

Index Fungorum 558073

Bas.: *Sticta denudata* Taylor, London J. Bot. 6: 182 (1847); *Lobaria denudata* (Taylor) C.W. Dodge, Kew Bull. 19: 246 (1965) [nom. illeg., non *Lobaria denudata* (Hoffm.) Hoffm.]. Sintipos. Suramérica, Humboldt 257 (BM?, no visto). Peru, Casapí; *Mathews* s.n. (BM?, no visto).

Esta especie pertenece al complejo de *Yoshimuriella subdissecta* (Nyl.) Moncada & Lücking, el cual en este momento se encuentra en evaluación con ayuda de datos moleculares y se considera incluye varias especies semicripticas. Infelizmente, hasta ahora no fue posible localizar el material tipo de este nombre.

Parte II: Nombres mal aplicados (18)

Caloplaca “lucifera” Thor in Sipman & Aguirre-C. in Bernal, *et al.*, Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia: 272 (2016).

Este reporte constituye un error ortográfico por *Caloplaca lucifuga* Thor, descrita desde Europa (**Thor**, 1988). El material en COL (*Sipman* 27453) fue revisado y representa la especie *Caloplaca granularis* (Müll.Arg.) Zahlbr. (Fig. 1A), previamente no registrada para Colombia.

Chaenotheca laevigata Nád., Feddes Repert. Spec. Nov. Regni Veg. 36: 309 (1934).

Este registro fue considerado erróneo por **Sipman & Aguirre-C.** (2016). En efecto, la muestra en COL representa *Chaenotheca olivaceorufa* Vain. (Fig. 1B), una especie ya reportada en el Catálogo.

Cladonia bacillaris (Ach.) Genth, Deutsche Medic. Wochenschrift 8: 406 (1835).

Este nombre fue considerado un reporte erróneo por **Sipman & Aguirre-C.** (2016), posiblemente una confusión con *Cladonia didyma* Vain. Revisión de material en COL (*Jaramillo 3127*) efectivamente confirmó la identidad con esa última especie (Fig. 1C), ya reportada en el *Catálogo*.

Cladonia chondrotypa Vain., Acta Soc. Fauna Fl. Fenn. 4(1): 449 (1887).

Sipman & Aguirre-C. (2016: 171) consideraron este nombre como un "... registro basado en identificación errónea". El material depositado en COL y B es heterógeno y representa varias especies (Fig. 1D-E), las cuales incluyen *C. granulosa* (Aguirre 5858, 6034) y *C. subdelicatula* (Sipman 27622). La segunda especie no está incluida en el *Catálogo*, aunque había sido reportada antes para Colombia (Herrera-V. et al. 2014).

Cladonia fimbriata (L.) Fr., Lich. Eur. Reform. (Lund): 222 (1831).

Sipman & Aguirre-C. (2016: 173) consideraron este nombre como un "... registro basado en identificación errónea. Esta especie no se conoce con certeza en Colombia (Ahti 2000) y es fácil de confundir con *C. subsquamosa* ..." De hecho, la revisión del material (Fig. 1F-G) demostró que representa esa última especie (T. Ahti, comun. pers. 7.6.2020).

Cladonia subulata (L.) Weber ex F.H. Wigg., Prim. Fl. Holsat. (Kiliae): 90 (1780).

La muestra en COL con esta identificación original fue anotada como *Cladonia corniculata* Ahti & Kashiw. por T. Ahti, una especie ya reportada en el *Catálogo* (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016).

Cladonia verticillaris (Raddi) Fr., Lich. Eur. Reform. (Lund): 465 (1831).

Sipman & Aguirre-C. (2016: 176) consideraron este nombre como un "... registro basado en identificación errónea. Los registros (Antioquia, Cundinamarca y Norte de Santander, 1400-3300 m) pueden corresponder a *C. andesita* o *C. rappii*". Una muestra revisada en COL (*Linares 9689*) en efecto representa el complejo de *Cladonia rappii* A. Evans (Fig. 1H)

Fibrillithecis pachystoma (Nyl.) Sipman in Sipman et al., Phytotaxa 55: 70 (2012).

Revisión del material reportado por Nylander (1867) bajo el nombre *Thelotrema pachystomum* Nyl. demostró que parte del material (*Lindig 55*) corresponde a otra especie, *Fibrillithecis inspersa* Kalb (Kalb, comunicación personal, 2020).

Graphina hololeuroides (Nyl.) Müll.Arg., Flora 65: 397 (1882).

Este nombre fue considerado como "... registro erróneo de Müller Arg. (1882a: 397), basado en Nylander (1863a: 266), quien trató un espécimen de México" (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016: 192). En realidad, es un sinónimo de *Acanthothecis hololeuroides* (Nyl.) Staiger & Kalb, nombre aceptado en el mismo *Catálogo*.

Haematomma puniceum (Ach.) A. Massal., Atti Inst. Veneto Sci. Lett., ed Arti, Sér. 3, 5: 253 (1860).

El nombre de esta especie fue frecuentemente mal aplicado (**Staiger & Kalb**, 1995), incluso en el *Catálogo* (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016). Dos muestras revisadas en COL (Aguirre 6113, Aguirre 6102) representan otras especies del género, *Haematomma flexuosum* Hillmann y *Haematomma personii* (Fée) A. Massal. (Fig. 1I-J). La segunda representa un nuevo registro en referencia al *Catálogo*.

Hafellia disciformis (Fr.) Marbach in Sipman & Aguirre-C. in Bernal, et al., Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia: 244 (2016).

Este nombre, que lleva la citación correcta *Hafellia disciformis* (Fr.) Marbach & H. Mayrhofer (**Marbach**, 2000), está clasificada como *Buellia disciformis* (Fr.) Mudd y es el tipo conservado del género *Buellia* (**Lücking et al.**, 2017a). *Hafellia* (*Buellia*) *disciformis* había sido excluido de la liquenobiota Colombiana por **Sipman & Aguirre-C.** (2016: 244), ya que fue considerado como "... registro basado en identificación errónea. La presencia de esta especie en Colombia no fue confirmada en la monografía (Marbach 2000)". Revisión de la muestra en COL y B (*Boekhout 28*) reveló que se trata de *Amandinea megaspora* Marbach (Fig. 1K), especie ya incluida en el *Catálogo*.

Mycoblastus glabrescens (Nyl.) Zahlbr., Cat. Lich. Univers. 4: 4 (1926).

Esta especie fue supuestamente establecida con base en material de Colombia por **Nylander** (1863b) y luego considerada como endémica para el país (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016). Sin embargo, Nylander (1863b) se había equivocado en el origen del material, que fue colectado en el Columbia River en el noroeste de Estados Unidos, un error que ya había sido clarificado anteriormente (**Kantvilas**, 2009). Por el momento, se considera *Mycoblastus glabrescens* una especie endémica para el noroeste de Estados Unidos (**Spribille, et al.**, 2011).

Ochrolechia pallescens (L.) A. Massal., Nuovi Ann. Sci. Nat. Bologna 7: 212 (1853).

Sipman & Aguirre-C. (2016: 218) constataron que "... la presencia en Colombia de esta especie, tan a menudo mal registrada, es improbable y requiere confirmación". Dos muestras revisadas en COL (Castaño-Rubi 1860, Wolf 515) representan otras dos especies: *Ochrolechia africana* Vain., generalmente encontrada en zonas más bajas, y *Ochrolechia subpallescens* Verseghy (Fig. 1L-M), característica para elevaciones más altas (**Roemer, et al.**, 2004). La segunda es un nuevo registro en relación al *Catálogo*.

Physcia crispula Müll.Arg., Flora 72: 144 (1889). Tipo. Colombia; on Fabronia; A. Lindig s.n. (G-G00293449, lectotipo!).

Esta especie fue considerada una identificación errónea por **Sipman & Aguirre-C.** (2016), ya que no había sido incluida en la revisión del género para Centro y Suramérica por **Moberg** (1990). Sin embargo, el nombre fue establecido basado en material de Colombia y por lo tanto no puede tratarse de una identificación errónea. El lectotipo tiene la anotación de R. Moberg de 1997 "*Physcia* cf. *dimidiata*". Sin embargo, el material no corresponde a esta especie y por lo tanto tiene que ser considerado como una especie aparte, aquí aceptada como *Physcia crispula* Müll.Arg.

Pseudocyphellaria crocata (L.) Vain., Hedwigia 37(Beibl.): 34 (1898).

Una revisión reciente del complejo de *Pseudocyphellaria crocata* en las Américas reveló que esta especie no se presenta en esta región (**Lücking, et al.**, 2017b). En Colombia, el complejo está representado por las siguientes tres especies: *Pseudocyphellaria citrina* (Gyeln.) Lücking, Moncada & S. Stenroos, *Pseudocyphellaria sandwicensis* (Zahlbr.) Moncada & Lücking y *Pseudocyphellaria xanthosticta* (Pers.) Moncada & Lücking (**Lücking, et al.**, 2017b).

Ramalina calicaris (L.) Röhl., Deutschl. Fl. (Frankfurt) 3(2): 139 (1813).

La muestra en COL (*Sipman 34456*) con esta identificación original corresponde a *Ramalina cumanensis* Fée (Fig. 1N) una especie ya reportada para Colombia (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016). Notablemente, el reporte de *Ramalina cumanensis* también se basa en la misma muestra (**Bernal, et al.**, 2020), así que el reporte erróneo de *Ramalina calicaris* ya había sido clarificada.

Stereocaulon corticatulum Nyl., Flora 41: 117 (1858).

Revisión de material en COL con este nombre reveló que pertenece a *Stereocaulon atlanticum* (I.M.Lamb) I.M.Lamb, un taxón ya listado en el *Catálogo* (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016).

Sticta sylvatica (Huds.) Ach., Methodus, Sectio Post. (Stockholmiaë): 281 (1803).

Este reporte fue considerado como dudoso por **Sipman & Aguirre-C.** (2016), ya que algunas muestras en COL representan *Sticta peltigerella* (Nyl.) Trevis. Sin embargo, **Moncada** (2012) antes había confirmado la presencia de *Sticta sylvatica* en Colombia, con la citación de varias muestras de COL (Fig. 1-O), luego soportado por resultados de filogenia molecular (**Moncada, et al.**, 2020).

Sticta sinuosa var. *macrophylla* (Bab.) Müll.Arg. in Sipman & Aguirre-C. in Bernal, et al., *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia*: 213 (2016).

Hay bastante confusión nomenclatural con este nombre. El epíteto fue establecido por primera vez por **Delise** (1825), en referencia a una muestra de herbario nombrada por Bory de Saint-Vincent, como *Sticta macrophylla* Bory ex Delise. Después fue citada

como “*S. macrophylla* Hook. f.” (**Index Fungorum**, 2020) en **Hooker** (1834). Este último reporte tiene varios errores. Primero, fue William Jackson Hooker (Hook.) quien reportó la especie y no su hijo Joseph Dalton Hooker (Hook. f.). Segundo, Hooker no estableció un nuevo nombre sino se referió a un reporte de **Fée** (1825), quien mezcló un reporte de **Delise** (1825) bajo dos nombres, “*S. macrocarpa* Delise” (en la entrada

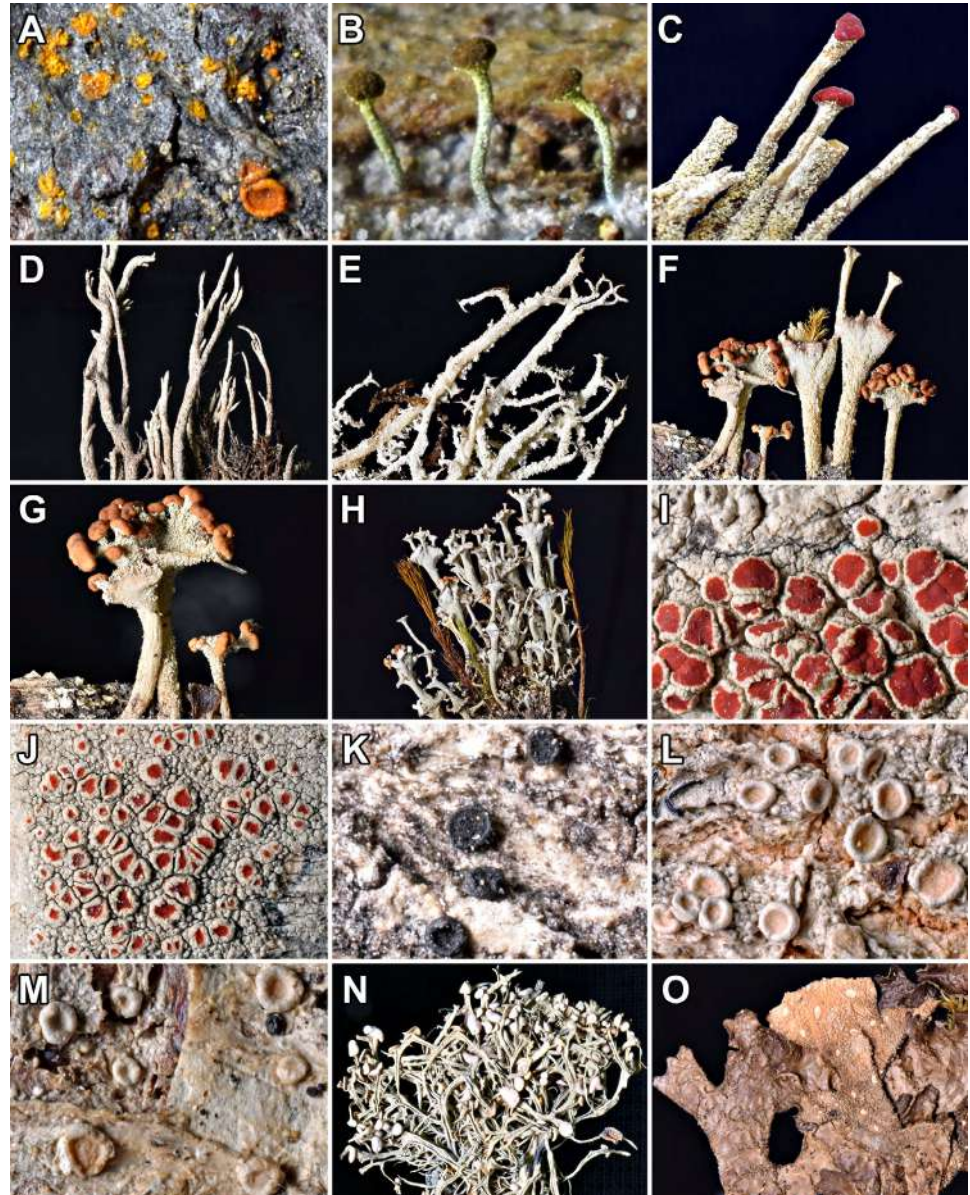


Figura 1. Muestras del herbario COL con nombres de hongos liquenizados mal aplicados o considerados dudosos en el *Cátalogo*. A. *Caloplaca granularis* (Sipman 27453, como *C. lucifuga*). B. *Chaenotheca olivaceorufa* (Aguirre 5510, como *C. laevigata*). C. *Cladonia didyma* (Jaramillo 3127, como *C. bacillaris*). D. *C. granulosa* (Aguirre 6034, como *C. chondrotypa*). E. *C. subdelicatula* (Sipman 27622, como *C. chondrotypa*). F–G. *C. subsquamosa* (Cleef 9866f, como *C. fimbriata*). H. *C. rappii* s.lat. (Linares 9689, como *C. verticillaris*). I. *Haematomma flexuosum* (Aguirre 6113, como *H. puniceum*). J. *H. personii* (Aguirre 6102, como *H. puniceum*). K. *Amandinea megaspora* (Boekhout 28, como *Hafellia disciformis*). L. *Ochrolechia africana* (Castaño-Rubi 1860, como *O. pallescens*). M. *O. subpallescens* (Wolf 515, como *O. pallescens*). N. *Ramalina cumanensis* (Sipman 34456, como *R. calicaris*). O. *Sticta sylvatica* (Sipman 34490, considerado dudoso pero aquí confirmado)

principal del taxon; **Fée**, 1825: 129) y *S. macrophylla* Bory ex Delise (en tabla XXXIII fig. I y en el índice en p. 165). El nombre “*S. macrocarpa*” es un error, así que tanto el reporte de **Fée** (1825) y de Hooker en **Hooker** (1834) se refiere a *S. macrophylla* Bory ex Delise.

Nylander (1857) mencionó la combinación de *Sticta damicornis* var. *macrophylla*, aparentemente con referencia al reporte de *S. macrophylla* Hooker en **Hooker** (1834). Sin embargo, **Index Fungorum** (2020) indica el nombre como una nueva variedad establecida por Nylander, como “*S. damicornis* var. *macrophylla* Nyl.”. En realidad, se puede asumir que **Nylander** (1857) reportó la combinación ya hecha por **Babington** (1857), como *S. damicornis* var. *macrophylla* (Bory ex Delise) C. Bab., explícitamente basada en *S. macrophylla* Bory ex Delise y no como un nuevo nombre, tal como lo sugiere **Index Fungorum** (2020: “*S. damicornis* var. *macrophylla* C. Bab.”). Por lo tanto, los nombres “*S. damicornis* var. *macrophylla* Nyl.” y “*S. damicornis* var. *macrophylla* C. Bab.” no existen y el nombre “*S. damicornis* var. *macrophylla* Nyl.” no es un homónimo ilegítimo de “*S. damicornis* var. *macrophylla* C. Bab.” ni del nombre correcto *S. damicornis* var. *macrophylla* (Bory ex Delise) C. Bab. **Müller** (1891) luego propuso la combinación *S. sinuosa* var. *macrophylla*, con base en material de Brasil pero con referencia a *S. damicornis* var. *macrophylla* (Bory ex Delise) C. Bab. reportada por **Nylander** (1858), así también basada indirectamente en *S. macrophylla* Bory ex Delise. Por lo tanto, el nombre “*S. sinuosa* var. *macrophylla* Müll.Arg.”, que según **Index Fungorum** (2020) reemplaza al nombre supuestamente ilegítimo, “*S. damicornis* var. *macrophylla* Nyl.”, es superfluo. Igualmente, el nombre *S. howei* D.J. Galloway no es un sinónimo homotípico de los supuestos nombres “*S. damicornis* var. *macrophylla* Nyl.” y “*S. sinuosa* var. *macrophylla* Müll.Arg.”; **Galloway** (1998) estableció este nombre en base de material de Lord Howe Island que había sido identificado previamente como *S. sinuosa* var. *macrophylla* pero que tiene nada que ver con *S. macrophylla*.

En conclusion, el nombre “*Sticta sinuosa* var. *macrophylla* (Bab.) Müll.Arg.” se cita correctamente como *S. sinuosa* var. *macrophylla* (Bory ex Delise) Müll.Arg. y es un sinónimo homotípico de *S. macrophylla* Bory ex Delise.

Thelotrema cavatum Ach., K. Vetensk-Acad. Nya Handl. 33: 92 (1812).

Este nombre fue considerado como “... especie dudosa, con identidad incierta” (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016: 202). En realidad, es un sinónimo de *Ocellularia cavata* (Ach.) Müll.Arg., nombre aceptado en el mismo *Catálogo*.

Usnea longissima Ach., Lich. Univ.: 626 (1810); *Dolichousnea longissima* (Ach.) Articus, Taxon 53: 932 (2004).

En los trópicos, este nombre frecuentemente está mal aplicado para material de otras especies péndulas (**Truong, et al.**, 2013). Material en COL corresponde a *Usnea crenulata* Truong & P. Clerc y *Usnea mexicana* Vain., ambas especies no listadas en el Catálogo (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016), aunque fueron reportadas para Colombia por **Truong, et al.** (2013).

Parte III: Nombres considerados como sinónimos y con cambio en la asignación a familia, y sus nombres y familias actuales (54)

Bacidia trachona (Flot.) Lettau ≡ *Aquacidia trachona* (Ach.) Aptroot; Ramalinaceae → **Pilocarpaceae** (**Aptroot, et al.**, 2018).

Buellia glaziouana var. *sensitiva* (Zahlbr.) Imshaug = *Buellia mamillana* (Tuck.) W.A. Weber; Physciaceae → **Caliciaceae** (**Bungartz, et al.**, 2004).

Clavulinopsis coronilla (G.W.Martin) Corner ≡ *Multiclavula coronilla* (G.W. Martin) R.H. Petersen; Clavariaceae → **Clavulinaceae** (**Petersen, 1967**).

Crocynia gossypina (Sw.) A.Massal. ≡ *Phyllopsora gossypina* (Sw.) Kistenich, Timdal, Bendiksby & S. Ekman; Crocyniaceae → **Ramalinaceae** (**Kistenich, et al.**, 2018).

Crocynia gossypina var. *mollis* (Sw.) Hue = *Phyllopsora pyxinoides* (Nyl.) Kistenich, Timdal, Bendiksby & S. Ekman; Crocyniaceae → **Ramalinaceae** (este trabajo).

Crocynia pyxinoides Nyl. ≡ *Phyllopsora pyxinoides* (Nyl.) Kistenich, Timdal, Bendiksby & S. Ekman; Crocyniaceae → **Ramalinaceae** (Kistenich, *et al.*, 2018).

Dictyonema glabratum (Spreng.) D.Hawksw. ≡ *Cora glabrata* (Spreng.) Fr.; Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2013).

Dictyonema hirsutum Moncada & Lücking ≡ *Cora hirsuta* (Moncada & Lücking) Moncada & Lücking; Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2013).

Dictyonema melvinii Chaves, *et al.*, ≡ *Corella melvinii* (Chaves, Lücking & L. Umaña) Lücking, Dal-Forno & Lawrey; Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2013).

Dictyonema minus Lücking, *et al.*, ≡ *Cora minor* (Lücking, E. Navarro & Sipman) Lücking; Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2013).

Dictyonema zahlbruckneri (Schiffn.) V.Marcano ≡ *Corella zahlbruckneri* Schiffn.; Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2013).

Lecidea umbricolor Nyl. ≡ *Fuscidea umbricolor* (Nyl.) Hertel; Lecideaceae → **Fuscideaceae** (Hertel, 1974).

Lobaria excisa (Müll.Arg.) Zahlbr. ≡ *Emmanuelia excisa* (Müll.Arg.) Lücking, Moncada & Ant.Simon; Lobariaceae → **Peltigeraceae** subfam. **Lobarioideae** (Moncada, *et al.*, 2013; Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobaria patinifera (Taylor) Müll.Arg. ≡ *Emmanuelia patinifera* (Taylor) Lücking, M. Cáceres & Ant. Simon; Lobariaceae → **Peltigeraceae** subfam. **Lobarioideae** (Moncada, *et al.*, 2013; Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobaria peltigera (Delise) Vain. ≡ *Yoshimuriella peltigera* (Vain.) Lücking & Moncada; Lobariaceae → **Peltigeraceae** subfam. **Lobarioideae** (Moncada, *et al.*, 2013; Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobaria tenuis Vain. ≡ *Emmanuelia tenuis* (Vain.) Lücking, Moncada & Gumboski; Lobariaceae → **Peltigeraceae** subfam. **Lobarioideae** (Moncada, *et al.*, 2013; Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Mycomicrothelia apposita (Nyl.) D.Hawksw. ≡ *Bogoriella apposita* (Nyl.) Aptroot & Lücking; Arthopyreniaceae → **Trypetheliaceae** (Aptroot & Lücking, 2016).

Mycomicrothelia captiosa (Kremp.) D.Hawksw. ≡ *Bogoriella captiosa* (Kremp.) Aptroot & Lücking; Arthopyreniaceae → **Trypetheliaceae** (Aptroot & Lücking, 2016).

Mycomicrothelia exigua (Müll.Arg.) D.Hawksw. ≡ *Bogoriella exigua* (Müll.Arg.) Aptroot & Lücking; Arthopyreniaceae → **Trypetheliaceae** (Aptroot & Lücking, 2016).

Mycomicrothelia hemispherica (Müll.Arg.) D.Hawksw. ≡ *Bogoriella hemisphaerica* (Müll.Arg.) Aptroot & Lücking; Arthopyreniaceae → **Trypetheliaceae** (Aptroot & Lücking, 2016).

Mycomicrothelia thelena (Ach.) D.Hawksw. ≡ *Bogoriella thelena* (Ach.) Aptroot & Lücking; Arthopyreniaceae → **Trypetheliaceae** (Aptroot & Lücking, 2016).

Mycomicrothelia xanthonica Komposch & Aptroot ≡ *Bogoriella xanthonica* (Komposch, Aptroot & Hafellner) Aptroot & Lücking; Arthopyreniaceae → **Trypetheliaceae** (Aptroot & Lücking, 2016).

Nephroma helveticum Ach. ≡ *Nephroma tropicum* (Müll.Arg.) Zahlbr.; Nephromataceae → **Peltigeraceae** subfam. **Nephromatoideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Omphalina foliacea P.M.Jørg. ≡ *Agonimia foliacea* (P.M. Jørg.) Lücking & Moncada; Tricholomataceae → **Verrucariaceae** (Lücking & Moncada, 2017).

Opegrapha atra Pers. ≡ *Arthonia atra* (Pers.) A. Schneid.; Roccellaceae → **Arthoniaceae** (Ertz, *et al.*, 2009).

Opegrapha bonplandii Fée ≡ *Zwackhia bonplandii* (Fée) Ertz; Roccellaceae → **Lecanographaceae** (Diederich, *et al.*, 2012).

Opegrapha bonplandii var. *abbreviata* (Fée) Müll.Arg. = *Zwackhia bonplandii* (Fée) Ertz; Roccellaceae → **Lecanographaceae (Diederich, et al., 2012).**

Opegrapha filicina Mont. ≡ *Fouragea filicina* (Mont.) Trevis.; Roccellaceae → **Opegraphaceae (Frisch, et al., 2014).**

Opegrapha longissima Müll.Arg. ≡ *Dimidiographa longissima* (Müll.Arg.) Ertz & Tehler; Roccellaceae → **Roccellographaceae (Ertz & Tehler, 2011).**

Opegrapha prosodea Ach. ≡ *Zwackhia prosodea* (Afzel.) Ertz; Roccellaceae → **Lecanographaceae (Diederich, et al., 2012).**

Opegrapha puiggarii Müll.Arg. ≡ *Fouragea puiggarii* (Müll.Arg.) Zahlbr.; Roccellaceae → **Opegraphaceae (Frisch, et al., 2014).**

Opegrapha robusta Vain. ≡ *Zwackhia robusta* (Vain.) Ertz; Roccellaceae → **Lecanographaceae (Diederich, et al., 2012).**

Opegrapha varia Pers. ≡ *Alyxoria varia* (Pers.) Ertz & Tehler; Roccellaceae → **Opegraphaceae (Ertz & Tehler, 2011).**

Opegrapha viridis (Ach.) Behlen & Desberger ≡ *Zwackhia viridis* (Ach.) Poetsch & Schied.; Roccellaceae → **Lecanographaceae (Diederich, et al., 2012).**

Pertusaria acroschyphoides Sipman ≡ *Lepra acroschyphoides* (Sipman) I. Schmitt, B.P. Hodk. & Lumbsch; Pertusariaceae → **Ochrolechiaceae (Wei, et al., 2017).**

Pertusaria albescens (Huds.) M.Choisy & Werner ≡ *Lepra albescens* (Huds.) Hafellner; Pertusariaceae → **Ochrolechiaceae (Hafellner & Türk, 2016).**

Pertusaria culbersonii Vězda ≡ *Varicellaria culbersonii* (Vězda) I. Schmitt & Lumbsch; Pertusariaceae → **Ochrolechiaceae (Schmitt, et al., 2012).**

Pertusaria multipuncta (Turn.) Nyl. ≡ *Lepra multipuncta* (Turner) Hafellner; Pertusariaceae → **Ochrolechiaceae (Hafellner & Türk, 2016).**

Pertusaria subventosa Malme ≡ *Lepra subventosa* (Malme) Schmitt & Lumbsch; Pertusariaceae → **Ochrolechiaceae (Wei, et al., 2017).**

Pertusaria velata (Turn.) Nyl. ≡ *Varicellaria velata* (Turner) I. Schmitt & Lumbsch; Pertusariaceae → **Ochrolechiaceae (Schmitt, et al., 2012).**

Pseudocyphellaria arvidssonii D.J.Galloway ≡ *Crocodia arvidssonii* (D.J. Galloway) D.J. Galloway & Elix; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Galloway & Elix, 2013, 2014; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Pseudocyphellaria aurata (Ach.) Vain. ≡ *Crocodia aurata* (Ach.) Link; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Galloway & Elix, 2013, 2014; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Pseudocyphellaria clathrata (De Not.) Malme ≡ *Crocodia clathrata* (De Not.) Trevis.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Galloway & Elix, 2013, 2014; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Pseudocyphellaria encoensis R.Sant. ≡ *Podostictina encoensis* (R. Sant.) D.J. Galloway & de Lange; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (de Lange & Galloway, 2015; Galloway & de Lange, 2017; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Pyxine isidiophora (Müll.Arg.) Imshaug = *Pyxine coralligera* Malme; Physciaceae → **Caliciaceae (Kalb, 1987; Lücking, et al., 2017a).**

Sticta kunthii var. *pilosella* (Nyl.) Zahlbr. = *Sticta gyalocarpa* (Nyl.) Trevis.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta laciniata var. *dilatata* (Nyl.) Müll.Arg. ≡ *Sticta boliviana* Nyl.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta laciniata var. *laeviuscula* Nyl. = *Sticta orizabana* Nyl.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta lenormandii f. *brevior* Nyl. [nom. inval.] = *Sticta brevior* Moncada & Lücking; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta tomentosa f. *latior* Nyl. = *Sticta cometia* Ach.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta tomentosa f. *leucoblepharis* (Tuck. & Mont.) Zahlbr. ≡ *Sticta leucoblepharis* Tuck. & Mont.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta tomentosa f. *ornata* (Müll.Arg.) Hue = *Sticta dilatata* (Nyl.) Vain.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta tomentosa var. *dilatata* (Nyl.) Hue ≡ *Sticta dilatata* (Nyl.) Vain.; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta weigeli var. *beauvoisii* (Delise) Hue ≡ *Sticta beauvoisii* Delise; Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Moncada, 2012; Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Parte IV: Nombres considerados como sinónimos y sus nombres actuales (191)

Arthonia cinnabarina (DC.) Wallr. ≡ *Coniocarpon cinnabarinum* DC. (Frisch, et al., 2014).

Arthonia cyrtodes Nyl. ≡ *Arthothelium cyrtodes* (Nyl.) Zahlbr. (este trabajo).

Arthonia radiata f. *astroidea* (Ach.) Ach. = *Arthonia radiata* (Pers.) Ach. (Tehler, 1990).

Arthothelium ambiguellum (Nyl.) Müll.Arg. ≡ *Arthonia ambiguella* Nyl. (este trabajo).

Arthothelium macrothecum (Fée) Müll.Arg. ≡ *Arthonia macrotheca* Fée (este trabajo).

Arthothelium nephelinum (Nyl.) Zahlbr. ≡ *Arthonia nephelina* Nyl. (este trabajo).

Arthothelium taediosum (Nyl.) Müll.Arg. ≡ *Arthonia taediosa* Nyl. (este trabajo).

Astrothelium galbineum Kremp. = *Astrothelium macrocarpum* Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Astrothelium sulphureum (Eschw.) Nyl. = *Astrothelium pyrenastrosulphureum* Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Bacidia endoleuca (Nyl.) J.Kickx f. = *Bacidia laurocerasi* (Delise ex Duby) Zahlbr. (Hawksworth, et al., 1980).

Bacidia incompta (Hook.) Anzi ≡ *Bellicidia incompta* (Borrer) Kistenich, Timdal, Bendiksby & S. Ekman (Kistenich, et al., 2018).

Bacidia millegrana var. *suffusa* (Müll.Arg.) Zahlbr. [error ortográfico: *Bacidia millegrana* var. *suffusa* (Fr.) Zahlbr.] ≡ *Bacidia suffusa* (Fr.) A. Schneid. (este trabajo).

Bacidopsora squamulosula (Nyl.) Kalb ≡ *Bacidia squamulosula* (Nyl.) Zahlbr. (Kistenich, et al., 2018).

Badimia galbinea (Kremp.) Vězda = *Badimia vezdana* Lücking, et al., (Lumbsch, et al., 2011).

Badimia newtoniana (Henriq.) Vězda ≡ *Eugeniella newtoniana* (Henriq.) Lücking, Sérus. & Kalb (Lücking, 2008).

Bathelium degenerans (Vain.) R.C.Harris ≡ *Astrothelium degenerans* (Vain.) Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Bathelium feei (Meissn.) Aptroot ≡ *Astrothelium feei* (C.F.W. Meissn.) Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Biatora pyrromelaena Tuck. ≡ *Phyllopsora pyrromelaena* (Tuck.) Swinscow & Krog (Swinscow & Krog, 1981).

Caleniopsis conspersa (Stirt.) Lücking, et al., ≡ *Rolueckia conspersa* (Stirt.) Papong, Thammath. & Boonpr. (Papong, et al., 2008).

Caloplaca cinnabarina (Ach.) Zahlbr. ≡ *Brownliella cinnabarina* (Ach.) S.Y. Kondr., Kärnefelt, A. Thell, Elix, Jung Kim, A.S. Kondr. & Hur (Kondratyuk, et al., 2013).

Caloplaca citrina (Hoffm.) Th.Fr. ≡ *Flavoplaca citrina* (Hoffm.) Arup, Frödén & Söchting (Arup, et al., 2013).

Caloplaca conjugens (Nyl.) Zahlbr. [error ortográfico: *Caloplaca conjugens* (Nyl.) Zahlbr.] = *Caloplaca erythrantha* (Tuck.) Zahlbr. (Wetmore, 2007).

Caloplaca flavovirescens (Wulf.) D.T. & Sarnth. ≡ *Gyalolechia flavovirescens* (Wulfen) Söchting, Frödén & Arup (Arup, et al., 2013).

Caloplaca pollinii (A.Massal.) Jatta ≡ *Huneckia pollinii* (A. Massal.) S.Y. Kondr., Kärnefelt, Elix, A. Thell, Jung Kim, A.S. Kondr. & Hur (Kondratyuk, et al., 2014).

Caloplaca pyracea (Ach.) Th.Fr. ≡ *Athallia pyracea* (Ach.) Arup, Frödén & Söchting (Arup, et al., 2013).

Caloplaca saxicola (Hoffm.) Nordin ≡ *Calogaya saxicola* (Hoffm.) Vondrák (Vondrák, et al., 2016).

Caloplaca stellata Wetmore & Kärnefelt ≡ *Polycauliona stellata* (Wetmore & Kärnefelt) Arup, Frödén & Söchting (Arup, et al., 2013).

Canoparmelia carneopruinata (Zahlbr.) Elix & Hale ≡ *Crespoa carneopruinata* (Zahlbr.) Lendemer & B.P. Hodk. (Lendemer & Hodkinson, 2012).

Canoparmelia salacinifera (Hale) Elix & Hale ≡ *Parmelinella salacinifera* (Hale) Marcelli & Benatti (Benatti, 2014).

Cetrariastrum dubitans Sipman ≡ *Hypotrachyna dubitans* (Sipman) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (Divakar, et al., 2013).

Cetrariastrum equadoriense (R.Sant.) Sipman ≡ *Hypotrachyna ecuadorensis* (R. Sant.) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (Divakar, et al., 2013).

Chapsa albomaculata (Sipman) Sipman & Lücking ≡ *Pseudochapsa albomaculata* (Sipman) Parmen, Lücking & Lumbsch (Parmen, et al., 2012).

Chapsa dilatata (Müll.Arg.) Kalb ≡ *Pseudochapsa dilatata* (Müll.Arg.) Parmen, Lücking & Lumbsch (Parmen, et al., 2012).

Chapsa platycarpella (Vain.) A.Frisch ≡ *Astrochapsa platycarpella* (Vain.) Parmen, Lücking & Lumbsch (Parmen, et al., 2012).

Chapsa platycarpoides (Tuck.) Breuss & Lücking ≡ *Asteristion platycarpoides* (Tuck.) I. Medeiros, Lücking & Lumbsch (Medeiros, et al., 2017).

Chapsa referta (Hale) Lücking ≡ *Ocellularia referta* Hale (este trabajo).

Chiodecton separatum Nyl. = *Sclerophyton syncesioides* Sparrius (Ertz, com. pers. 2020).

Cladia fuliginosa Filson ≡ *Rexiella fuliginosa* (Filson) S. Stenroos, Pino-Bodas and Ahti (Stenroos, et al., 2019a, b).

Coenogonium flavicans (Vězda & Farkas) Kalb & Lücking = *Coenogonium geralense* (Henn.) Lücking (Lücking, 2008).

Collema callibotrys Tuck. ≡ *Rostania callibotrys* (Tuck.) Otálora, P.M. Jørg. & Wedin (Otálora, et al., 2014).

Collema conglomeratum Hoffm. ≡ *Enchylium conglomeratum* (Hoffm.) Otálora, P.M. Jørg. & Wedin (Otálora, et al., 2014).

Collema conglomeratum var. *corynesporum* (Malme) Degel. = *Enchylium conglomeratum* (Hoffm.) Otálora, P.M. Jørg. & Wedin (**Esslinger, 2016**).

Cryptothecia filicina (Ellis & Everh.) Lücking & G.Thor ≡ *Myriostigma filicinum* (Ellis & Everh.) Frisch & G. Thor (**Frisch, et al., 2014**).

Cryptothelium diplocarpum (Nyl.) Zahlbr. ≡ *Astrothelium diplocarpum* Nyl. (**Aptroot & Lücking, 2016**).

Everniastrum catawbiense (Degel.) Sipman ≡ *Hypotrachyna catawbiensis* (Degel.) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum cirrhatum (Fr.) Sipman ≡ *Hypotrachyna cirrhata* (Fr.) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum columbiense (Zahlbr.) Sipman ≡ *Hypotrachyna columbiensis* (Zahlbr.) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum fragile Sipman ≡ *Hypotrachyna fragilis* (Sipman) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum limaeforme (Taylor) Hale ex Sipman [error ortográfico: *Everniastrum limiforme* (Taylor) Hale ex Sipman] ≡ *Hypotrachyna limiformis* (Taylor) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum lipidiferum (Hale & Wirth) Sipman ≡ *Hypotrachyna lipidifera* (Hale & M. Wirth) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum planum Sipman ≡ *Hypotrachyna plana* (Sipman) Divakar, A. Crespo, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum sorocheilum (Vain.) Sipman ≡ *Hypotrachyna sorocheila* (Vain.) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum subvexans Sipman ≡ *Hypotrachyna subvexans* (Sipman) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Everniastrum vexans (W.L.Culb. & C.F.Culb.) Sipman ≡ *Hypotrachyna vexans* (Zahlbr. ex W.L. Culb. & C.F. Culb.) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al., 2013**).

Graphina agminalis (Nyl.) Zahlbr. ≡ *Jocatoa agminalis* (Nyl.) Lücking, Herrera-Camp. & R. Miranda (**Miranda-González, et al., 2020**).

Graphina insculpta (Eschw.) Müll.Arg. ≡ *Fissurina insculpta* Mont. (**Aptroot, et al., 2007**).

Graphina malmei Redinger ≡ *Malmographina plicosa* (C.F.W. Meissn.) M. Cáceres, Rivas Plata & Lücking (**Cáceres, et al., 2012**).

Graphis acharii Fée ≡ *Allographa acharii* (Fée) Lücking & Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Graphis adpressa Vain. ≡ *Allographa adpressa* (Vain.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis analoga var. *subtecta* (Nyl.) Zahlbr. (error ortográfico: *Graphis analoga* var. *subtecta* Nyl.) ≡ *Graphis subtecta* (Nyl.) Lücking (**Lücking, et al., 2009**).

Graphis angustata Eschw. ≡ *Allographa angustata* (Eschw) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis chrysocarpa (Raddi) Spreng. ≡ *Allographa chrysocarpa* (Raddi) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis cinerea Fée ≡ *Allographa cinerea* (Fée) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis cleistomma Nyl. ≡ *Allographa cleistomma* (Nyl.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis comma (Ach.) Spreng. ≡ *Allographa comma* (Ach.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis daintreensis (A.W.Archer) A.W.Archer ≡ *Allographa daintreensis* (A.W. Archer) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis dolichographa Nyl. ≡ *Allographa dolichographa* (Nyl.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis flexibilis Kremp. = *Allographa angustata* (Eschw) Lücking & Kalb (**Lücking, et al., 2009; Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis glauconigra Vain. ≡ *Allographa glauconigra* (Vain.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis illinata Eschw. ≡ *Allographa illinata* (Eschw.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis lumbricina Vain. ≡ *Allographa lumbricina* (Vain.) Lücking & Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Graphis macella Kremp. ≡ *Allographa macella* (Kremp.) R. Lücking & K. Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Graphis mexicana (Hale) Lücking, et al., ≡ *Allographa mexicana* (Hale) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis miniata Redinger ≡ *Allographa miniata* (Redinger) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis nuda (H.Magn.) Staiger & Lücking ≡ *Allographa nuda* (H.Magn.) Lücking & Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Graphis pittierii Lücking, et al., ≡ *Allographa pittieri* (Lücking, Umaña, Sipman & Chaves) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis plurispora (Redinger) Lücking & Chaves ≡ *Allographa plurispora* (Redinger) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis rhizocola (Fée) Lücking & Chaves [error ortográfico: *Graphis rhizicola* (Fée) Lücking & Chaves] ≡ *Allographa rhizicola* (Fée) Lücking & Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Graphis ruiziana (Fée) A.Massal. ≡ *Allographa ruiziana* (Fée) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis rustica Kremp. ≡ *Allographa rustica* (Kremp.) Lücking & Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Graphis scripta var. *serpentina* (Ach.) Meyen = *Graphis pulverulenta* (Pers.) Ach. (**Neuwirth & Aptroot, 2011**).

Graphis striatula (Ach.) Spreng. ≡ *Allographa striatula* (Ach.) Lücking & Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Graphis subchrysocarpa Lücking ≡ *Allographa ochracea* (C.W. Dodge) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis subflexibilis Lücking & Chaves ≡ *Allographa subflexibilis* (Lücking & Chaves) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis subradiata (Nyl.) Lücking ≡ *Allographa subradiata* (Nyl.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis subvirginea f. *denudata* Leight. = *Graphis dracaenae* Vain. (este trabajo).

Graphis triphora Nyl. ≡ *Allographa triphora* (Nyl.) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis tumidula (Fée) Spreng. ≡ *Allographa tumidula* (Fée) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Graphis vestitoides (Fink) Staiger ≡ *Allographa vestitoides* (Fink) Lücking & Kalb (**Kalb, et al., 2018**).

Hemithecium balbisii (Fée) Trevis. ≡ *Allographa balbisii* (Fée) Lücking & Kalb (**Lücking & Kalb, 2018**).

Hemithecium chlorocarpum (Fée) Trevis. ≡ *Allographa chlorocarpa* (Fée) Lücking & Kalb (Lücking & Kalb, 2018).

Herpothallon mycelioides (Vain.) Aptroot, et al., ≡ *Crypthonia mycelioides* (Vain.) Frisch & G. Thor (Frisch & Thor, 2010).

Heterodermia casarettiana (A.Massal.) Trevis. ≡ *Polyblastidium casarettianum* (A. Massal.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia circinalis (Zahlbr.) W.A.Weber ≡ *Leucodermia circinalis* (Zahlbr.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia corallophora (Taylor) Skorepa ≡ *Polyblastidium corallophorum* (Taylor) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia hypoleuca (Muhl.) Trevis. ≡ *Polyblastidium hypoleucum* (Ach.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia japonica (Sato) Swinscow & Krog ≡ *Polyblastidium japonicum* (M. Satô) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia leucomelos (L.) Poelt ≡ *Leucodermia leucomelos* (L.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia leucomelos subsp. *boryi* (Fée) Swinscow & Krog ≡ *Leucodermia boryi* (Fée) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia lutescens (Kurok.) Follmann & Redón ≡ *Leucodermia lutescens* (Kurok.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia propagulifera (Vain.) Dey ≡ *Polyblastidium propaguliferum* (Vain.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia squamulosa (Degel.) W.L.Culb. ≡ *Polyblastidium squamulosum* (Degel.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Heterodermia vulgaris (Vain.) Follmann & Redón ≡ *Leucodermia vulgaris* (Vain.) Kalb (Mongkolsuk, et al., 2015).

Laurera effusa Aptroot & Sipman ≡ *Astrothelium effusum* (Aptroot & Sipman) Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Laurera megasperma (Mont.) Zahlbr. ≡ *Astrothelium megaspermum* (Mont.) Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Laurera phaeomelodes (Müll.Arg.) Zahlbr. = *Astrothelium subdiscretum* (Nyl.) Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Laurera sphaerioides (Mont.) Zahlbr. ≡ *Astrothelium sphaerioides* (Mont.) Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Laurera variata (Nyl.) Zahlbr. ≡ *Astrothelium variatum* (Nyl.) Aptroot & Lücking (Aptroot & Lücking, 2016).

Lecanora hagenii (Ach.) Ach. ≡ *Myriolecis hagenii* (Ach.) Śliwa, Zhao Xin & Lumbsch (Zhao, et al., 2016).

Lepidostroma terricolens Mägdefrau & S.Winkl. (error ortográfico: *Lepidostroma terricolens* Mägd. & S.Winkl.) = *Lepidostroma calocerum* (G.W.Martin) Oberw. (Oberwinkler, 1984; Hodkinson, et al., 2014).

Leprocaulon albicans (Th.Fr.) Hue ≡ *Lepraria albicans* (Th. Fr.) Lendemer & B.P. Hodk. (Lendemer & Hodkinson, 2013).

Leprocaulon arbuscula (Nyl.) Nyl. ≡ *Lepraria arbuscula* (Nyl.) Lendemer & B.P. Hodk. (Lendemer & Hodkinson, 2013).

Leprocaulon congestum (Nyl.) I.M.Lamb & A.Ward ≡ *Lepraria congesta* (Nyl.) Lendemer & B.P. Hodk. (Lendemer & Hodkinson, 2013).

Leptotrema wightii (Taylor) Müll.Arg. ≡ *Sanguinotrema wightii* (Taylor) Lücking (Lücking, et al., 2015).

Leucogramma chrysenteron (Mont.) Staiger, *et al.*, ≡ *Pallidogramme chrysenteron* (Mont.) Staiger, Kalb & Lücking (**Lücking, et al.**, 2008).

Lopadium cyttarinum (Nyl.) Zahlbr. ≡ *Calopadia lecanorella* (Nyl.) Kalb & Vězda (**Kalb & Vězda**, 1987).

Maronina multifera (Nyl.) Hafellner & R.W.Rogers ≡ *Neoprotoparmelia multifera* (Nyl.) Garima Singh, Lumbsch & I. Schmitt (**Singh, et al.**, 2018).

Myriotrema glaucophaenum (Kremp.) Zahlbr. ≡ *Glaucotrema glaucophaenum* (Kremp.) Rivas Plata & Lumbsch (**Rivas Plata, et al.**, 2012).

Ocellularia cavata var. *submutata* (Nyl.) Zahlbr. = *Ocellularia violacea* Räsänen (este trabajo).

Opegrapha leucophila Nyl. ≡ *Ancistrosporella leucophila* (Nyl.) Ertz (**Ertz**, 2018).

Opegrapha onchospora Nyl. ≡ *Ancistrosporella onchospora* (Nyl.) Ertz (**Ertz**, 2018).

Parmeliella incrassata P.M.Jørg. ≡ *Nebularia incrassata* (P.M. Jørg.) P.M. Jørg. (**Ekman, et al.**, 2014).

Parmeliella mariana (Fr.) P.M.Jørg. & D.J.Galloway ≡ *Lepidocollema marianum* (Fr.) P.M. Jørg. (**Ekman, et al.**, 2014).

Parmelinopsis aff. subfaticens (Kurok.) Elix & Hale ≡ *Hypotrachyna aff. subfaticens* (Kurok.) Swinscow & Krog (**Divakar, et al.**, 2013).

Parmelinopsis cleefii (Sipman) V.Marcano & Sipman ≡ *Hypotrachyna cleefii* (Sipman) Divakar, A. Crespo, Sipman, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al.**, 2013).

Parmelinopsis horrescens (Taylor) Elix & Hale ≡ *Hypotrachyna horrescens* (Taylor) Krog & Swinscow (**Divakar, et al.**, 2013).

Parmelinopsis melanochaeta (Kurok.) Elix & Hale ≡ *Parmotrema melanochaetum* (Kurok.) O. Blanco, A. Crespo, Divakar, Elix & Lumbsch (**Divakar, et al.**, 2013).

Parmelinopsis minarum (Vain.) Elix & Hale ≡ *Hypotrachyna minarum* (Vain.) Krog & Swinscow (**Divakar, et al.**, 2013).

Parmelinopsis spumosa (Asah.) Elix & Hale ≡ *Hypotrachyna spumosa* (Asahina) Krog & Swinscow (**Divakar, et al.**, 2013).

Parmelinopsis swinscowii (Hale) Elix & Hale ≡ *Hypotrachyna swinscowii* (Hale) Krog & Swinscow (**Divakar, et al.**, 2013).

Phaeographina dividens (Nyl.) K.P.Singh & D.D.Awasthi ≡ *Phaeographis dividens* (Nyl.) Kr.P. Singh & Swarnal. (**Singh & Swarnalatha**, 2009).

Phaeographina internigricans (**Leight.**) Zahlbr. [error ortográfico: *Phaeographina internigricans* (Nyl.) Zahlbr.] ≡ *Graphis internigricans* Nyl. (este trabajo).

Phaeographina mesographa (Nyl.) Müll.Arg. ≡ *Phaeographis mesographa* (Nyl.) Müll.Arg. (**Staiger**, 2002).

Phaeographis inusta var. *medusuliformis* (Nyl.) Müll.Arg. = *Phaeographis medusiformis* (Kremp.) Müll.Arg. (este trabajo).

Phlyctidia boliviensis (Nyl.) Müll.Arg. ≡ *Phlyctis boliviensis* Nyl. (**Galloway & Guzmán-Grimaldi**, 1988).

Phyllopsora corallina var. *ochroxantha* (Nyl.) Brako ≡ *Phyllopsora ochroxantha* (Nyl.) Zahlbr. (**Kistenich, et al.**, 2019).

Phyllopsora corallina var. *santensis* (Eschw.) Brako [error ortográfico: *Phyllopsora corallina* var. *santensis* (**Tuck.**) Brako] ≡ *Phyllopsora santensis* (Tuck.) Swinscow & Krog (**Kistenich, et al.**, 2019).

Phyllopsora parvifolia var. *subgranulosa* (Tuck.) Müll.Arg. = *Phyllopsora canoumbrina* (Vain.) Brako (**Brako**, 1989).

Phyllopsora leucophyllina (Nyl.) Timdal ≡ *Parallopsora leucophyllina* (Nyl.) Kistenich, Timdal & Bendiksby (**Kistenich, et al.**, 2018)

Platygraphopsis interrupta (Fée) Müll.Arg. = *Sclerophyton extenuatum* (Nyl.) Sparrius (este trabajo).

Polychidium dendriscum (Nyl.) Henssen ≡ *Leptogidium dendriscum* (Nyl.) Nyl. (Muggia, et al., 2011).

Pseudopyrenula diluta var. *degenerans* Vain. = *Pseudopyrenula subnudata* Müll.Arg. (Aptroot & Lücking, 2016).

Psorotheciopsis philippinensis (Rehm) Lücking ≡ *Linhartia philippinensis* Rehm (este trabajo).

Pyrenula macrocarpa A.Massal. = *Pyrenula complanata* (Mont.) Trevis. (Aptroot, 2012).

Pyrenula mastophoroides var. *flavicans* (Nyl.) Zahlbr. = *Pyrenula mastophoroides* (Nyl.) Zahlbr. (Aptroot, 2012).

Pyrenula obvoluta (Nyl.) R.C.Harris & Aptroot = *Pyrenula dermatodes* (Borrer) Schaer. (Aptroot, 2012).

Pyrenula subducta var. *retracta* (Nyl.) Zahlbr. = *Pyrenula subducta* (Nyl.) Müll.Arg. (Aptroot, 2012).

Rimelia bonplandii Nata ≡ *Parmotrema bonplandii* (Mata) O. Blanco, A. Crespo, Divakar, Elix & Lumbsch (Blanco, et al., 2005).

Schismatomma permutans (Nyl.) Zahlbr. ≡ *Byssoloma permutans* (Nyl.) Lücking (Lücking, 2013).

Stegobolus auberianus (Mont.) A.Frisch & Kalb ≡ *Rhabdodiscus auberianus* Mont. Vain. (Rivas Plata, et al., 2012).

Stegobolus fissus (Nyl.) A.Frisch ≡ *Rhabdodiscus fissus* (Müll.Arg.) Vain. (Rivas Plata, et al., 2012).

Stegobolus metaphoricus (Nyl.) A.Frisch ≡ *Rhabdodiscus metaphoricus* (Nyl.) Vain. (Rivas Plata, et al., 2012).

Stegobolus percolumnellatus (Sipman) A.Frisch ≡ *Ocellularia percolumnellata* Sipman (Rivas Plata, et al., 2012).

Stegobolus reconditus (Stirt.) A.Frisch ≡ *Rhabdodiscus reconditus* (Stirt.) Rivas Plata, Lücking & Lumbsch (Rivas Plata, et al., 2012).

Stegobolus subemersus (Müll.Arg.) A.Frisch ≡ *Rhabdodiscus subemersus* (Müll.Arg.) Rivas Plata, Lücking & Lumbsch (Rivas Plata, et al., 2012).

Strigula janeirensis (Müll.Arg.) Lücking ≡ *Raciborskiella janeirensis* (Müll.Arg.) R. Sant. (Jiang, et al., 2020).

Strigula maculata (Cooke & Masee) R.Sant. ≡ *Racoplaca maculata* (Cooke & Masee) S.H.Jiang, Lücking & J.C.Wei (Jiang, et al., 2020).

Strigula melanobapha (Kremp.) R.Sant. ≡ *Racoplaca melanobapha* (Kremp.) S.H.Jiang, Lücking & J.C.Wei (Jiang, et al., 2020).

Strigula nemathora Mont. ≡ *Puiggariella nemathora* (Mont.) S.H.Jiang, Lücking & J.C.Wei (Jiang, et al., 2020).

Strigula obducta (Müll.Arg.) R.C.Harris ≡ *Phylloporis obducta* (Müll.Arg.) R. Sant. & Tibell (Jiang, et al., 2020).

Strigula phyllogena (Müll.Arg.) R.C.Harris ≡ *Phylloporis phyllogena* (Müll.Arg.) Clem. (Jiang, et al., 2020).

Strigula platypoda (Müll.Arg.) R.C.Harris ≡ *Phylloporis platypoda* (Müll.Arg.) Vězda (Jiang, et al., 2020).

Strigula radiata Lücking ≡ *Phylloporis radiata* (Lücking) S.H.Jiang, Lücking & J.C.Wei (Jiang, et al., 2020).

Strigula subtilissima (Fée) Müll.Arg. ≡ *Racoplaca subtilissima* Fée (Jiang, et al., 2020).

Strigula vulgaris (Müll.Arg.) Lücking ≡ *Phylloporis vulgaris* (Müll.Arg.) S.H.Jiang, Lücking & J.C.Wei (**Jiang, et al.**, 2020).

Teloschistes chrysophthalmus (L.) Th.Fr. ≡ *Niorma chrysophthalma* (L.) S.Y. Kondr., Kärnefelt, Elix, A. Thell, M.H. Jeong & Hur (**Kondratyuk, et al.**, 2013).

Teloschistes hypoglaucus (Nyl.) Zahlbr. ≡ *Niorma hypoglauca* (Nyl.) S.Y. Kondr., Kärnefelt, Elix, A. Thell, M.H. Jeong & Hur (**Kondratyuk, et al.**, 2013).

Thelotrema cavatum Ach. ≡ *Ocellularia cavata* (Ach.) Müll.Arg. (**Müller**, 1882).

Thelotrema spondaicum (Nyl.) Hale ≡ *Phaeographis spondaica* (Nyl.) Lücking (**Lücking**, 2015a, b).

Trapeliopsis subconcolor (Anzi) Hertel ≡ *Parainoa subconcolor* (Anzi) Resl & T. Sprib. (**Resl, et al.**, 2015).

Triclinium cinchonarum Fée ≡ *Phyllopsora cinchonarum* (Fée) Timdal (**Kistenich, et al.**, 2018).

Trypethelium aeneum (Eschw.) Zahlbr. ≡ *Astrothelium aeneum* (Eschw.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium annulare Mont. ≡ *Astrothelium annulare* (Fée) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium columbianum Nyl. ≡ *Architrypethelium columbianum* (Nyl.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium infuscatulum Müll.Arg. ≡ *Astrothelium infuscatulum* (Müll.Arg.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium papulosum (Nyl.) Makhija & Patw. ≡ *Astrothelium papulosum* (Nyl.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium phaeothelium Nyl. ≡ *Astrothelium phaeothelium* (Nyl.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium pupula (Ach.) R.C.Harris ≡ *Astrothelium pupula* (Ach.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium scorioides Leight. = *Astrothelium scoriiothelium* Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium thelotremoides (Nyl.) R.C.Harris ≡ *Astrothelium thelotremoides* (Nyl.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium tropicum (Ach.) Müll.Arg. ≡ *Nigrovothelium tropicum* (Ach.) Lücking, M.P. Nelsen & Aptroot (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium tuberculosum (Vain.) R.C.Harris ≡ *Astrothelium tuberculosum* (Vain.) Aptroot & Lücking (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Trypethelium variolosum Ach. ≡ *Astrothelium variolosum* (Ach.) Müll.Arg. (**Aptroot & Lücking**, 2016).

Usnea caespitia Motyka = *Usnea durietzii* Motyka (**Truong, et al.**, 2011).

Usnea finkii Zahlbr. = *Usnea transitoria* Motyka (**Truong, et al.**, 2013).

Usnea subhirta (Vain.) Motyka = *Usnea cornuta* Körb. (**Clerc**, 2007).

Usnea laevigata Vain. = *Usnea bogotensis* Vain. (**Gerlach, et al.**, 2009).

Usnea radiata Stirt. = *Usnea concinna* Stirt. (**Gerlach, et al.**, 2009).

Usnea sanguinea Swinscow & Krog = *Usnea erinacea* Vain. (**Truong, et al.**, 2011).

Usnea spinulifera (Vain.) Motyka = *Usnea dasaea* Stirt. (**Clerc & Herrera-Campos**, 1997).

Usnea sulcata Motyka = *Usnea alata* Motyka (**Truong, et al.**, 2013).

Usnea sulcata var. *neutra* (Motyka) Motyka = *Usnea alata* Motyka (**Truong, et al.**, 2013).

Xanthoria candelaria (L.) Th.Fr. ≡ *Polycauliona candelaria* (L.) Frödén, Arup & Søbchting (**Arup, et al.**, 2013).

Xanthoria elegans (Link) Th.Fr. ≡ *Rusavskia elegans* (Link) S.Y. Kondr. & Kärnefelt (Arup, et al., 2013).

Xanthoria weberi S.Y.Kondr.& Kärnefelt ≡ *Xanthomendoza weberi* (S.Y. Kondr. & Kärnefelt) L. Lindblom (Arup, et al., 2013).

Parte V: Nombres con cambio en la asignación a familia (234)

Ainoa geochroa (Körb.) Lumbsch & I.Schmitt: Agyriaceae → **Baeomycetaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Ainoa mooreana (Carroll) Lumbsch & I.Schmitt: Agyriaceae → **Baeomycetaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Allophoron farinosum Nádvd.: insertae sedis → **Arthoniales** (Lücking, et al., 2017a).

Amandinea endachroa (Malme) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Amandinea extenuata (Müll.Arg.) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Amandinea insperata (Nyl.) H.Mayrhofer & Ropin: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Amandinea megaspora Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Aspidothelium cinerascens Vain.: Aspidotheliaceae → **Thelenellaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Aspidothelium fugiens (Müll.Arg.) R.Sant.: Aspidotheliaceae → **Thelenellaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Asterothyrium leucophthalmum (Müll.Arg.) R.Sant.: Asterothyriaceae → **Gomphillaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Asterothyrium microsporum R.Sant.: Asterothyriaceae → **Gomphillaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Asterothyrium pittieri Müll.Arg.: Asterothyriaceae → **Gomphillaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Auriculora byssomorpha (Nyl.) Kalb: incertae sedis → **Ramalinaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Bactrospora myriadea (Fée) Egea & Torrente: Roccellaceae → **Opegraphaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Baculifera cinereocincta (Müll.Arg.) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Baculifera remensa (Stirt.) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Badimia dimidiata (Bab.) Vězda: Pilocarpaceae → **Ramalinaceae** (Kistenich, et al., 2018).

Badimia pallidula (Kremp.) Vězda: Pilocarpaceae → **Ramalinaceae** (Kistenich, et al., 2018).

Badimia tuckermannii (R.Sant.) Lücking et al.: Pilocarpaceae → **Ramalinaceae** (Kistenich, et al., 2018).

Badimia vezdana Lücking et al.: Pilocarpaceae → **Ramalinaceae** (Kistenich, et al., 2018).

Buellia aethalea (Ach.) Th.Fr.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Buellia conspirans (Nyl.) Vain.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Buellia dispersula Müll.Arg.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Buellia glaziouana (Kremp.) Müll.Arg.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Buellia stellulata (Taylor) Mudd: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

Buellia subjuncta (Nyl.) Müll.Arg.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, et al., 2017a).

- Buellia versicolor* Müll.Arg.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Calvitimela aglaea* (Sommerf.) Hafellner: Lecanoraceae → **Tephromelataceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Chrysothrix candelaris* (L.) J.R.Laundon: Chrysothricaceae → **Chrysothrichaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Chrysothrix chlorina* (Ach.) J.R.Laundon: Chrysothricaceae → **Chrysothrichaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Chrysothrix xanthina* (Vain.) Kalb: Chrysothricaceae → **Chrysothrichaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Cladia aggregata* (Sw.) Nyl.: Cladiaceae → **Cladoniaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Cratiria aggreddiens* (Stirt.) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Cratiria americana* (Fée) Kalb & Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Cratiria lauricassiae* (Fée) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Cratiria saltensis* (H.Magn.) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Cyphellostereum pusiolum* (Berk. & Curtis) D.A.Reid: Podoscyphaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Cystocoleus ebeneus* (Dillw.) Thwaites: incertae sedis → **Cystocoleaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dictyonema irpicinum* Mont.: Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dictyonema ligulatum* (Kremp.) Zahlbr.: Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dictyonema sericeum* (Sw.) Berk.: Atheliaceae → **Hygrophoraceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dimelaena tenuis* (Müll.Arg.) H.Mayrhofer & Wippel: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria aegialita* (Afz.) Moore: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria applanata* (Fée) D.D.Awasthi: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria aspera* (H.Magn.) D.D.Awasthi: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria confluens* (Fr.) D.D.Awasthi: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria confusa* D.D.Awasthi: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria melanocarpa* (Müll.Arg.) C.W.Dodge: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria picta* (Sw.) Clem. & Shear: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Dirinaria purpurascens* (Vain.) B.Moore: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Gassicurtia bellardii* (Sipman) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Gassicurtia coccinea* Fée: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Gassicurtia vaccinii* (Vain.) Marbach *et al.*: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).

Hypocenomyce scalaris (Ach.) M.Choisy: Lecideaceae → **Ophioparmaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).

Letrouititia domingensis (Pers.) Hafellner & Bellem.: Letrouitiaceae → **Brigantieaceae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Letrouititia flavidula (Tuck.) Hafellner: Letrouitiaceae → **Brigantieaceae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Letrouititia transgressa (Malme) Hafellner & Bellem.: Letrouitiaceae → **Brigantieaceae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Letrouititia vulpina (Tuck.) Hafellner & Bellem.: Letrouitiaceae → **Brigantieaceae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lichenomphalia aurantiaca (Redhead & Kuyper) Redhead *et al.*: **Tricholomataceae** → Hygrophoraceae (Lücking, *et al.*, 2017a).

Lichenomphalia lobata (Redhead & Kuyper) Redhead *et al.*: **Tricholomataceae** → Hygrophoraceae (Lücking, *et al.*, 2017a).

Lobariella angustata Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella auriculata Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella botryoides (Yoshim.& Arv.) Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella crenulata (Hook.) Yoshim.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella ecorticata Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella exornata (Zahlbr.) Yoshim.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella flavomedullosa Moncada *et al.*: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella isidiata Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella nashii Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella olivascens Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella pallida (Hook.) Yoshim.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella pallidocrenulata Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella parmelioides Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella pseudocrenulata Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella reticulata Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella sipmanii Moncada *et al.*: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella soredians Moncada *et al.*: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Lobariella stenroosiae Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Lobariella subcorallophora Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Lobariella subexornata (Yoshim.) Yoshim.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Lopezaria isidiza (Makhija & Nagarkar) Aptroot & Sipman: Megalariaceae → **Ramalinaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Lopezaria versicolor (Fée) Kalb & Hafellner: Megalariaceae → **Ramalinaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Opegrapha dekeselii Ertz: Roccellaceae → **Opegraphaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Opegrapha difcilior Nyl.: Roccellaceae → **Opegraphaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Opegrapha dimidiata Müll.Arg.: Roccellaceae → **Opegraphaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Opegrapha irosina Vain.: Roccellaceae → **Opegraphaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Opegrapha subvulgata Nyl.: Roccellaceae → **Opegraphaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Opegrapha vulgata Ach.: Roccellaceae → **Opegraphaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Phyllobathelium anomalum Lücking: Phyllobatheliaceae → **Strigulaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Phyllobathelium firmum (Stirt.) Vězda: Phyllobatheliaceae → **Strigulaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Phyllobathelium leguminosae (Cavalc. & A.A.Silva) Lücking & Sérus.: Phyllobatheliaceae → **Strigulaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Phylloblastia amazonica Kalb & Vězda: Strigulaceae → **Verrucariaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Phyllogyalidea epiphylla (Vězda) Lücking & Aptroot: Asterothyriaceae → **Gomphillaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Piccolia conspersa (Fée) Hafellner: Biatorellaceae → **incertae sedis (Lücking, et al., 2017a).**

Piccolia wrightii (Tuck.) Hafellner: Biatorellaceae → **incertae sedis (Lücking, et al., 2017a).**

Placopsis cribellans (Nyl.) Räsänen: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Placopsis fuscidula Räsänen: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Placopsis gelida (L.) Linds.: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Placopsis lambii Hertel & V.Wirth: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Placopsis parellina (Nyl.) I.M.Lamb: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Placopsis rhodocarpa (Nyl.) Nyl.: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Placynthiella icmalea (Ach.) Coppins & P.James: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Porina alba (R.Sant.) Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Porina americana Fée: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Porina atriceps (Vain.) Vain.: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

- Porina atrocoerulea* Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina barvica* Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina belonospora* (Nyl.) Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina colombiana* H.Magn.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina curtula* Malme: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina distans* Vězda & Vivant: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina dolichophora* (Nyl.) Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina endochrysea* Mont.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina epilucida* Sipman: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina epiphylla* (Fée) Fée: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina exasperatula* Vain.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina fulvella* Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina fusca* Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina guaranitica* Malme: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina haehndelii* Henssen & Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina imitatrix* Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina karnatakensis* Makhija *et al.*: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina leptosperma* Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina leptospermoides* Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina limbulata* (Kremp.) Vain.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina lucida* R.Sant.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina mastoidea* (Ach.) Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina melanops* Malme: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).
- Porina nitidula* Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; **Lücking**, 2019).

- Porina nucula* Ach.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina octomera* (Müll.Arg.) F.Schilling: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina papillifera* (Stirt.) F.Schilling: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina radiata* Kalb *et al.*: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina repanda* (Stirt.) Lücking & R.Sant.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina rubentior* (Stirt.) Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina rubescens* (Lücking) Hafellner & Kalb: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina rufula* (Kremp.) Vain.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina simulans* Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina subepiphylla* Lücking & Vězda: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina subinterstes* (Nyl.) Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina subnucula* Lumbsch *et al.*: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina subrosphaera* R.Sant.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina tetracerae* (Afz.) Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina tetramera* Vain.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina tijucana* (Malme) R.Sant.: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina triseptata* (Vězda) Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina umbilicata* (Müll.Arg.) Vězda: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porina vezdae* Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a; Lücking, 2019).
- Porpidia macrocarpa* (DC.) Hertel & Schwab: Porpidiaceae → **Lecideaceae** (F, *et al.*, 2017a).
- Pseudocyphellaria intricata* (Delise) Vain.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobararioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Pyxine albovirens* (G.Mey.) Aptroot: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine astridiana* Kalb: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine berteriana* (Fée) Imshaug: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine cooes* (Sw.) Nyl.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine cognata* Stirt.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine coralligera* Malme: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine daedalea* Krog & R.Sant.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).

- Pyxine eschweileri* (Tuck.) Vain.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine obscurascens* Malme: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine petricola* Nyl.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine sorediata* (Ach.) Mont.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Pyxine subcinerea* Stirt.: Physciaceae → **Caliciaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Ramboldia russula* (Ach.) Kalb *et al.*: Lecanoraceae → **Ramboldiaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Schaereria fuscocinerea* (Nyl.) Clauzade & Cl.Roux: Agyriaceae → **Schaereriaceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Solorina spongiosa* (Sm.) Anzi: Pannariaceae → **Peltigeraceae** (Lücking, *et al.*, 2017a).
- Sticta ambavillaria* (Bory) Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta andensis* (Nyl.) Trevis.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta andreana* (Müll.Arg.) Zahlbr.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta arachnofuliginosa* Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta arbuscula* Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta atroandensis* Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta brevior* Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta canariensis* (Ach.) Delise: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta cometia* Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta cordillerana* Gyeln.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta damaecornis* (Sw.) Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta filicinella* (Nyl.) Zahlbr.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta fuliginosa* (Dicks.) Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta granatensis* Nyl.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta gyalocarpa* (Nyl.) Trevis.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta humboldtii* Hook.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta impressula* (Nyl.) Zahlbr.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta isidiokunthii* Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).
- Sticta kunthii* Hook.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Sticta laciniata (Sw.) Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta laevis (Nyl.) Vain.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta lenormandii (Nyl.) Zahlbr.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta limbata (Sm.) Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta lumbschiana Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta macrocyphellata Moncada & Coca: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta maculofuliginosa Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta microcyphellata Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta neolinita Gyeln.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta neopulmonaria Gyeln.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta obvoluta (Sw.) Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta orizabana Nyl.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta papillata Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta parahumboldtii Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta peltigerella (Nyl.) Trevis.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta pseudohumboldtii Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta rhizinata Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta rubropruinosa Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta silverstonii Moncada & Lüking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta sinuosa Pers.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta subcaperata Nyl.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta subscrobiculata (Nyl.) Gyeln.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta tomentella (Nyl.) Nyl.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta tomentosa (Sw.) Ach.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lüking, 2019).

Sticta tunjensis Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta viviana A.Suárez & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Sticta weigelii (Ach.) Vain.: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Stigmatochroma gerontoides (Stirt.) Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Tephromela atra (Huds.) Hafellner: Lecanoraceae → **Tephromelataceae (Lücking, et al., 2017a).**

Tetramelas regiomontanus Marbach: Physciaceae → **Caliciaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Trapelia coarctata (Sm.) M.Choisy: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Trapeliopsis glaucolepida (Nyl.) Gotth.Schneid.: Agyriaceae → **Trapeliaceae (Lücking, et al., 2017a).**

Trichothelium africanum Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium album Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium annulatum (Karst.) R.Sant.: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium bipindense F.Schill.: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium cf. *alboatrum* Vain.: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium epiphyllum Müll.Arg.: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium longisporum Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium minus Vain.: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium minutum (Lücking) Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium montanum Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium pallescens (Müll.Arg.) F.Schill.: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium sipmanii Lücking: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Trichothelium ulei (P.Henn.) Höhnelt: Trichotheliaceae → **Porinaceae (Lücking, et al., 2017a; Lücking, 2019).**

Yoshimuriella corrosa (Ach.) Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Yoshimuriella deplanata (Nyl.) Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Yoshimuriella dissecta (Sw.) Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae (Kraichak, et al., 2018; Lücking, 2019).**

Yoshimuriella fendleri (Mont.& Tuck.) Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Yoshimuriella subdissecta (Nyl.) Moncada & Lücking: Lobariaceae → **Peltigeraceae subfam. Lobarioideae** (Kraichak, *et al.*, 2018; Lücking, 2019).

Parte VI: Errores ortográficos (ejemplos)

Collema leptalaeum Tuck. ≡ *Collema leptaleum* Tuck.

Loflammea epiphylla (Fée) Lücking & Vězda ≡ *Loflammia epiphylla* (Fée) Lücking & Vězda.

Loflammea gabrielis (Müll.Arg.) Vězda ≡ *Loflammia gabrielis* (Müll.Arg.) Vězda.

Pannaria mosigii C.W.Dodge ≡ *Pannaria mosenii* C.W. Dodge.

Pyrenula globulifera (Eschw.) Aptroot ≡ *Pyrenula globifera* (Eschw.) Aptroot.

Trypethelium elutheriae Spreng. ≡ *Trypethelium eluteriae* Spreng.) (este trabajo).

Parte VII: Nombres cuyo material tipo requiere de revisión para evaluar su taxonomía y nomenclatura correcta (32)

Arthothelium xanthocarpum (Nyl.) Zahlbr.

Bacidia fulgidula (Nyl.) Zahlbr.

Bacidia melacheila (Nyl.) Zahlbr.

Byssocaulon ochraceum Nyl.

Caloplaca diducta f. *albicans* (Nyl.) Zahlbr.

Catillaria melaenella (Nyl.) Zahlbr.

Catillaria perminima (Nyl.) Zahlbr.

Chiodecton confundens Vain.

Chiodecton olivaceum Fée

Graphis homographiza Nyl.

Graphis intricata f. *brevior* (Nyl.) Zahlbr.

Graphis striatula f. *elongata* Nyl.

Lecidea mayori Lindau

Lecidea sordidella Nyl. (error ortográfico: *Lecidea sordidula* Nyl.)

Lecidea subsimilis Nyl.

Leptogium tremelloides f. *laciniatum* Tuck.

Leptogium vesiculosum var. *digitatum* Eschw.

Pertusaria tetrathalamia f. *emaciata* Nyl.

Pertusaria tetrathalamia var. *rhodiza* (Nyl.) Müll.Arg.

Phaeographis leucocheila f. *irradiata* (Nyl.) Zahlbr.

Phyllopsora parvifolia var. *fibrillifera* (Nyl.) Müll.Arg.

Polyblastiopsis intrusa (Nyl.) Zahlbr.

Schismatomma leucopsara (Nyl.) Zahlbr.

Stereocaulon meyeri var. *farinosum* (Th.Fr.) I.M.Lamb.

Stereocaulon ramulosum f. *elegans* Th.Fr.

Stereocaulon ramulosum f. *tomentosulum* I.M.Lamb

Stereocaulon ramulosum var. *gracilius* (Müll.Arg.) I.M.Lamb

Stereocaulon strictum var. *compressum* (Nyl.) Vězda

Stereocaulon tomentosum var. *alpestre* Flot.

Stereocaulon vesuvianum var. *efflorescens* (Räs.) I.M.Lamb

Stereocaulon vesuvianum var. *nodulosum* (Wallr.) I.M.Lamb

Thelotrema sphinctrinellum Nyl.

Parte VIII: Nombres excluidos (76)

Amandinea punctata (Hoffm.) Coppins & Scheid.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Architrypethelium uberrimum (Fée) Aptroot [error ortográfico: *Architrypethelium uberinum* (Fée) Aptroot]: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Arthonia oxytera Nyl.: reporte original fue de México, no de Colombia (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016).

Arthopyrenia cerasi (Schrad.) A.Massal.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Bryocaulon divergens (Ach.) Kärnefelt: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Bryoria bicolor (Ehrh.) Brodo & D.Hawksw.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Bunodophoron insigne (Laurer) Wedin: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Caloplaca crocea (Kremp.) Hafellner & Poelt: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cetrelia olivetorum (Nyl.) W.L.Culb. & C.F.Culb.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Chaenotheca furfuracea (L.) Tibell: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Chaenothecopsis debilis (Smith & Sowerby) Tibell: liquenícola (este trabajo).

Chaenothecopsis nivea (F. Wilson) Tibell: liquenícola (este trabajo).

Chaenothecopsis pusilla (Ach.) A.F.W. Schmidt: liquenícola (este trabajo).

Cladina sandstedei (~~des Abb.~~) Ahti [error ortográfico: *Cladina sandstedei* (Abbayes) Ahti ≡ *Cladonia sandstedei* Abbayes): sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladina stellaris (Opiz) Brodo [≡ *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vězda]: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladonia bellidiflora (Ach.) Schaer.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladonia boryi Tuck.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladonia carassensis Vain.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladonia cervicornis (Ach.) Flot.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladonia dilleniana Flörke: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladonia mitis Sandst.: muestra en COL es de Estados Unidos (este trabajo).

Cladonia peltasta (Ach.) Spreng.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

Cladonia phyllophora Hoffm.: sin muestra en COL (**Sipman & Aguirre-C.**, 2016; este trabajo).

- Cladonia portentosa* (Duf.) Coem.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Cladonia pycnoclada* (Pers.) Nyl.: sin muestra para verificar (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Cresponea premnea* (Ach.) Egea & Torrente: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Dibaeis baeomyces* (L.f.) Rambold & Hertel: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Dirinaria palmarum* (Vain.) C.W.Dodge: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Haematomma rufidulum* (Fée) A.Massal.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lecanora albella* (Pers.) Ach.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lecanora allophana* (Ach.) Nyl.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lecanora cenisia* Ach.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lecanora populicola* (DC.) Duby: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lecanora pulicaris* (Pers.) Ach.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lecidea intermediella* Nyl. [= *Phyllopsora intermediella* (Nyl.) Zahlbr.]: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Leptogium saturninum* (Ach.) Nyl.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lobaria pulmonaria* (L.) Hoffm.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Lobaria quercizans* Mich. [= *Ricasolia quercizans* (Michx.) Stizenb.]: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Melaspilea chionographa* (Nyl.) Zahlbr. [= *Melanographa chionographa* (Nyl.) Müll. Arg.]: liquenícola (Ertz & Diederich, 2015, este trabajo).
- Melaspilea diplasiospora* (Nyl.) Müll.Arg. [= *Melanographa diplasiospora* (Nyl.) Müll.Arg.]: liquenícola (Ertz & Diederich, 2015, este trabajo).
- Melaspilea interalbicans* (Nyl.) Müll.Arg. [= *Melanographa interalbicans* (Nyl.) Müll.Arg.]: liquenícola (Ertz & Diederich, 2015, este trabajo).
- Melaspilea myriocarpa* (Fée) Müll.Arg. [= *Melaspilea heterocarpa* (Fée) Müll.Arg.]: liquenícola (Hekking & Sipman, 1988).
- Melaspilea opegraphoides* Nyl.: liquenícola (este trabajo).
- Mycocalicium americanum* (R.Sant.) Tibell: no liquenizado (este trabajo).
- Mycomicrothelia melanospora* (Hepp) D.Hawksw.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Ocellularia interposita* (Nyl.) Hale: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Ochrolechia upsaliensis* (L.) A.Massal.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).
- Opegrapha agelaea* Fée: liquenícola (este trabajo).
- Opegrapha microsema* Nyl.: liquenícola (este trabajo).

Parmeliella thysanota (Stirt.) Zahlbr.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Parmelina tiliacea (Hoffm.) Hale: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Parmotrema pseudoreticulatum (C.Tav.) Hale: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Physcia dilatata Nyl.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Physcia stellaris (L.) Fr.: muestra en COL es de Estados Unidos (este trabajo).

Physcia tribacioides Nyl.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Physcia verrucosa Moberg (muestra en COL no identificable) (este trabajo).

Pseudevernia furfuracea (L.) Zopf: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Pseudocyphellaria faveolata (Delise) Malme: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Pseudoparmelia sphaerospora (Nyl.) Hale: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Pyrenula nitida (Weig.) Ach.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Pyrenula nitidella (Flörke) Müll.Arg.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Pyxine coccifera (Fée) Nyl.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Ramalina farinacea (L.) Ach.: muestra en COL es de Bélgica (este trabajo).

Ramalina siliquosa (Huds.) A.L.Sm.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Roccella fuciformis (L.) DC.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Roccella tinctoria DC.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Schismatomma graphidioides (Leight.) Zahlbr.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Stereocaulon fronduliferum I.M.Lamb: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Stereocaulon verruciferum Nyl.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Thelotrema depressum Mont.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Tricharia leucothrix Fée (Sipman & Aguirre-C., 2016).

Tricharia melanothrix Fée (Sipman & Aguirre-C., 2016).

Usnea florida (L.) Hoffm.: muestra en COL es de Estados Unidos (este trabajo).

Usnea hirta (L.) Hoffm.: sin muestra en COL (Sipman & Aguirre-C., 2016; este trabajo).

Usnea mollis Stirt. [nom. illeg.; ≡ *Usnea fragilescens* var. *mollis* (Vain.) P. Clerc] (Sipman & Aguirre-C., 2016).

Usnea plicata (L.) Wigg. (Sipman & Aguirre-C., 2016).

Información suplementaria

Tabla S1. Catalogo de especies. Vea la tabla S1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1266/2948>

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Jaime Uribe por facilitar el acceso al herbario COL para revisar muestras. Al Dr. Damien Ertz quien confirmó la identificación de *Chiodecton separatum* como *Sclerophyton syncesioidea* y al Dr. Philippe Clerc, quien ayudó en la clarificación de la nomenclatura del nombre *Usnea mollis*. El Dr. Teuvo Ahti confirmó la identificación de material de *Cladonia fimbriata* como *C. subsquamosa*.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron a la recolección de datos. RL, BM y DS revisaron material en COL y RL y HJMS revisaron material en B. RL armó la base de datos y el primer borrador del artículo. Todos los autores revisaron el borrador, contribuyeron con modificaciones y aprobaron la versión final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

References

- Aguirre-C., J. & Rangel-C., J. O.** (2007). Amenazas a la conservación de las especies de musgos y líquenes en Colombia-una aproximación inicial. *Caldasia*. **29**: 235-262.
- Aptroot, A.** (2012). A world key to the species of *Anthracotheicum* and *Pyrenula*. *The Lichenologist*. **44**: 5-53.
- Aptroot, A. & Lücking, R.** (2016). A revisionary synopsis of the Trypetheliaceae (Ascomycota: Trypetheliales). *The Lichenologist*. **48**: 763-982.
- Aptroot, A., Saipunkaew, W., Sipman, H. J. M., Sparrius, L. B. & Wolseley, P. A.** (2007). New lichens from Thailand, mainly microlichens from Chiang Mai. *Fungal Diversity*. **24**: 75-134.
- Aptroot, A., Sparrius, L. B. & Alvarado, P.** (2018). *Aquacidia*, a new genus to accommodate a group of skiophilous temperate *Bacidia* species that belong in the Pilocarpaceae (lichenized ascomycetes). *Gorteria*. **40**: 11-14.
- Arbeláez-Cortés, E.** (2013). Knowledge of Colombian biodiversity: published and indexed. *Biodiversity and Conservation*. **22**: 2875-2906.
- Arup, U., Söchting, U. & Frödén, P.** (2013). A new taxonomy of the family Teloschistaceae. *Nordic Journal of Botany*. **31**: 16-83.
- Awasthi, D. D. & Mathur, R.** (1987). Species of the lichen genera *Bacidia*, *Badimia*, *Fellhanera* and *Mycobilimbia* from India. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Plant Sciences)*. **97**: 481-503.
- Babington, C.** (1857). Lichens. In: Seemann, B. (ed.) *The Botany of the Voyage of H.M.S. Herald, Under the Command of Captain Henry Kellett, R.N., C.B., During the Years 1845-51*. Reeve, London: 246-248.
- Benatti, M. N.** (2014). An update on the genus *Parmelinella* Elix & Hale (Parmeliaceae, lichenized ascomycetes). *Mycosphere*. **5**: 770-789.
- Benítez, Á., Prieto, M., González, Y. & Aragón, G.** (2012). Effects of tropical montane forest disturbance on epiphytic macrolichens. *Science of the Total Environment*. **441**: 169-175.
- Bernal, R., Gradstein, S. R. & Celis, M.** (2015). New names and new combinations for the catalogue of the plants and lichens of Colombia. *Phytoneuron*. **22**: 1-6.
- Bernal, R., Gradstein, S. R. & Celis, M.** (eds.) (2020). *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia*. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Blanco, O., Crespo, A., Divakar, P. K., Elix, J. A. & Lumbsch, H. T.** (2005). Molecular phylogeny of parmotreoid lichens (Ascomycota, Parmeliaceae). *Mycologia*. **97**: 150-159.
- Brako, L.** (1989). Reevaluation of the genus *Phyllopsora* with taxonomic notes and introduction of *Squamacidia*, gen. nov. *Mycotaxon*. **35**: 1-19.
- Breuss, O. & Lücking, R.** (2015). Three new lichen species from Nicaragua, with keys to the known species of *Eugeniella* and *Malmidea*. *The Lichenologist*. **47**: 9-20.
- Bungartz, F., Elix, J. A. & Nash III, T. H.** (2004). The genus *Buellia* sensu lato in the Greater Sonoran Desert Region: saxicolous species with one-septate ascospores containing xanthonenes. *The Bryologist*. **107**: 459-479.

- Cáceres, M. E. S., Rivas Plata, E. & Lücking, R.** (2012). *Malmographina*, a new genus for *Graphina malmei* (Ascomycota: Ostropales: Graphidaceae). *The Lichenologist* **44**: 115-120.
- Cáceres, M. E. S., Aptroot, A., de Oliveira Mendonça, C., dos Santos, L. A. & Lücking, R.** (2017). *Sprucidea*, a further new genus of rain forest lichens in the family Malmideaceae (Ascomycota). *The Bryologist* **120**: 202-212.
- Chuquimarca, L., Gaona, F. P., Iñiguez-Armijos, C. & Benítez, Á.** (2019). Lichen responses to disturbance: clues for Biomonitoring land-use effects on riparian Andean ecosystems. *Diversity* **11** (73): 1-15.
- Clerc, P.** (1987). Systematics of the *Usnea fragilesceus* aggregate and its distribution in Scandinavia. *Nordic Journal of Botany* **7**: 479-495.
- Clerc, P.** (2007). *Usnea*. In: Nash, T. H. III, Gries, C. & Bungartz, F. (eds.) *Lichen Flora of the Greater Sonoran Desert Region*. Volume 3. Lichens Unlimited, Arizona State University, Tempe: 302-335.
- Clerc, P. & Herrera-Campos, M. A.** (1997). Saxicolous species of *Usnea* subgenus *Usnea* (lichenized ascomycetes) in North America. *The Bryologist* **100**: 281-301.
- Coca, L. F., Sanín, D., Posada-Herrera, J. M. & Sierra-Giraldo, J. A.** (2012). Peltigerales (Ascomycetes liquenizados) del bosque alto andino del Parque Nacional Natural Tatamá, Colombia. *Boletín Científico del Centro de Museo de la Universidad* **16**: 60-72.
- de Lange, P. J. & Galloway, D. J.** (2015). Lichen notes from the Kermadec Islands. I. Lobariaceae. *Bulletin of the Auckland Museum*. **20**: 141-170.
- Delise, D.** (1825). *Histoire de Lichens*. Genre *Sticta*. Caen.
- Diederich, P., Ertz, D., Eichler, M., Cezanne, R., van den Boom, P., Fischer, E., Killmann, D., Van den Broeck, D. & Sérusiaux, E.** (2012). New or interesting lichens and lichenicolous fungi from Belgium, Luxembourg and northern France. XIV. *Bulletin de la Société des Naturalistes Luxembourgeois*. **113**: 95-115.
- Divakar, P. K., Crespo, A., Nunez-Zapata, J., Flakus, A., Sipman, H. J. M., Elix, J. A. & Lumbsch, H. T.** (2013). A molecular perspective on generic concepts in the *Hypotrachyna* clade (Parmeliaceae, Ascomycota). *Phytotaxa* **132**: 21-38.
- Dix, W. L.** (1957). Jamaica lichens. Some unreported collections. *The Bryologist* **60**: 154-165.
- Ekman, S., Wedin, M., Lindblom, L. & Jørgensen, P. M.** (2014). Extended phylogeny and a revised generic classification of the Pannariaceae (Peltigerales, Ascomycota). *The Lichenologist* **46**: 627-656.
- Ertz, D.** (2018). New combinations in *Ancistrosporella* (Roccellaceae, Arthoniales). *Phytotaxa* **379**: 271-273.
- Ertz, D. & Diederich, P.** (2015). Dismantling Melaspileaceae: a first phylogenetic study of *Buelliella*, *Hemigrapha*, *Karschia*, *Labrocarpon* and *Melaspilea*. *Fungal Diversity* **71**: 141-164.
- Ertz, D. & Tehler, A.** (2011). The phylogeny of Arthoniales (Pezizomycotina) inferred from nuLSU and RPB2 sequences. *Fungal Diversity* **49**: 47-71.
- Ertz, D., Miadlikowska, J., Lutzoni, F., Dessein, S., Raspé, O., Vigneron, N., Hofstetter, V. & Diederich, P.** (2009). Towards a new classification of the Arthoniales (Ascomycota) based on a three-gene phylogeny focussing on the genus *Opegrapha*. *Mycological Research*. **113**: 141-152.
- Esslinger, T. L.** (2016). A cumulative checklist for the lichen-forming, lichenicolous and allied fungi of the continental United States and Canada, Version 21. *Opuscula Philolichenum* **15**: 136-390.
- Fée, A. L. A.** (1825). *Essai sur les Cryptogames des Écorces Exotiques Officinales*. Didot, Paris.
- Frisch, A. & Thor, G.** (2010). *Cryphonia*, a new genus of byssoid Arthoniaceae (lichenised Ascomycota). *Mycological Progress* **9**: 281-303.
- Frisch, A., Thor, G., Ertz, D. & Grube, M.** (2014). The Arthoniale challenge: restructuring Arthoniaceae. *Taxon* **63**: 727-744.
- Galloway, D. J.** (1998). Studies on the lichen genus *Sticta* (Schreber) Ach.: V. Australian species. *Tropical Bryology* **15**: 117-160.
- Galloway, D. J. & de Lange, P. J.** (2017). Nomenclatural novelties. *Index Fungorum*. **340**: 1.
- Galloway, D. J. & Guzmán-Grimaldi, G.** (1988). A new species of *Phlyctis* from Chile. *The Lichenologist* **20**: 393-397.
- Gerlach, A. C. L., Silveira, R. M. B. & Clerc, P.** (2019). *Usnea oreophila* (Parmeliaceae), a new saxicolous species from the mountains of Brazil. *The Bryologist* **122**: 122-129.
- Greuter, W. & Rankin-Rodríguez, R.** (2018). Código Internacional de Nomenclatura para Algas, Hongos y Plantas (Código de Shenzhen). *Occasional Papers from the Herbarium Greuter* **4**: i-liii, 1-322.

- Hafellner, J. & Türk, R.** (2016). Die lichenisierten Pilze Österreichs – Eine neue Checkliste der bisher nachgewiesenen Taxa mit Angaben zu Verbreitung und Substratökologie [The lichenized fungi of Austria – A new checklist of the taxa so far recorded, with data to distribution and substrate ecology]. *Stapfia*. **104**: 1-216.
- Hawksworth, D. L., James, P. W. & Coppins, B. J.** (1980). Checklist of British lichen-forming, lichenicolous and allied fungi. *The Lichenologist* **12**: 1-115.
- Hekking, W. H. A. & Sipman, H. J. M.** (1988). The lichens reported from the Guianas before 1987. *Willdenowia* **17**: 193-228.
- Herrera-V., L. J., Sipman, H. J. M. & Gutiérrez-S., M. C.** (2014). A remarkable Cladoniaceae flora at subandean region in Chámeza (Casanare, Colombia). *Caldasia*. **36**: 231-238.
- Hertel, H.** (1974). Krustenflechten aus Venezuela. *Mitteilungen der Botanischen Staatssammlung München*. **11**: 405-430.
- Hodkinson, B. P., Moncada, B. & Lücking, R.** (2014). Lepidostromatales, a new order of lichenized fungi (Basidiomycota, Agaricomycetes), with two new genera, *Ertzia* and *Sulzbacheromyces*, and one new species, *Lepidostroma winklerianum*. *Fungal Diversity* **64**: 165-179.
- Hooker, W. J.** (1834). Supplement to the English Botany of the Late Sir J. E. Smith and Mr. Sowerby: The Descriptions, Synonyms, and Places of Growth. Vol. II. Taylor, London.
- Imshaug, H. A.** (1956). Catalogue of Central American lichens. *The Bryologist* **59**: 69-114.
- Index Fungorum** (2020). Index Fungorum. <http://www.indexfungorum.org/Names/Names.asp>.
- Jiang, S. H., Lücking, R., Xavier-Leite, A. B., Cáceres, M. E. S., Aptroot, A., Portilla, C. V. & Wei, J. C.** (2020). Reallocation of foliicolous species of the genus *Strigula* into six genera (lichenized Ascomycota, Dothideomycetes, Strigulaceae). *Fungal Diversity*. <https://doi.org/10.1007/s13225-020-00445-7>
- Kalb, K.** (1987). Brasilianische Flechten. 1. Die Gattung *Pyxine*. *Bibliotheca Lichenologica*. **24**: 1-89.
- Kalb, K. & Vězda, A.** (1987). Einige nicht-foliicole Arten der Familie Ectolechiaceae (Lichenes) aus Brasilien. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica* **22**: 287-312.
- Kalb, J., Lücking, R. & Kalb, K.** (2018). The lichen genera *Allographa* and *Graphis* (Ascomycota: Ostropales, Graphidaceae) in Thailand – eleven new species, forty-nine new records and a key to all one hundred and sixteen species so far recorded for the country. *Phytotaxa*. **377**: 1-83.
- Kantvilas, G.** (2009). The genus *Mycoblastus* in the cool temperate Southern Hemisphere, with special reference to Tasmania. *The Lichenologist* **41**: 151-178.
- Kistenich, S., Tindal, E., Bendiksby, M. & Ekman, S.** (2018). Molecular systematics and character evolution in the lichen family Ramalinaceae (Ascomycota: Lecanorales). *Taxon* **67**: 871-904.
- Kistenich, S., Bendiksby, M., Ekman, S., Cáceres, M. E. S. & Tindal, E.** (2019). Towards an integrative taxonomy of *Phyllopsora* (Ramalinaceae). *The Lichenologist* **51**: 323-392.
- Kitaura, M. J. & Marcelli, M. P.** (2012). O grupo de *Leptogium japonicum* (Collemataceae). In: Kitaura, M. J. *Estudos taxonômicos de Leptogium* (Ach.) S.F. Gray (Collemataceae, fungos liquenizados). Tese (doutorado), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Botucatu: 102-116.
- Kondratyuk, S. Y., Jeong, M.-H., Yu, N.-N., Kärnefelt, I., Thell, A., Elix, J., Kim, J., Kondratiuk, A. & Hur, J.-S.** (2013). Four new genera of teloschistoid lichens (Teloschistaceae, Ascomycota) based on molecular phylogeny. *Acta Botanica Hungarica* **55**: 251-274.
- Kondratyuk, S. Y., Jeong, M.-H., Yu, N.-N., Kärnefelt, I., Thell, A., Elix, J. A., Kim, J., Kondratiuk, A. & Hur, J.-S.** (2014). A revised taxonomy for the subfamily Caloplacoideae (Teloschistaceae, Ascomycota) based on molecular phylogeny. *Acta Botanica Hungarica*. **56**: 93-123.
- Kraichak, E., Huang, J. P., Nelsen, M. P., Leavitt, S. D. & Lumbsch, H. T.** (2018). A revised classification of orders and families in the two major subclasses of Lecanoromycetes (Ascomycota) based on a temporal approach. *Botanical Journal of the Linnean Society*. **188**: 233-249.
- Krempelhuber, A. von** (1878). Lichenes collecti in republica Argentina a Doctoribus Lorentz et Hieronymus determinati et descripti a Doct. A.. de Krempelhuber, Monacensi (Continuatio). *Flora*. **61**: 492-496.
- Lendemer, J. C. & Hodkinson, B. P.** (2012). Recognition of the *Parmelia crozalsiana* group as the genus *Crespoa*. *North American Fungi* **7**: 1-5.
- Lendemer, J. C. & Hodkinson, B. P.** (2013). A radical shift in the taxonomy of *Lepraria* sl: molecular and morphological studies shed new light on the evolution of asexuality and lichen growth form diversification. *Mycologia* **105**: 994-1018.
- Lücking, R.** (2007). *Kalbographa*: Monografie einer unerkannten Flechtengattung. *Bibliotheca Lichenologica*. **96**: 185-192.

- Lücking, R. (2008). Foliicolous lichenized fungi. *Flora Neotropica Monograph*. **103**: 1-867.
- Lücking, R. (2009). The taxonomy of the genus *Graphis* sensu Staiger (Ascomycota: Ostropales: Graphidaceae). *The Lichenologist*. **41**: 319-362.
- Lücking, R. (2013). *Platygrapha permutans* Nyl. is an earlier name for *Byssoloma rubrireagens* Kalb & Vězda. *The Lichenologist* **45**: 579-580.
- Lücking, R. (2015a). Thelotremoid Graphidaceae from the NYBG herbarium: New species, range extensions, and a forgotten lichen. *Opuscula Philolichenum*. **14**: 1-57.
- Lücking, R. (2015b). Erratum: Valid publications of two combinations invalidly published in *Opuscula Philolichenum* 14: 1-57. *Opuscula Philolichenum*. **14**: 58.
- Lücking, R. (2019). Stop the abuse of time! A critical review of temporal banding for rank-based classifications in Fungi (including lichens) and other organisms. *Critical Review in Plant Sciences*. **38**: 199-253.
- Lücking, R. & Kalb, K. (2018). Formal instatement of *Allographa* (Graphidaceae): how to deal with a hyperdiverse genus complex with cryptic differentiation and paucity of molecular data. *Herzogia*. **31**: 525-561.
- Lücking, R. & Moncada, B. (2017). Dismantling *Marchandiomphalina* into *Agonimia* (Verrucariaceae) and *Lawreymyces* gen. nov. (Corticaceae): setting a precedent to the formal recognition of thousands of voucherless fungi based on type sequences. *Fungal Diversity* **84**: 119-138.
- Lücking, R. & Pérez-Ortega, S. (2015). Four new species of *Ocellularia* (lichenized Ascomycota: Graphidaceae) from Cuba, with a revised taxonomy of the *O. bahiana* complex and a key to thelotremoid taxa with small, brown, (sub-)muriform ascospores. *The Lichenologist*. **47**: 305-322.
- Lücking, R. & Rivas Plata, E. (2008). Clave y guía ilustrada para géneros de Graphidaceae. *Glalia*. **1**: 1-41.
- Lücking, R., Chaves, J. L., Sipman, H. J. M., Umaña, L. & Aptroot, A. (2008). A first assessment of the Ticolichen Biodiversity Inventory in Costa Rica: the genus *Graphis*, with notes on the genus *Hemithecium* (Ascomycota: Ostropales: Graphidaceae). *Fieldiana (Botany), New Series*. **46**: 1-131.
- Lücking, R., Archer, A. W. & Aptroot, A. (2009). A world-wide key to the genus *Graphis* (Ostropales: Graphidaceae). *The Lichenologist*. **41**: 363-452.
- Lücking, R., Dal-Forno, M., Lawrey, J. D., Bungartz, F., Rojas, M. E. H., Marcelli, M. P., Moncada, B., Morales, E. A., Nelsen, M. P., Salcedo, L. & Spielmann, A. A. (2013). Ten new species of lichenized Basidiomycota in the genera *Dictyonema* and *Cora* (Agaricales: Hygrophoraceae), with a key to all accepted genera and species in the *Dictyonema* clade. *Phytotaxa* **139**: 1-38.
- Lücking, R., Mangold, A., Rivas Plata, E., Parnmen, S., Kraichak, E. & Lumbsch, H. T. (2015). Morphology-based phylogenetic binning to assess a taxonomic challenge: a case study in Graphidaceae (Ascomycota) requires a new generic name for the widespread *Leptotrema wightii*. *Botanical Journal of the Linnean Society*. **436**: 436-443.
- Lücking, R., Hodkinson, B.P. & Leavitt, S.D. (2017a). [‘2016’] The 2016 classification of lichenized fungi in the Ascomycota and Basidiomycota – Approaching one thousand genera. *The Bryologist*. **119**: 361-416.
- Lücking, R., Moncada, B., McCune, B., Farkas, E. E., Goffinet, B., Parker, D., Chaves, J. L., Lőkös, L., Nelson, P. R., Spribille, T., Stenroos, S., Wheeler, T., Yanez-Ayabaca, A., Dillman, K., Gockman, O. T., Goward, T., Hollinger, J., Tripp, E. A., Villella, J., Álvaro-Alba, W. R., Arango, C. J., Cáceres, M. E. S., Coca, L. F., Printzen, C., Rodríguez, C., Scharnagl, K., Rozzi, R., Soto-Medina, E. & Yakovchenko, L. S. (2017b). *Pseudocyphellaria crocata* (Ascomycota: Lobariaceae) in the Americas reveals to be ten species, and none of them is *Pseudocyphellaria crocata*. *The Bryologist*. **120**: 441-500.
- Lücking, R., Moncada, B., Llerena, N. & Huhtinen, S. (2018). Saving the name *Lobaria peltigera* with new authorship and a new type from the TUR-Vainio herbarium, and its transfer to the genus *Yoshimuriella*. *Graphis Scripta*. **30**: 12-19.
- Lumbsch, H.T., Ahti, T., Altermann, S., Amo De Paz, G., Aptroot, A., Arup, U., Bárcenas Peña, A., Bawingan, P. A., Benatti, M.N., Betancourt, L., Björk, C. R., Boonpragob, K., Brand, M., Bungartz, F., Cáceres, M. E. S., Candan, M., Chaves, J. L., Clerc, P., Common, R., Coppins, B. J., Crespo, A., Dal Forno, M., Divakar, P. K., Duya, M. V., Elix, J.A., Elvebakk, A., Fankhauser, J. D., Farkas, E., Ferraro, L. I., Fischer, E., Galloway, D. J., Gaya, E., Giralt, M., Goward, T., Grube, M., Hafellner, J., Hernández M., J. E., Herrera Campos, M. A., Kalb, K., Kärnefelt, I., Kantvilas, G., Killmann, D., Kirika, P., Knudsen, K., Komposch, H., Kondratyuk, S., Lawrey, J. D., Mangold, A., Marcelli,

- M. P., Mccune, B., Ines Messuti, M., Michlig, A., Miranda González, R., Moncada, B., Naikatiní, A., Nelsen, M. P., Øvstedal, D. O., Palice, Z., Papong, K., Parnmen, S., Pérez-Ortega, S., Printzen, C., Rico, V. J., Rivas Plata, E., Robayo, J., Rosabal, D., Ruprecht, U., Salazar Allen, N., Sancho, L., Santos De Jesus, L., Santos Vieira, T., Schultz, M., Seaward, M. R. D., Sérusiaux, E., Schmitt, I., Sipman, H. J. M., Sohrabi, M., Søchting, U., Zeuthen Søgaaard, M., Sparrius, L. B., Spielmann, A., Spribille, T., Sutjaritturan, J., Thammathaworn, A., Thell, A., Thor, G., Thüs, H., Tindal, E., Truong, C., Türk, R., Umaña Tenorio, L., Upreti, D. K., Van Den Boom, P., Vivas Rebuella, M., Wedin, M., Will-Wolf, S., Wirth, V., Wirtz, N., Yahr, R., Yeshitela, K., Ziemmeck, F., Wheeler, T. & Lücking, R. (2011). One hundred new species of lichenized fungi: a signature of undiscovered global diversity. *Phytotaxa* **18**: 1-127.
- Marbach, B. (2000). Corticole und lignicole Arten der Flechtengattung *Buellia* sensu lato in den Subtropen und Tropen. *Bibliotheca Lichenologica* **74**: 1-384.
- Marcano, V., Morales-Méndez, A., Sipman, H. J. M. & Calderon, L. (1996). A first checklist of the lichen-forming fungi of the Venezuelan Andes. *Tropical Bryology* **12**: 193-235.
- Medeiros, I. D., Kraichak, E., Lücking, R., Mangold, A. & Lumbsch, H. T. (2017). Assembling a taxonomic monograph of tribe Wirthiotremateae (lichenized Ascomycota: Ostropales: Graphidaceae). *Fieldiana Life and Earth Sciences* **9** (1): 1-31.
- Miranda-González, R., Lücking, R., Barcenás-Peña, A. & Herrera-Campos, M. A. (2020). The new genus *Jocatoa* (Lecanoromycetes: Graphidaceae) and new insights into subfamily Redonographoideae. *The Bryologist* **123**: 127-143.
- Moberg, R. (1990). The lichen genus *Physcia* in Central and South America. *Nordic Journal of Botany* **10**: 319-342.
- Moncada, B. (2012). El género *Sticta* (Schreb.) Ach. en Colombia: Taxonomía, Ecogeografía e Importancia. Doctoral Dissertation, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Moncada, B., Lücking, R. & Coca, L. F. (2013). Six new apotheciate species of *Sticta* (lichenized Ascomycota: Lobariaceae) from the Colombian Andes. *The Lichenologist* **45**: 635-656.
- Moncada, B., Lücking, R. & Lumbsch, H. T. (2020). Rewriting the evolutionary history of the lichen genus *Sticta* (Ascomycota: Peltigeraceae subfam. Lobarioideae) in the Hawaiian islands. *Plant and Fungal Systematics* **65**: 95-119.
- Mongkolsuk, P., Meesim, S., Poengsungnoen, V., Buaruang, K., Schumm, F. & Kalb, K. (2015). The lichen family Physciaceae in Thailand - II. Contributions to the genus *Heterodermia* sensu lato. *Phytotaxa* **235**: 1-66.
- Muggia, L., Nelson, P., Wheeler, T., Yakovchenko, L. S., Tønsberg, T. & Spribille, T. (2011). Convergent evolution of a symbiotic duet: the case of the lichen genus *Polychidium* (Peltigerales, Ascomycota). *American Journal of Botany* **98**: 1647-1656.
- Müller, J. (1880). Lichenologische Beiträge, XI. Schluss. *Flora* **63**: 275-290.
- Müller, J. (1882). Lichenologische Beiträge, XVI. Fortsetzung. *Flora* **65**: 499-505.
- Müller, J. (1891). Lichenes Catharinenses a cl. E. Ule in Brasilia prov. Santa Catharina lecti. *Hedwigia* **30**: 235-243.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., da Fonseca, G. A. B. & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* **403**: 853-858.
- Neuwirth, G. & Aptroot, A. (2011). Recognition of four morphologically distinct species in the *Graphis scripta* complex in Europe. *Herzogia* **24**: 207-231.
- Nylander, W. (1857). Énumération générale des lichens, avec l'indication sommaire de leur distribution géographique. *Mémoires de la Société des Sciences Naturelles de Cherbourg* **5**: 85-146.
- Nylander, W. (1858). *Synopsis Methodica Lichenum*. Martinet, Paris.
- Nylander, W. (1863a). *Lichenographiae Novo-Granatensis Prodrum*. *Acta Societatis Scientiarum Fennicae* **7**: 415-504.
- Nylander, W. (1863b). Lichenes. In: Triana, J. & Planchon, J. E. *Prodrum Florae Novo-Granatensis ou Énumération des plantes de la Nouvelle-Grenade avec description des espèces nouvelles*. *Annales des Sciences Naturelles* **19**: 286-382.
- Nylander, W. (1867). Lichenes, additamentum. In: Triana, J. & Planchon, J. E. *Prodrum Florae Novo-Granatensis*. *Annales des Sciences Naturelles* **7**: 301-354.
- Oberwinkler, F. (1984). Fungus-alga interactions in basidiolichens. *Beiheft zur Nova Hedwigia* **79**: 739-774.
- Otálora, M. A., Jørgensen, P. M. & Wedin, M. (2014). A revised generic classification of the jelly lichens, Collemataceae. *Fungal Diversity* **64**: 275-293.
- Pant, G. & Upreti, D. K. (1993). The lichen genus *Diploschistes* in India and Nepal. *The Lichenologist* **25**: 33-50.

- Papong, K., Thammathaworn, A. & Boonpragob, K.** (2008). *Rolueckia* (Ostropales: Gomphillaceae), a new genus of foliicolous lichens. *Nova Hedwigia*. **86**: 201-208.
- Parnmen, S., Lücking, R. & Lumbsch, H. T.** (2012). Phylogenetic classification at generic level in the absence of distinct phylogenetic patterns of phenotypical variation: a case study in Graphidaceae (Ascomycota). *PLoS One*. **7**(12): e51392.
- Petersen, R. H.** (1967). Notes on clavarioid fungi. VII. Redefinition of the *Clavaria vernalis*-*C. mucida* complex. *American Midland Naturalist*. **77**: 205-221.
- Resl, P., Schneider, K., Westberg, M., Printzen, C., Palice, Z., Thor, G., Fryday, A., Mayrhofer, H. & Spribille, T.** (2015). Diagnostics for a troubled backbone: testing topological hypotheses of trapelioid lichenized fungi in a large-scale phylogeny of Ostropomycetidae (Lecanoromycetes). *Fungal Diversity* **73**: 239-258.
- Rivas Plata, E., Lücking, R., Sipman, H. J. M., Mangold, A., Kalb, K. & Lumbsch, H. T.** (2010). A world-wide key to the thelotremoid Graphidaceae, excluding the *Ocellularia-Myriotrema-Stegobolus* clade. *The Lichenologist*. **42**: 187-189.
- Rivas Plata, E., Mason-Gamer, R., Ashley, M., Lücking, R. & Lumbsch, H. T.** (2012). Molecular phylogeny and systematics of the *Ocellularia*-clade (Ascomycota: Ostropales: Graphidaceae). *Taxon*. **61**: 1161-1179.
- Roemer, J., Nash, T. H. III, Lumbsch, H. T. & Messuti, M. I.** (2004). *Ochrolechia*. In: Nash, T. H. III, Ryan, B. D., Diederich, P., Gries, C. & Bungartz, F. (eds.): *Lichen Flora of the Greater Sonoran Desert Region, Vol. 2. Lichens Unlimited*, Arizona State University, Tempe, Arizona, pp. 381-387.
- Schmitt, I., Otte, J., Parnmen, S., Sadowska-Deś, A., Lücking, R. & Lumbsch, H. T.** (2012). A new circumscription of the genus *Varicellaria* (Pertusariales, Ascomycota). *MycKeys* **4**: 23-36.
- Simon, A., Lücking, R., Moncada, B., Mercado-Díaz, J. A., Bungartz, F., Cáceres, M. E. S., Gumboski, E. L., Martins, S. M. A., Spielmann, A. A., Parker, D. & Goffinet, B.** (2020). *Emmanuelia*, a new genus of lobarioid lichen-forming fungi (Ascomycota: Peltigerales): phylogeny and synopsis of accepted species. *Plant and Fungal Systematics*. **65**: 76-94.
- Singh, K. P. & Swarnalatha, G.** (2009). Some new combinations in lichen family Graphidaceae. *Indian Journal of Forestry*. **32**: 179-180.
- Singh, G., Aptroot, A., Rico, V. J., Otte, J., Divakar, P. K., Crespo, A., Cáceres, M. E. S., Lumbsch, H. T. & Schmitt, I.** (2018). *Neoprotoparmelia* gen. nov. and *Maronina* (Lecanorales, Protoperarmelioidae): species description and generic delimitation using DNA barcodes and phenotypical characters. *MycKeys*. **44**: 19-50.
- Sipman, H. J. M.** (1994). New Graphidales (lichenized Ascomycotina) from the Guianas and nearby areas [Studies on the Flora of the Guianas no. 79]. *Acta Botanica Fennica*. **150**: 165-172.
- Sipman, H. J. M.** (1997). *Lichenotheca Latinoamericana a museo botanico berlinensi edita, fasciculum tertium*. *Willdenowia* **27**: 273-280.
- Sipman, H. J. M. & Aguirre-C., J.** (2016). Líquenes. In: Bernal, R., Gradstein, S. R. & Celis, M. *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia. Volumen 1*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Naturales, Bogotá: 159-281.
- Sipman, H. J. M. & Wolf, J. H.** (1998). Provisional checklist for the lichens of Chiapas. *Acta Botánica Mexicana* **45**: 1-29.
- Spribille, T., Klug, B. & Mayrhofer, H.** (2011). A phylogenetic analysis of the boreal lichen *Mycoblastus sanguinarius* (Mycoblastaceae, lichenized Ascomycota) reveals cryptic clades correlated with fatty acid profiles. *Molecular Phylogenetics and Evolution* **59**: 603-614.
- Staiger, B.** (2002). Die Flechtenfamilie Graphidaceae. Studien in Richtung einer natürlicheren Gliederung. *Bibliotheca Lichenologica*. **85**: 1-526.
- Staiger, B. & Kalb, K.** (1995). *Haematomma*-Studien. I. Die Flechtengattung *Haematomma*. *Bibliotheca Lichenologica*. **59**: 1-198.
- Stenroos, S., Pino-Bodas, R., Hyvönen, J., Lumbsch, H. T. & Ahti, T.** (2019a). Phylogeny of the family Cladoniaceae (Lecanoromycetes, Ascomycota) based on sequences of multiple loci. *Cladistics*. **35**: 351-384.
- Stenroos, S., Pino-Bodas, R. & Ahti, T.** (2019b). *Rexiella*, a new name for *Rexia* S. Stenroos, Pino-Bodas & Ahti (2018), non *Rexia* D. A. Casamatta, S. R. Gomez & J. R. Johansen (2006). *Cladistics*. **35**: 603.
- Swinscow, T. D. V. & Krog, H.** (1981). The genus *Phyllopsora*, with a report on the East African species. *The Lichenologist*. **13**: 203-247.
- Tehler, A.** (1990). A new approach to the phylogeny of Euascomycetes with a cladistic outline of Arthoniales focussing on Roccellaceae. *Canadian Journal of Botany* **68**: 2458-2492.

- Thor, G.** (1988). *Caloplaca lucifuga*: a new lichen species from Europe. *The Lichenologist* **20**: 175-178.
- Timdal, E.** (2010). Recent literature on lichens: web services and further developments. *Bibliotheca Lichenologica* **105**: 43-45.
- Truong, C., Bungartz, F. & Clerc, P.** (2011). The lichen genus *Usnea* (Parmeliaceae) in the tropical Andes and the Galapagos: species with a red-orange cortical or subcortical pigmentation. *The Bryologist* **114**: 477-504.
- Truong, C., Rodríguez, J. M. & Clerc, P.** (2013). Pendulous *Usnea* species (Parmeliaceae, lichenized Ascomycota) in tropical South America and the Galapagos. *The Lichenologist* **45**: 505-543.
- 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.** (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]. Koeltz Botanical Books, Oberreifenberg.
- Van den Broeck, D., Frisch, A., Razafindrahaja, T., Van de Vijver, B. & Ertz, D.** (2018). Phylogenetic position of *Synarthonia* (lichenized Ascomycota, Arthoniaceae), with the description of six new species. *Plant Ecology and Evolution* **151**: 327-351.
- Vondrák, J., Frolov, I., Davydov, E. A., Urbanavichene, I., Chesnokov, S., Zhdanov, I., Muchnik, E., Konoreva, L., Himelbrant, D. & Tchabanenko, S.** (2016). The extensive geographical range of several species of Teloschistaceae: evidence from Russia. *The Lichenologist* **48**: 171-189.
- Wei, X., Schmitt, I., Hodkinson, B., Flakus, A., Kukwa, M., Divakar, P. K., Kirika, P. M., Otte, J., Meiser, A. & Lumbsch, H. T.** (2017). Circumscription of the genus *Lepra*, a recently resurrected genus to accommodate the “*Variolaria*”-group of *Pertusaria* sensu lato (Pertusariales, Ascomycota). *PLoS One* **12** (7): e0180284.
- Wetmore, C. M.** (2007). Notes on *Caloplaca cerina* (Teloschistaceae) in North and Central America. *The Bryologist* **110**: 798-807.
- Wilson, F. F. M.** (1889). An additional list of lichens new to Victoria. *The Victorian Naturalist*. **6**: 60-69.
- Zahlbruckner, A.** (1932). *Catalogus Lichenum Universalis*, Band VIII. Borntraeger, Leipzig.
- Zhao, X., Leavitt, S. D., Zhao, Z. T., Zhang, L. L., Arup, U., Grube, M., Pérez-Ortega, S., Printzen, C., Śliwa, L., Kraichak, E. & Divakar, P. K.** (2016). Towards a revised generic classification of lecanoroid lichens (Lecanoraceae, Ascomycota) based on molecular, morphological and chemical evidence. *Fungal Diversity* **78**: 293-304.

Artículo original

Caracterización florística y estructural como línea de base para la restauración ecológica de bosques en la microcuenca del río Barbas, Colombia

Floristic and structural characterization as a baseline for ecological restoration processes in the Río Barbas watershed, Colombia

Clara Eugenia Roa-García^{1*}, Alba Marina Torres-González²

¹ Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira, Palmira, Colombia

² Universidad del Valle, Departamento de Biología, Cali, Colombia

Resumen

Se hizo la caracterización florística del bosque de la microcuenca del río Barbas, zona de amortiguamiento del Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen, Risaralda, Colombia, con el fin de seleccionar especies para iniciar procesos regionales de restauración ecológica. Se utilizó el método de muestreo de Gentry estableciendo 10 transectos de 50 m de longitud y 2 m de ancho. Con base en información secundaria, se documentó el estado sucesional, el mecanismo de dispersión, el estado de conservación y los usos antrópicos. Las familias con mayor riqueza fueron Rubiaceae (13), Melastomataceae (10) y Lauraceae (5). La riqueza de especies (62) se concentró en las clases diamétricas y altimétricas inferiores (<8,3 cm y <17 m, respectivamente). Ocho de las especies sumaron el 50 % del índice de valor de importancia (IVI) y se registraron 33 especies por fuera del muestreo para un total de 95. Una gran proporción de las especies correspondió a sucesionales tardías (54,7 %) y un alto porcentaje a especies dispersadas por animales (83 %); por otra parte, se encontraron 11 especies en alguna categoría de amenaza a nivel regional. Con respecto a los usos, la mayoría de las especies se puede emplear en la protección de cauces. Con base en la cuantificación de sus características, se seleccionaron seis especies pioneras y siete sucesionales tardías para iniciar procesos de restauración ecológica. El bosque es fuente natural de semillas para una de las especies recomendadas, *Wettinia kalbreyeri*, cuyo IVI es alto. En conclusión, el bosque se encuentra en una sucesión avanzada y es un reservorio de especies con características ideales para hacer restauración ecológica.

Palabras clave: Bosque andino; Estado sucesional; Especies pioneras; Especies sucesionales tardías; Usos antrópicos; Protección de cauces; Dispersión.

Abstract

We made the floristic characterization of the Barbas watershed forest, buffer zone of the Barbas-Bremen Soil Conservation District (Risaralda, Colombia), to select species to begin regional ecological restoration processes. We used the Gentry sampling method establishing ten transects of 50x2 m each. We documented the successional status, dispersal mechanism, conservation status, and anthropic uses of species based on secondary information. The families with the highest species richness were Rubiaceae (13), Melastomataceae (10), and Lauraceae (5). Species richness (62) concentrated in the lower diameter (<8.3 cm) and lower tree height (<17 m) classes. Eight of the species added up to 50% of the Importance Value Index (IVI). Additionally, 33 species were recorded outside the sampling design, for a total of 95 registered species. Among the species there was a large proportion of late successional (54.7%) and a high percentage of species dispersed by animals (83%); on the other hand, 11 of the species have been classified in some threat category at the regional level. Regarding uses, a high percentage of species can be utilized in the protection of riverbeds. Based on the number of characteristics, six pioneer and seven late-successional species

Citación: Roa-García CE, Torres-González AM. Caracterización florística y estructural como línea de base para la restauración ecológica de bosques en la microcuenca del río Barbas, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):190-207, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1167>

Editor: Carolina Romero-Hernández

***Correspondencia:**

Clara Eugenia Roa-García;
clroag@unal.edu.co

Recibido: 11 de marzo de 2020

Aceptado: 13 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

were selected to begin ecological restoration processes. This forest is a natural source of seeds for one of the recommended species, *Wettinia kalbreyeri*, with a high IVI value. In conclusion, the forest is in an advanced stage of succession and constitutes a reservoir of species with ideal characteristics for ecological restoration.

Keywords: Andean forest; Successional state; Pioneer species; Late successional species; Anthropogenic uses; Riverbed protection; Dispersal.

Introducción

El uso del suelo en los Andes cambió drásticamente desde la introducción del ganado por los españoles en el siglo XVI (Armenteras, *et al.*, 2011). Buena parte de la vegetación natural de humedales, páramos y bosques andinos se ha convertido en potreros para ganado y campos de cultivos (Etter & Villa, 2000; Armenteras, *et al.*, 2003) y en el 2000 se reportó que menos del 40 % de la vegetación natural de los ecosistemas andinos continuaba sin intervención antrópica (Rodríguez, *et al.*, 2006).

El uso del suelo más adecuado en la región andina son los bosques, y se estima que el 68 % del área debería tener cobertura boscosa; sin embargo, en 1984 solo el 26 % permanecía cubierta por bosques (Inderena, *et al.*, 1984). Esta tendencia de disminución del área boscosa de los Andes no se ha detenido; entre 1985 y 2005 la cobertura de bosque disminuyó en un 13 % (Armenteras, *et al.*, 2011). En años recientes, 2015 y 2016, las áreas deforestadas en los Andes colombianos fueron de 29.263 y 45.606 ha, respectivamente (IDEAM, 2017), y en el 2017 los Andes constituían la segunda región del país con mayor área deforestada después de la Amazonía (IDEAM, 2018). Otros estudios señalan, sin embargo, una tendencia al incremento de la vegetación boscosa, particularmente en el área andina (Sánchez-Cuervo, *et al.*, 2012; Calbi, *et al.*, 2020), lo que se explicaría por el abandono de sistemas productivos, procesos de globalización que han promovido la migración del campo a la ciudad (Aide & Grau, 2004) y el establecimiento de áreas protegidas (Calbi, *et al.*, 2020).

El bosque primario de los territorios de los departamentos de Caldas y Quindío posiblemente fue explotado entre principios del siglo XIX y el siglo XX, con el asentamiento de colonos provenientes de Antioquia que comenzaron su desplazamiento a finales del siglo XVIII (Londoño, 2002). La comercialización de productos artesanales de origen natural, la construcción de infraestructura como ferrocarriles, puentes, viviendas, montajes agropecuarios (establos, caballerizas, uso de postes para aislamientos) y la necesidad de abrir vías que conectaran la zona sur del país con el norte, expandieron la frontera agrícola y fragmentaron el bosque primario. Los fragmentos poco intervenidos quedaron en regiones aisladas que por su difícil acceso o por su topografía representaban baja o nula utilidad en actividades de producción (Muñoz, 1985). Las áreas de bosque taladas cambiaron de uso y se volvieron tierras de cultivos, principalmente de café, potreros para ganado vacuno y plantaciones forestales para la industria papelera (ACCCR, 2011).

La restauración ecológica busca revertir la tendencia de deforestación mediante el restablecimiento de los ecosistemas (Murcia & Guariguata, 2014). En los Andes colombianos se ha hecho un esfuerzo por restaurar los ecosistemas de bosques afectados por el cambio del uso del suelo. Por ejemplo, se han hecho procesos de restauración asistida en los cerros orientales de Bogotá (Rojas-B., 2017) y en el Parque Nacional Natural Las Orquídeas en Antioquia (Turbay, *et al.*, 2013), y no asistida en áreas protegidas en Boyacá (Fernández-M., *et al.*, 2016). Sin embargo, la restauración en Colombia aún presenta dificultades metodológicas, entre ellas, la selección del ecosistema de referencia y la del material biológico (Murcia & Guariguata, 2014). En muchos casos la selección del material de siembra se basa en la disponibilidad en viveros y no en la escogencia de especies por su importancia ecológica, por tener algún grado de amenaza, o por ser propias del ecosistema a restaurar (Murcia & Guariguata, 2014), lo que, por lo demás, no ha ocurrido solo en proyectos de Colombia sino en otros países de la región debido a criterios de selección de las especies insuficientes (Sánchez, *et al.*, 2005), pues el propósito principal

ha sido reforestar un área o retener el suelo y frenar la erosión, pero sin considerar que las interacciones entre las múltiples especies nativas son las que dan a los ecosistemas sus características de composición, estructura, función, adaptabilidad, resistencia y resiliencia, así como sus opciones de evolución continua (Sánchez, *et al.*, 2005).

En consecuencia, el conocimiento de la flora en las áreas andinas es relevante para registrar la composición que permita establecer programas de restauración locales más efectivos. En este contexto, el objetivo de este estudio fue responder a las siguientes preguntas sobre la vegetación de bosque de la microcuenca del río Barbas: 1) ¿cuáles son sus características más importantes en términos de riqueza, composición y estructura?; 2.1) ¿cuáles son los factores bióticos de las especies de plantas (estado sucesional, mecanismo de dispersión de semillas, fuente de alimento para fauna)?; 2.2) ¿cuál es el estado de conservación de las especies (es decir, la categoría de amenaza)?, y 2.3) ¿cuáles son los usos antrópicos conocidos?; 3.1) ¿cuáles son las especies más idóneas para la restauración de potreros? y ¿se requiere asistencia para su reproducción y dispersión?; 3.2) ¿cuáles especies son más recomendables para enriquecer los bosques existentes? y ¿se requiere asistencia para su reproducción y dispersión?.

Las siguientes son las hipótesis planteadas para cada una de las anteriores preguntas con base en observaciones en campo y en estudios anteriores: 1) la riqueza sería similar a la registrada en otros estudios en los Andes colombianos y las familias Arecaceae y Cyatheaceae predominarían, con una mayoría de individuos jóvenes pertenecientes a las clases diamétricas más bajas. 2.1) La mayoría de las especies correspondería a pioneras intermedias y pocas serían fuente de alimento para animales. 2.2) Dentro del bosque no habría especies incluidas en alguna categoría regional, nacional o global de amenaza. 2.3) Los principales usos de las especies sería la elaboración de postes para cercos y leña, la construcción de vivienda, la ebanistería y la protección de cuencas. 3.1) Dado que la mayoría de las especies correspondería a pioneras intermedias, varias serían idóneas para iniciar procesos de restauración ecológica en potreros y como algunas predominan en el bosque, este puede ser fuente natural de semillas. 3.2) Serían pocas las especies sucesionales tardías que se podrían recomendar para procesos de restauración ecológica y al no ser predominantes en el bosque, requerirían asistencia para su reproducción y dispersión.

Las respuestas a estas preguntas brindan información relevante sobre la vegetación del bosque, lo que contribuirá a tomar decisiones para futuros procesos de restauración ecológica en las cuencas de bosques montanos de la región.

Métodos

Área de estudio

La microcuenca del río Barbas se ubica en la parte sureste de la vereda El Manzano, corregimiento de Tribunas Córcega, municipio de Pereira, en el departamento de Risaralda, Colombia; hace parte de la cuenca alta del río Barbas, que es el límite geográfico entre los departamentos de Risaralda, Quindío y Valle, hasta su desembocadura en el río Cauca. Tiene un área de 474 ha entre los 2.088 y 2.331 m de altitud, siendo el punto más bajo la bocatoma de la organización comunitaria de servicios de agua y saneamiento (OCSAS) cuyo nombre es Asociación de Suscriptores Empresa de Servicios Públicos Tribunas Córcega E.S.P. El bosque natural secundario tiene un área de 273 ha (58 %) y está rodeado por áreas de potrero (26 %) y de bosque plantado con especies forestales foráneas como pinos, cipreses y eucaliptos (16 %) (Roa-García, 2018).

La precipitación de la zona es de 2.955 mm al año y la temperatura media anual es de 16,6 °C (CRQ, 2015); según la clasificación de zonas de vida o unidades bioclimáticas de Holdridge (1967), el área estudiada corresponde a un bosque pluvial montano (bp-M) (CRQ, 2014). Los suelos son andisoles alofánicos, clasificados como Hapludands acruódicos (IGAC, 1996) desarrollados sobre sedimentos fluvio-volcánicos (Guarín, *et al.*, 2004).

Esta cuenca abastece de agua a la OCSAS de Tribunas Córcega, que cuenta con alrededor de 2.000 usuarios en la zona rural de Pereira (ACCCR, 2014). Este sitio hace parte del área

de amortiguación del Distrito de Conservación de Suelos (DCS) Barbas-Bremen, con un área aproximada de 9.600 ha (Gómez-Hoyos, *et al.*, 2014). La OCSAS se ha hecho cargo de la prestación del servicio de agua potable del corregimiento Tribunas Córcega en la zona rural de Pereira desde 1994, protegiendo la zona boscosa natural y haciendo gestiones para ampliar las áreas de protección, sobre todo a partir de la segunda década del siglo XXI (ACCCR, 2014).

Muestreo de la vegetación

El trabajo de campo se hizo en septiembre del 2015 utilizando el método de muestreo de Gentry (1982), el cual consiste en censar en un área de 1.000 m² (0,1 ha) todos los individuos con un diámetro de tallo a la altura del pecho (DAP) mayor o igual a 2,5 cm. Se ubicaron 10 transectos de 50 m de longitud y 2 m de ancho paralelos a las curvas de nivel y a ambos lados del río Barbas (Figura 1). El primer transecto se ubicó en la bocatoma de la OCSAS, en 04°42'18,3"N - 75°35'10,6"O a 2.120 m, y el último en 04°42'27,7"N - 75°35'00,9"O a 2.159 m. Se marcaron puntos de referencia al inicio y al final de los transectos y se delimitó con fibra de polipropileno un metro a cada lado de ellos. Se registró la circunferencia a la altura del pecho (CAP a 1,30 m desde la superficie del suelo), la altura y la forma de crecimiento de cada individuo. La identificación taxonómica se hizo en campo mediante el uso de guías de campo (Vargas, 2002; Rios, *et al.*, 2004). Se tomaron muestras de herbario y fotografías de los individuos que no se pudieron identificar para facilitar su determinación empleando cámaras Fujifilm Finepix HS10 y Sony Ice-6000I. Las muestras se identificaron y se depositaron en el Herbario CUVC de la Universidad del Valle bajo la numeración del recolector Pedro José Cardona.

Además, se registraron las especies de árboles en estado fértil encontradas en el sendero para llegar al inicio del primer transecto (*ca.* 200 m) y que no habían sido registradas en los transectos. Estos registros no incluyeron el conteo de individuos y, por lo tanto, no se utilizaron para responder la primera pregunta de investigación. Sin embargo, sí sirvieron para completar el listado de especies que por razones estocásticas no se encontraron en los transectos, y contribuyeron a responder la segunda y la tercera preguntas de investigación.

Análisis de los datos

Con los registros del muestreo en los transectos se calcularon los parámetros estructurales para cada una de las especies: abundancia o densidad relativa; frecuencia, frecuencia

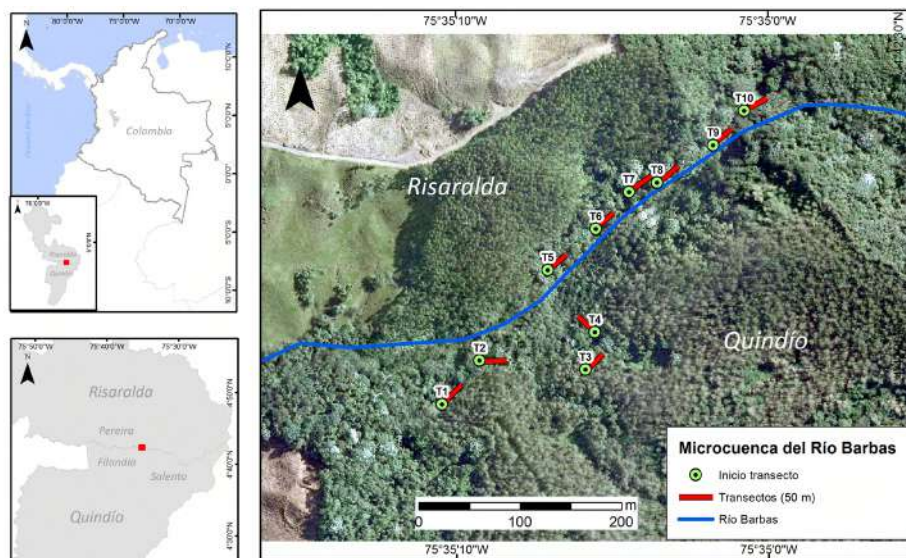


Figura 1. Ubicación de los transectos de muestreo en el bosque de la microcuenca del río Barbas, Colombia. Elaborado por: Juan Carlos Tafur

relativa; dominancia o área basal; dominancia relativa e índice de valor de importancia (IVI), cuyo valor es la suma de la frecuencia, la densidad y la dominancia relativas (**Rangel-Ch. & Velásquez, 1997**). Se midió la circunferencia a la altura del pecho (CAP) a 1,3 m por encima del suelo y se transformó en diámetro a la altura del pecho (DAP) según la ecuación $DAP = CAP/\pi$. La dominancia está representada por el área basal (AB), la cual se calculó mediante la fórmula: $AB = (\pi/4) \times (DAP)^2$ (**Villareal, et al., 2006**).

La riqueza es el número total de especies registradas en los transectos. Se usó el estimador Chao 1 para evaluar el esfuerzo de muestreo con el programa EstimateS 9.1.0 (**Colwell, 2016**), considerado el más riguroso cuando se usan datos de abundancia (**Villareal, et al., 2006**).

Se estimó la distribución de individuos por clases diamétricas y de altura estableciendo los intervalos con base en las fórmulas de **Rangel-Ch. & Velásquez (1997)**:

$$C = (X_{\max} - X_{\min}) / m \quad \text{y} \quad m = 1 + 3,3 (\text{Log } n),$$

donde m es el número de intervalos, n el número total de tallos, C la amplitud del intervalo, y X el parámetro a analizar (es decir, DAP (cm) y altura (m)).

Factores bióticos, estado de conservación y usos antrópicos

Con base en información secundaria, se determinaron los factores bióticos (estado sucesional, mecanismo de dispersión de semillas, fuente de alimento para fauna), el estado de conservación (categoría de amenaza) y los usos antrópicos de cada una de las especies registradas dentro y fuera de los transectos.

Las fuentes secundarias usadas para determinar los factores bióticos y los usos antrópicos fueron: **Vargas (2002)**, **Robles (2006)**, **Linares, et al. (2008)**, **Suárez, et al. (2011)**, **Campos-R., et al. (2014)**, **Pizano & García (2014)**, **Treuer, et al. (2018)**, **Aguilar, et al. (2018)** y **Fern (2019)**. Se usaron las mismas categorías de estados sucesionales (sucesional tardía, pionera intermedia y sitios abiertos) que en **Vargas (2012)**. Los mecanismos de dispersión de diásporas se clasificaron como anemocórica (dispersadas por el viento), zoocórica (dispersadas por animales) y autocórica (autodispersión) (**Van Der Pijl, 1982**). Para los usos antrópicos se usó una clasificación propia agrupando los encontrados en las fuentes secundarias (**Vargas, 2002; Robles, 2006; Linares, et al., 2008; Suárez, et al., 2011; Campos-R., et al., 2014; Pizano & García, 2014; Treuer, et al., 2018; Aguilar, et al., 2018; Fern, 2019**). Dichas categorías fueron: postes para cercos y leña (P), protección de cauces (C), ebanistería (E), construcción de viviendas (V), uso ornamental o elaboración de objetos (O), medicinal (M) y sistemas silvopastoriles (S).

Para determinar el estado de conservación de las especies se usaron las siguientes fuentes: a nivel global, la base de datos en línea de la **Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza-UICN (2018)**; a nivel nacional, la serie de libros rojos de especies amenazadas de Colombia (**Calderón, et al., 2002, 2005; García & Galeano, 2006; Cárdenas & Salinas, 2007**), y a nivel regional se usaron los listados de flora y fauna con categoría de amenaza en el Valle del Cauca de la Corporación Autónoma del Valle del Cauca-CVC (**CVC, 2019**) y de la CRQ (**CRQ, 2014**). Las clasificaciones de amenaza usadas en este artículo (CR: en peligro crítico; EN: en peligro, y VU: vulnerable) son las definidas por la **UICN (2012)**, con excepción de la clasificación a nivel regional en el Valle del Cauca, la cual usa las clasificaciones de amenaza S1: en peligro crítico; S2: en peligro, y S3: vulnerable, definidas por **NatureServe (2007)**.

Selección de especies para restauración

Para seleccionar las especies se ponderaron las siguientes características: valor del IVI, mecanismo de dispersión de semillas, usos antrópicos y categoría de amenaza (**Tabla 1**). Esta metodología es propia y se basa en la caracterización florística producto del trabajo de campo y de la información secundaria recolectada. Se le dio mayor ponderación a las especies con algún grado de amenaza y con un IVI mayor a 15, y menor a aquellas que son fuente de alimento para animales y se emplean en la protección de cauces (**Tabla 1**).

Tabla 1. Valoración de las características de la vegetación para seleccionar especies destinadas a la restauración ecológica

Características	Valoración
Caracterización florística	IVI/10 (1)
Estado de conservación	Algún grado de amenaza = 10, ningún grado de amenaza = 0 (2)
Mecanismo de dispersión	Zoocórica = 1, anemocórica, autocórica = 0 (3)
Usos antrópicos	Protección de cauces = 1, otros usos = 0,1 (4)
Valoración total	(1) + (2) + (3) + (4)

La ponderación de especies con alguna categoría de amenaza muestreadas dentro de los transectos resulta en dos posibilidades:

- especies con categoría de amenaza e IVI elevado, para las cuales el bosque podría tomarse como fuente natural de semillas. Un ejemplo de la consideración de un bosque como fuente de semillas para especies se encuentra en **Correa & Vargas (2009)**;
- especies con categoría de amenaza e IVI bajo, las cuales requerirían de asistencia en su dispersión. La asistencia en la dispersión es una práctica usada en la restauración ecológica como lo indica **Vargas (2011)** y consiste en la reproducción asexual por estacas, recolección de semillas y plántulas que luego son llevadas a un vivero, como se ha hecho, por ejemplo, en el sur del Trapecio amazónico colombiano (**Avella & Rodríguez, 2005**).

Se definieron dos estrategias de restauración para la selección de especies: siembra de pioneras en potreros y enriquecimiento de bosques ya establecidos (**Torres-Rodríguez, et al., 2019**). La evaluación se aplica solo a las pioneras intermedias y de sitios abiertos en la primera estrategia, y solo a las sucesionales tardías en la segunda estrategia.

Resultados

Caracterización florística

Se registraron 264 individuos de plantas pertenecientes a 29 familias, 43 géneros y 62 especies. Las 62 especies representaron un esfuerzo de muestreo del 70 % según el estimador Chao 1. Las familias con mayor riqueza fueron Rubiaceae (13 especies), Melastomataceae (10), Lauraceae (5), Arecaceae, Clusiaceae, Cyatheaceae y Solanaceae, con tres cada una; las demás familias estuvieron representadas por una sola especie. El género más rico fue *Miconia* (con ocho especies), seguido por *Palicourea* (5), *Ocotea* (4), y *Chrysochlamys*, *Cyathea*, *Guettarda* y *Ladenbergia* (con dos especies cada uno). Los otros géneros estuvieron representados por una especie cada uno.

El número promedio, el mínimo y el máximo de especies por transecto fue de 26, 17 y 37, respectivamente. Las especies registradas en los transectos correspondieron a árboles en un 64 %, a arbustos en un 24 % y a otras formas leñosas en un 11 % incluidas las palmas, los helechos arborescentes y los bambúes (**Tabla 2**).

En cuanto a la densidad, las especies *Cyathea horrida* (L.) Sm., *W. kalbreyeri* (Burret) R. Bernal, *Cuatresia riparia* (Kunth) Hunz. y *Guettarda crispiflora* subsp. *sabiceoides* (Standl.) C.M. Taylor presentaron los mayores valores, entre 16 a 37 individuos en 0,1 ha, y representaron el 6 % de las 62 especies, en tanto que las otras estuvieron representadas por pocos individuos: 42 % por uno solamente, 38 % por 2 a 5 individuos, y 14 % por 6 a 15 individuos.

Con respecto a la frecuencia, el 56 % de las especies se registraron en un solo transecto. Solo cinco especies (8 % del total) se encontraron en más de la mitad de los transectos: *W. kalbreyeri*, *Geonoma undata* Klotzsch, *Chamaedorea linearis* (Ruiz & Pav.) Mart. (Arecaceae), *C. horrida* y *Alsophila cuspidata* (Kunze) D.S. Conant (Cyatheaceae).

En cuanto a la dominancia, más del 50 % se concentró en las especies *C. horrida*, *W. kalbreyeri*, *Tibouchina lepidota* (Bonpl.) Baill., *G. crispiflora* subsp. *sabiceoides* y *A. cuspidata*. Es decir que el 50 % del valor del IVI se concentró en las especies *C. horrida*,

Tabla 2. Formas de vida, estado sucesional, mecanismo de dispersión, grado de amenaza y usos antrópicos dentro de los transectos y por fuera de ellos en la microcuenca del río Barbas, Colombia

Formas de crecimiento	Estado sucesional	Mecanismo de dispersión							Número de especies	En algún grado de amenaza regional	Usos antrópicos						
		Zoocoria	Zoocoria aves	Zoocoria mamíferos y aves	Zoocoria mamíferos	Autocórica	Anemocórica	Indeterminado			Protección de cauces	Postes para cercos y leña	Construcción de viviendas	Uso ornamental o elaboración de objetos	Medicinal	Ebanistería	Sistemas silvopastoriles
Dentro de los transectos																	
Árbol	Sucesional tardía	10	4	2	2	2	0	0	20	2	4	7	5	2	3	5	0
	Pionera intermedia	11	4	1	0	2	1	0	19	2	12	9	3	1	2	0	1
	Subtotal	21	8	3	2	4	1	0	39	4	16	16	8	3	5	5	1
Arbusto	Sucesional tardía	4	1	1	0	0	0	0	6	0	1	1	2	1	0	1	0
	Pionera intermedia	7	0	0	0	0	0	0	7	0	6	6	0	0	0	0	0
	Sitios abiertos	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
	Indeterminado	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subtotal	11	1	1	0	0	1	1	15	0	7	7	3	2	0	1	0
Árbol hemiepífita	Sucesional tardía	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
	Subtotal	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
Palma	Pionera intermedia	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0
	Subtotal	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	0
Helecho arborescentes	Sucesional tardía	3	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	2	0	0	0	0
	Subtotal	3	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	2	0	0	0	0
Bambú	Sitios abiertos	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
	Subtotal	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
Total dentro de transectos		35	9	5	2	7	3	1	62	6	23	23	14	10	5	6	1
Fuera de los transectos																	
Árbol	Sucesional tardía	9	3	0	1	1	1	0	15	3	3	3	5	2	0	0	0
	Pionera intermedia	1	4	1	0	1	1	0	8	1	4	1	1	0	2	0	0
	Sitios abiertos	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
	Subtotal	10	8	1	1	2	2	0	24	4	8	4	6	2	2	1	0
Arbusto	Sucesional tardía	1	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pionera intermedia	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0
	Subtotal	3	1	1	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Árbol hemiepífita	Sucesional tardía	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0
	Subtotal	0	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0
Palma	Sucesional tardía	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	Pionera intermedia	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0
	Subtotal	1	1	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	2	0	0	0
Total fuera de transectos		14	10	2	2	3	2	0	33	5	8	4	7	5	2	1	0
Total estudio		49	19	7	4	10	5	1	95	11	31	27	21	15	7	7	1

T. lepidota, *W. kalbreyeri*, *A. cuspidata*, *G. crispiflora* subsp. *sabiceoides*, *G. undata*, *Ocotea* sp.2, y *C. riparia* (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1167/2940>). Además, más del 50 % del valor de importancia de familias (VIF) se registró en las familias Rubiaceae, Cyatheaceae y Arecaceae.

El número de individuos con alturas entre 2 y 8,5 m correspondió al 61 % del total. En el siguiente rango, 8,6 a 17 m se registró el 29 % y entre 17,1 y 59 m, el 10 % restante (Figura 2A). El individuo más alto (59 m) fue de *Ocotea* sp.2., seguido por individuos de *T. lepidota*, *Pouteria torta* subsp. *tuberculata* (Sleumer) T.D.Penn. y *Alchornea glandulosa* Poepp.

El número de individuos con un DAP entre 2,5 y 5,5 cm correspondió a 71 % del total. En el siguiente rango, 5,6 a 8,3 cm, se registró el 17 % y entre 8,4 y 20,1 cm, el 12 % restante (Figura 2B). El individuo con mayor DAP fue el mismo de mayor altura, seguido por tres individuos de 15 cm de DAP, uno de cada una de las siguientes especies: *Ladenbergia macrocarpa* (Vahl) Klotzsch, *Symplocos quindiuensis* Brand y *A. glandulosa*.

Según las clases de altura (Figura 2A) y las clases diamétricas (Figura 2B), la distribución de los individuos presentó una forma de “J” invertida, con una mayoría de individuos de una altura por debajo de 17 m y un DAP inferior a 8,3 cm.

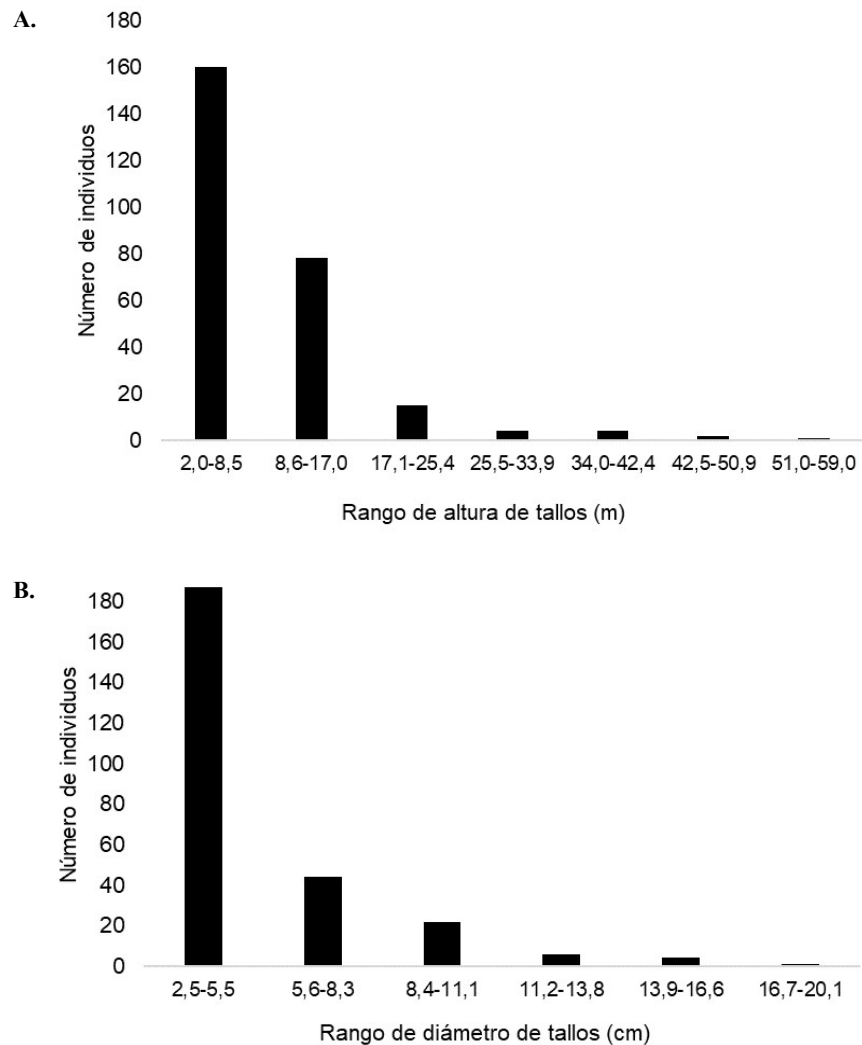


Figura 2. Clases de altura (A) y clases diamétricas (B) de la vegetación de la microcuenca del río Barbas, Colombia

Factores bióticos, estado de conservación y usos antrópicos

A las 62 especies encontradas en los transectos, se sumaron 33 registradas por fuera del muestreo. El consolidado de estas 95 especies se presenta en la **tabla suplementaria 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1167/2941> indicando para cada especie el valor del IVI (para aquellas registradas en los transectos), la forma de crecimiento, el estado sucesional, el mecanismo de dispersión, la categoría de amenaza local y los usos antrópicos.

El 69 % de las especies correspondió a árboles, el 21 % a arbustos y el 10 % a otras formas leñosas, incluidas palmas, helechos arborescentes y bambúes (**Tabla 2**). El 47 % correspondió a sucesionales tardías, el 42 % a pioneras intermedias y el 3 % a especies de sitios abiertos (**Tabla 2**). Los principales dispersores de semillas (83 % de estas especies) son los animales (**Tabla 2**).

Al analizar el estado de amenaza, se encontró que 20 especies han sido evaluadas y de este total 11 tienen algún grado de amenaza regional en el Valle del Cauca o en Quindío (**Tabla 3**), y de ellas, seis se registraron dentro de los transectos. Nueve de estas especies se clasificaron en S1 o en peligro crítico, y cuatro de ellas se encontraron dentro de los transectos: *Aegiphila grandis* Moldenke y *Cinchona pubescens* Vahl (sucesionales tardías), *Guatteria crassipes* R.E. Fr. (pionera intermedia) y *Chusquea latifolia* L.G. Clark (sitios abiertos) (**Tabla 3**).

De las 11 especies con algún grado de amenaza, se destacan dos de la familia Arecaceae: *W. kalbreyeri*, por ser la única con algún grado de amenaza y un valor de IVI alto, y *Aiphanes simplex* Burret (sin valor de IVI), por ser endémica de Colombia.

Al examinar los usos antrópicos, el más frecuente fue el de protección de cauces, con 31 especies (33 %), seguido del uso para postes de cercos y leña con 27 (28 %) y la construcción de viviendas con 21 (22 %) (**Tabla 2**). Tres de las siete especies con mayor IVI, *W. kalbreyeri*, *G. crispiflora* subsp. *sabiceoides* y *G. undata*, son sucesionales tardías apetecidas por su madera para uso en ebanistería y construcción (**Vargas, 2002**).

Tabla 3. Especies vegetales con algún grado de amenaza a nivel regional en la microcuenca del río Barbas, Colombia

Estado sucesional	Familia	Especie	Nombre común	IVI	Hábito de crecimiento	Categoría amenaza Regional
Sucesional tardía	Arecaceae	<i>Wettinia kalbreyeri</i> (Burret) R. Bernal	Palma macana	26,896	Palma	VU
	Lamiaceae	<i>Aegiphila grandis</i> Moldenke	Mantequilla	2,340	Árbol	S1 ²⁰⁰²
	Phyllanthaceae	<i>Hieronyma macrocarpa</i> Müll. Arg.	Candelo	1,133	Árbol	VU
	Bombacaceae	<i>Spirotheca rhodostyla</i> Cuatrec.	Palo santo	-	Árbol	S1 ¹⁹⁹³ , S1 ²⁰⁰²
	Euphorbiaceae	<i>Tetrorchidium rubrivenium</i> Poepp.	Arenillo	-	Árbol	S1 ²⁰⁰¹ , S1 ²⁰⁰²
	Metteniusaceae	<i>Calatola costaricensis</i> Standl.	Tártaro - Marfil	-	Árbol	S1 ²⁰⁰² , VU
Pionera intermedia	Rubiaceae	<i>Cinchona pubescens</i> Vahl	Quina	1,152	Árbol	S3 ²⁰⁰¹ , S1 ²⁰⁰²
	Annonaceae	<i>Guatteria crassipes</i> R.E. Fr.	-	1,120	Árbol	S1 ¹⁹⁹³
	Arecaceae	<i>Aiphanes simplex</i> Burret*	Mancadera	-	Palma	S1 ²⁰⁰² , VU
	Passifloraceae	<i>Passiflora arborea</i> Spreng.	Curubo de monte	-	Árbol	S1 ²⁰⁰² , VU
Sitios abiertos	Poaceae	<i>Chusquea latifolia</i> L.G. Clark	Chusque	1,537	Bambú	S1 ¹⁹⁹³

* Especie exclusiva de Colombia. Categorías de amenaza de la Corporación Autónoma Regional del Valle (CVC, 2019): S1: en peligro crítico; S3: vulnerable (**NatureServe, 2007**). En superíndice se encuentra el año de evaluación. Categoría de amenaza de la Corporación Autónoma Regional del Quindío (**CRQ, 2014**): VU: vulnerable (IUCN, 2012)

Algunas de las especies reconocidas para la protección de cauces de agua son de rápido crecimiento y de fácil propagación por semillas o estacas, por ejemplo: *Oreopanax incisus* Decne. & Planch., *Chrysochlamys colombiana* (Cuatrec.) Cuatrec., *Sapium stylare* Müll. Arg., *Miconia* spp., *Palicourea angustifolia* Kunth, *Solanum aphyodendron* S. Knapp y *Cecropia telealba* Cuatrec. (Vargas, 2002). Además, se encontraron especies ideales para procesos de revegetación como *Clarisia biflora* Ruiz & Pav. (Aguilar, et al., 2018) y *Trichilia martiana* C. DC. (Pizano & García, 2014). Esta última especie también da buenos resultados en la revegetación pasiva (Treuer, et al., 2018).

Especies seleccionadas para restauración

Para iniciar los procesos de restauración en potreros se proponen seis especies pioneras intermedias (entre ellas, *A. simplex* y *Ch. latifolia*) (Tabla 4) y para el enriquecimiento de bosques ya establecidos, siete sucesionales tardías (entre ellas, *W. kalbreyeri* y *G. crispiflora* subsp. *sabiceoides*) (Tabla 4), para un total de 13.

Tabla 4. Especies de plantas recomendadas para procesos de restauración ecológica en potreros y bosques según calificaciones de amenaza, estado sucesional, mecanismo de dispersión y usos

Especie	Nombre común	Hábito de crecimiento	Estado sucesional	Caracterización florística o IVI/10 (1)	Estado de conservación (2)	Mecanismo de dispersión (3)	Usos antrópicos (4)	(1)+(2)+(3)+(4)
Potreros								
<i>Cinchona pubescens</i> Vahl	Quina	Árbol	Pionera intermedia	0,11	10	0	1,2	11,31
<i>Guatteria crassipes</i> R.E. Fr.	-	Árbol	Pionera intermedia	0,11	10	1	0,1	11,21
<i>Aiphanes simplex</i> Burret	Mancadera	Palma	Pionera intermedia		10	1	0,1	11,10
<i>Passiflora arborea</i> Spreng.	Curubo de monte	Árbol	Pionera intermedia		10	1	0	11,00
<i>Chusquea latifolia</i> L.G. Clark	Chusque	Bambú	Sitios abiertos	0,15	10	0	0,1	10,25
<i>Tibouchina lepidota</i> (Bonpl.) Baill.	Sietecueros	Árbol	Pionera intermedia	2,85	0	0	1,2	4,05
Bosques								
<i>Wettinia kalbreyeri</i> (Burret) R. Bernal	Palma macana	Palma	Sucesional tardía	2,69	10	1	0,1	13,79
<i>Aegiphila grandis</i> Moldenke	Mantequillo	Árbol	Sucesional tardía	0,23	10	1	1,2	12,43
<i>Hieronyma macrocarpa</i> Müll. Arg.	Candelo	Árbol	Sucesional tardía	0,11	10	1	0,1	11,21
<i>Tetrorchidium rubrivenium</i> Poepp.	Arenillo	Árbol	Sucesional tardía		10	1	0	11,0
<i>Spirotheca rhodostyla</i> Cuatrec.	Palo santo	Árbol	Sucesional tardía		10	0	0,1	10,1
<i>Calatola costaricensis</i> Standl.	Tártaro - Marfil	Árbol	Sucesional tardía		10	0	0,1	10,1
<i>Guettarda crispiflora</i> subsp. <i>sabiceoides</i> (Standl.) C.M. Taylor	Cafeto de monte	Árbol	Sucesional tardía	1,53	0	1	0,3	2,83

Entre las pioneras intermedias se encontraron cinco con algún grado de amenaza, en tanto que entre las sucesionales tardías se encontraron seis. En consecuencia, para la restauración se recomiendan las 11 especies registradas en este estudio con alguna categoría de amenaza.

Del total de 13 especies recomendadas, ocho se encontraron dentro de los transectos: cuatro pioneras y cuatro sucesionales; ocho tienen como mecanismo de dispersión la zoo-coria: tres pioneras y cinco sucesionales; tres son reconocidas por su uso en la protección de cauces y tienen, además, dos usos antrópicos: dos pioneras y una sucesional; siete tienen un solo uso antrópico, otra tiene tres usos, y dos no tienen ningún uso antrópico reconocido.

Discusión

Caracterización florística

La riqueza observada en el muestreo (62 especies) fue menor a la esperada (89) por la estimación con el índice Chao 1. Este resultado es similar al encontrado por **Sanín & Duque** (2006) en la reserva forestal protectora del río Blanco en Caldas, Colombia, en cuyo estudio no se estabilizó la curva de acumulación de especies en 0,1 ha. Una posible explicación es que hay especies dentro del bosque que se encuentran dispersas y están representadas por muy pocos individuos, o por individuos con diámetros inferiores a 2,5 cm. De hecho, los registros a partir de 1 cm de diámetro reflejan la abundante regeneración de plantas esciófitas en la primera clase diamétrica (**Yepes, et al., 2010**), las cuales pueden aumentar el número de especies. Para alcanzar un esfuerzo de muestreo cercano al 100 % en futuros estudios se recomienda aumentar el área a 0,15 ha (es decir, 15 transectos de 50 m x 2 m), aumentar el número de transectos, o usar un menor número de transectos pero más anchos, como lo recomiendan **Ariza, et al.** (2009). A pesar de esto, la riqueza de especies (62) confirma parte de la primera hipótesis, pues este número es similar a los resultados de otros estudios en los Andes colombianos, donde se encontraron entre 57 y 98 especies a altitudes entre 2.050 y 2.900 m (**Gentry, 1995; Galindo, et al., 2003; Alvear, et al., 2010; Sánchez-T., 2018**).

En el bosque predominaron las especies de Rubiaceae, Melastomataceae y Lauraceae, las familias más comunes en bosques andinos en la cordillera Central de Colombia (**Sanín & Duque, 2006; Ariza, et al., 2009; Alvear, et al., 2010; Sánchez-T., 2018**). A pesar de que las familias Arecaceae y Cyatheaceae no están representadas por varias especies, su predominancia en el bosque fue alta, tal como se esperaba en parte de la primera hipótesis, ya que dos especies de Cyatheaceae, y dos de Arecaceae representaron el 30 % de la dominancia relativa y estuvieron entre los seis mayores valores de IVI. Además, estas dos familias, así como la Rubiaceae, fueron las más importantes según el VIF.

El histograma que ilustra la estructura del bosque tiene forma de “J” invertida, con abundantes individuos jóvenes en las clases diamétricas más bajas, lo cual corrobora también parte de la primera hipótesis. La abundancia de individuos jóvenes se debe a las especies pioneras *Ch. colombiana*, *Miconia* spp. (8 especies) y *Palicourea* spp. (5 especies), y a las especies sucesionales tardías *Ch. linearis*, *C. riparia* y *W. kalbreyeri*, para las cuales las condiciones de este sotobosque resultan favorables. Ecológicamente, la J invertida significa tasas de mortalidad iguales en todas las clases diamétricas (**Meyer, 1952**), lo cual es indicador de una regeneración saludable (**Harper, 1977**). En contraste, una distribución sigmoidea se explica por la baja mortalidad de árboles jóvenes y alta mortalidad de árboles senescentes (**Goff & West, 1975**), como se ha encontrado en bosques vírgenes de hayas en el norte de Europa (**Westphal, et al., 2006**). Los histogramas en forma de J invertida han sido obtenidos en otros estudios en Colombia (**Sanín & Duque, 2006; Ariza, et al., 2009; García, et al., 2010; Sánchez-T., 2018**). La estructura con mayor abundancia en las clases diamétricas inferiores se considera común en bosques andinos primarios (**Yepes, et al., 2010**) y en bosques tropicales (**Popma, et al., 1988**), lo cual garantiza el sostenimiento futuro del ecosistema al contar con suficientes individuos jóvenes (**Sánchez-T., 2018**).

De las 17 especies mayoritariamente responsables del número de individuos jóvenes, solo dos tuvieron un IVI > 10: *C. riparia* y *W. kalbreyeri*. Estas dos especies sucesionales tardías pertenecen al grupo de ocho que concentran el 50 % del IVI. Esto indica que a pesar de las pocas especies que logran dominar el dosel, hay regeneración de gran variedad de especies en el sotobosque que garantizan el sostenimiento del bosque a lo largo del tiempo (Harper, 1977; Sánchez-T., 2018).

Factores bióticos y usos antrópicos

Considerando el tipo de muestreo enfocado a plantas leñosas, la comunidad del bosque está representada en su mayoría por árboles (69 %) en comparación con las demás formas leñosas como arbustos, helechos arborescentes, palmas y bambúes (31 %), lo que coincide con otros bosques andinos estudiados en la cordillera Central (Sanín & Duque, 2006; Ariza, et al., 2009; Alvear, et al., 2010), en la cordillera Occidental (Sánchez-T., 2018), en la cordillera Oriental (Galindo, et al., 2003), y con bosques tropicales en un rango de baja a alta precipitación en los que los árboles predominan sobre las lianas (Gentry, 1982).

Cuatro de las especies más importantes del bosque (*G. crispiflora* subsp. *sabiceoides*, *G. undata*, *W. kalbreyeri*, *C. riparia*) y 52 de las 95 especies de plantas registradas son sucesionales tardías (Vargas, 2002; Robles, 2006; Linares, et al., 2008; Suárez, et al., 2011; Campos-R., et al., 2014). Este resultado es contrario a parte de la segunda hipótesis (2.1), y sugiere un estado sucesional avanzado, lo que se confirma con la diferenciación entre fases del crecimiento secundario enunciada por Richards (1996), según la cual la sucesión avanzada es rica en especies de lento crecimiento y de madera densa, y la sucesión temprana es rica en efímeras o pioneras. La riqueza de especies encontrada y la composición de aquellas apetecidas por su madera y otros usos sugieren que, a pesar de la presión antrópica, el bosque ha tenido condiciones adecuadas para mantener su diversidad. Probablemente esto se debe al cuidado por parte de OCSAS de Tribunales Córcega, que ha generado condiciones propicias para la recuperación del bosque durante los últimos 25 años.

Contrariamente a lo que se planteó originalmente en la segunda hipótesis (2.1), la mayoría de las especies de este bosque (83 %) son dispersadas por animales, lo que sugiere que la riqueza y el alto porcentaje de elementos sucesionales tardíos es consecuencia de la frugivoría, puesto que la interacción planta-animal, en particular la de semillas dispersadas y frugívoros, tiene un impacto positivo en las poblaciones de plantas (Fuzessy, et al., 2018; Simmons, et al., 2018). Es de resaltar que este bosque se ubica en el “Área Importante para la Conservación de las Aves (AICA) Barbas-Bremen”, que alberga más de 300 especies de aves, en su mayoría generalistas (Marín-Gómez, et al., 2009). La zoocoria es un fenómeno deseable y se espera que continúe su impacto positivo en la microcuenca, así como en los ecosistemas aledaños, para asegurar la dispersión de las especies de plantas. En consecuencia, la mayor distancia entre las plántulas hijas y la planta madre o fuente de semillas favorece la supervivencia de los juveniles o reclutas que colonizan nuevos sitios (Willson & Traveset, 2000).

En oposición a lo planteado en la segunda hipótesis (2.2), en el bosque se encontraron 11 especies con algún grado de amenaza a nivel local según los listados de las corporaciones autónomas (CRQ, 2014; CVC, 2019). Los usos más comunes de las especies, la protección de cauces, los postes para cercos y leña y la construcción de viviendas coinciden con los propuestos en la segunda hipótesis (2.3).

Especies seleccionadas para restauración

Se recomiendan seis especies pioneras intermedias para la restauración en potreros, tal como se planteó en la tercera hipótesis (3.1) en cuanto a encontrar y recomendar varias especies de pioneras intermedias. También se recomiendan siete especies sucesionales tardías para el enriquecimiento de bosques, contrario a lo planteado en la tercera hipótesis (3.2), pues no se esperaba encontrar una gran variedad de especies sucesionales tardías que pudiera recomendarse para el enriquecimiento de bosques.

Según lo planteado en las hipótesis 3.1 y 3.2 se esperaba encontrar varias pioneras intermedias con altos IVI y pocas sucesionales tardías con IVI bajos, pero las únicas dos especies con un IVI alto fueron *T. lepidota* (pionera intermedia) y *W. kalbreyeri* (sucesional tardía), especies para las que el bosque puede considerarse como una fuente natural de semillas; en el caso de *W. kalbreyeri* esto tiene mayor relevancia por estar en una categoría de amenaza. La densidad de *W. kalbreyeri* es parecida a la registrada en el bosque nativo y maduro del Santuario de Flora y Fauna Otún Quimbaya, el cual se considera clave en la protección de esta y otras especies de palmas (Correa & Vargas, 2009). Las otras seis especies, al tener un bajo IVI (uno o dos individuos en 0,1 ha), requerirían asistencia mediante su reproducción asexual por estacas y la recolección de semillas o plántulas (Avella & Rodríguez, 2005; Vargas, 2011). El resto de las cinco especies recomendadas, las cuales fueron registradas por fuera del muestreo, seguramente requerirán la misma asistencia que las especies con IVI bajo, por encontrarse dispersas en la microcuenca.

Conclusiones y recomendaciones

Se concluyó que el bosque tiene una riqueza similar a otros bosques andinos. La abundancia de individuos en la clase diamétrica más baja y el IVI concentrado en pocas especies indican una regeneración saludable en el bosque. Una gran proporción de especies son sucesionales tardías, lo que indica que se encuentra en una sucesión avanzada, con alto porcentaje de especies cuyas semillas son dispersadas por animales. Se encontraron 11 especies con algún grado de amenaza a nivel regional. Los mayores usos antrópicos fueron la protección de cauces, seguida por la elaboración de postes para cercos y leña y la construcción de viviendas. En consecuencia, el bosque es un reservorio de especies, tanto pioneras intermedias como sucesionales tardías, y por ello se recomiendan 13 especies para emplearlas en la restauración ecológica dando prioridad a las 11 con algún grado de amenaza: seis especies pioneras (*C. pubescens* Vahl, *G. crassipes* R.E. Fr., *A. simplex* Burret, *Passiflora arborea* Spreng., *Ch. latifolia* L.G. Clark, *T. lepidota* (Bonpl.) Baill.) y siete sucesionales tardías (*W. kalbreyeri* (Burret) R. Bernal, *A. grandis* Moldenke, *Hieronyma macrocarpa* Müll. Arg., *Tetrorchidium rubrivenium* Poepp., *Spirotheca rhodostyla* Cuatrec., *Calatola costaricensis* Standl. y *G. crispiflora* subsp. *sabiceoides* (Standl.) C.M. Taylor). De estas, *T. lepidota* y *W. kalbreyeri* registraron IVI altos, por lo que este bosque puede considerarse como una fuente natural de sus semillas. En cuanto al resto de las especies recomendadas, se sugiere estudiar su forma de propagación y sus rasgos de historia de vida para escoger aquellas cuya propagación sea más factible y mejoren las condiciones de los bosques de la región. Por último, se recomienda adelantar proyectos de restauración ecológica cuyo objetivo principal sea la protección de los cauces y evaluar los rasgos de vida de las especies que, sin estar amenazadas o ser recomendadas, sean reconocidas por este uso, tales como *Freziera nervosa* Bonpl., *P. angustifolia* Kunth, *Palicourea acetosoides* Wernham y *O. incisus* (Willd. ex Schult.) Decne. & Planch. (pioneras intermedias) y *Myrcia popayanensis* Hieron., *Meriania speciosa* (Bonpl.) Naudin, *Nectandra lineatifolia* (Ruiz & Pav.) Mez., y *Ocotea insularis* (Meis.) Mez. (sucesionales tardías).

Información suplementaria

Tabla 1S. Índice valor de importancia (IVI) de las especies muestreadas en los transectos de la micro-cuenca del río Barbas, Colombia. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1167/2940>

Tabla 2S. Especies de plantas registradas en la micro-cuenca del río Barbas, Colombia. Se registra la forma de crecimiento, IVI, estado sucesional, categoría de amenaza, mecanismo de dispersión y usos antrópicos. Vea la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1167/2941>

Agradecimientos

Al International Foundation for Science-IFS y a la organización comunitaria de servicios de agua y saneamiento (OCSAS) “Asociación de Suscriptores Empresa de Servicios Públicos Tribunas Córcega E.S.P.”, por los fondos que permitieron el trabajo de campo para la caracterización de la vegetación. A todo el personal de la OCSAS por facilitar la logística en el acceso a la microcuenca, en especial a Dairo Salazar y su familia. Especiales agradecimientos a Pedro José Cardona, Estrella Betancourth y Jaidilvia Suárez por el trabajo de campo.

Contribución de las autoras

CERG y AMTG declaran haber participado en el procesamiento, análisis, discusión, escritura y edición del documento.

Conflicto de intereses

Las autoras declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- ACCCR. (2014). Proyecto de investigación, pendón de resultados: Asociación de suscriptores Empresa de Servicios Públicos Tribunas Córcega E.S.P. Fecha de consulta: entre octubre y noviembre de 2019. Disponible en: https://link.landfood.ubc.ca/ACCCR/images/sitios/tribunas_pendon.jpg
- Aguilar-Garavito, M., Estupiñán-Suárez, L. M., Rojas-Sánchez, S. E., Isaacs-Cubides, P., Jurado-Bastidas, R. D., Londoño, M. C., Silva-Arias, L. M. (2018). Guía para la restauración ecológica de la región Subandina. Caso: Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen. Bogotá, Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 275 p.
- Aide, T.M. & Grau, H.R. (2004). Globalization, migration and Latin American ecosystems. *Science*. **305**: 1915-1916.
- Alvear, M., Betancur, J., Franco-Rosselli, P. (2010). Diversidad florística y estructura de remanentes de bosque andino en la zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Los Nevados, cordillera Central. *Caldasia*. **32** (1): 39-63.
- Ariza C., W, Toro M., J.L., Medina L., A. (2009). Análisis florístico y estructural de los bosques premontanos en el municipio de Amalfi (Antioquia, Colombia). *Revista Colombia Forestal*. **12**: 81-102.
- Armenteras, D., Gast, F., Villareal, H. (2003). Andean forest fragmentation and the representativeness of protected natural areas in the eastern Andes, Colombia. *Biological Conservation*. **113** (2): 245-256.
- Armenteras, D., Rodríguez, N., Retana, J., Morales, M. (2011). Understanding deforestation in montane and lowland forests of the Colombian Andes. *Regional Environmental Change*. **11**: 693-705.
- Asociación de suscriptores acueducto Tribunas Córcega E.S.P. (2011). Adaptación al cambio climático en la Colombia rural (ACCCR). Proyecto de investigación, sitio de estudio. Fecha de consulta: entre octubre y noviembre de 2019. Disponible en: <https://link.landfood.ubc.ca/ACCCR/sitios/TRIBUNAS%20CORCEGA.pdf>
- Avella-M., A. & Rodríguez-R., K. (2005). Propagación y diagnóstico de regeneración natural de algunas especies maderables empleadas por la comunidad indígena de Mocagua (Parque Nacional Natural Amacayacu. Amazonas-Colombia). *Colombia Forestal*. **9** (18): 34-51.
- Calbi, M., Clerici, N., Borsch, T., Brokamp, G. (2020). Reconstructing long term high Andean forest dynamics using historical aerial imagery: A case study in Colombia. *Forests*. **11** (8): 788. <https://doi.org/10.3390/f11080788>
- Calderón, E., Galeano, G. García, N. (2002). Libro Rojo de Plantas Fanerógamas de Colombia. Volumen 1: Chrysobalanaceae, Dichapetalaceae y Lecythidaceae. Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. 220 p.

- Calderón, E., Galeano, G., García, N.** (2005). Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 2: Palmas, frailejones y zamias. Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt- Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 454 p.
- Campos-R., J., Cerna-R. de Chico L., Chico-R., J.** (2014). Efecto del ácido giberélico, nitrato de potasio y agua de coco en la germinación de semillas de quina, *Cinchona pubescens*. *Rebiolest.* **2** (1): 20.
- Cárdenas L., D. & Salinas, N.** (2007). Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 4. Especies maderables amenazadas: Primera parte. Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 232 p.
- Cardona, A.** (2007). Propagación de especies. En: Vargas, O., (Ed.). Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. pp. 88-90.
- Colwell, R.K.** (2016). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples Version 9.1.0. fecha de consulta: entre febrero y marzo de 2019. Disponible en: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/>
- Correa-Gómez, D.F. & Vargas-Ríos, O.** (2009). Regeneración de palmas en bosques nativos y plantaciones del santuario de fauna y flora Otún Quimbaya (Risaralda, Colombia). *Caldasia.* **31** (2): 195-212.
- Corporación Regional del Quindío (CRQ).** (2014). Plan de manejo del distrito de conservación de suelos Barbas Bremen (DCB BB) Jurisdicción del departamento del Quindío (municipios de Filandia y Circasia), versión 1.5. Armenia. Fecha de consulta: entre febrero y marzo de 2019. Disponible en: <http://www.crq.gov.co/images/Sidap/PLANDEMANEJODCSBB150914%20.pdf>
- CRQ.** (2015). Precipitación diaria de la estación Bremen, desde 1971 a 2007. Armenia, Quindío.
- Corporación Regional del Valle del Cauca (CVC).** (2019). Listado de especies de flora y fauna con categoría de amenaza en el Valle del Cauca. Grupo Biodiversidad, Dirección Técnica Ambiental. Cali, Colombia.
- Etter, A. & Villa, L.A.** (2000). Andean forest and farming systems in part of the Eastern cordillera (Colombia). *Mountain Research and Development.* **20** (3): 236-245.
- Fern, K.** (2019). Tropical Plants Database. Fecha de consulta: entre febrero y marzo de 2019. Disponible en: tropical.theferns.info/viewtropical.php?id=Vismia+guianensis
- Fernández-M., F., Velasco-S., V.M., Guerrero-C., J., Viana-N., A.** (2016). Recuperación ecológica de áreas afectadas por un incendio forestal en la microcuenca Tintales (Boyacá, Colombia). *Colombia Forestal.* **19** (2): 143-160.
- Fuzessy, L.F., Janson, Ch., Silveira, F.A.O.** (2018). Effects of seed size and frugivory degree on dispersal by Neotropical frugivores. *Acta Oecologica.* **93**: 41-47. Doi: 10.1016/j.actao.2018.10.004
- Galeano, G.** (2001). Estructura, riqueza y composición de plantas leñosas en el golfo de Tribugá, Chocó, Colombia. *Caldasia.* **23** (1): 213-236.
- Galindo, R., Betancur, J., Cadena-M, J.J.** (2003). Estructura y composición florística de cuatro bosques andinos del santuario de flora y fauna Guanentá-Alto Río Fonce, Cordillera Oriental Colombiana. *Caldasia.* **25** (2): 313-335.
- García, N. & Galeano G.** (2006). Libro Rojo de Plantas de Colombia. Volumen 3: Las bromelias, las labiadas y las pasifloras. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Bogotá, Colombia. Instituto Alexander von Humboldt - Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 679 p.
- García, C., Suárez, C., Daza, M.** (2010). Estructura y diversidad florística de dos bosques naturales (Buenos Aires, Depto. Cauca, Colombia). *Facultad de Ciencias Agropecuarias.* **8** (1): 74-82.
- Gentry, A. H.** (1982). Patterns of neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology.* **15**: 1-84.
- Gentry, A. H.** (1995). Patterns of diversity and floristic composition in Neotropical montane forest. En Churchill, S. P., Balslev, H., Forero, E. y Luteyn J. L. (Ed.). *Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forest.* The New York Botanical Garden, Nueva York. p.p 103-133.
- Goff, F.G. & West, D.** (1975). Canopy-understory interaction effects on forest population structure. *For. Sci.* **21**: 98-108.

- Gómez-Hoyos, D.A., Chuprine, A., Salazar-Bejarano, R.** (2014). Distrito de Conservación de Suelos Barbas-Bremen: consideraciones de manejo, conservación y amenaza. *Revista Latinoamericana de Conservación*. **4** (1): 31-39.
- Guarín, F., Gorin, G., Espinosa, A.** (2004). A Pleistocene stacked succession of volcanoclastic mass flow in Central Colombia: the Quindío-Risaralda fan. In: Allard *et al.* (Ed.). Debris avalanche and debris flows in volcanic terrains. Origins, behaviors, and mitigation. *Acta Vulcanologica*. **16** (1-2): 109-124.
- Harper, J. L.** (1977). *Population Biology of Plants*. London: Academic press. 892 p.
- Holdridge, L. R.** (1967). *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center. San José, Costa Rica. 206 p.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** (2017). Resultados monitoreo de la deforestación 2017. Fecha de consulta: entre febrero y marzo de 2019. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72115631/Actualizacion_cifras2017+FINAL.pdf/40bc4bb3-370c-4639-91ee-e4c6cea97a07
- IDEAM.** (2018). Estrategia integral de control a la deforestación. Actualización de cifras de monitoreo de bosques 2016. Fecha de consulta: entre febrero y marzo 2019. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/24277/0/Presentaci%97n+Estrategia+Integral+de+Control+a+la+Deforestaci%97n/173f79bf-3e68-4cbc-9387-80123d09b5e2>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).** (1996). Suelos Departamento del Quindío. CRQ, Armenia.
- Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente (INDERENA), IGAC, Corporación Nacional de Investigación Forestal (CONIF).** (1984). Mapa de Bosques de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Linares, E.L., Galeano, G., García, G., Figueroa, Y.** (2008). Fibras vegetales utilizadas en artesanías en Colombia. Artesanías de Colombia S.A., Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 328 p.
- Londoño, J.** (2002). El modelo de colonización antioqueña de James Parsons. Un balance historiográfico. *Fronteras de la Historia*. **7**: 187-226. Instituto Colombiano de Antropología e Historia Bogotá, Colombia. Fecha de consulta: entre octubre y noviembre de 2019. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/833/83307007.pdf>
- Marín-Gómez, O.H., Banguera, N.Y., Cardona, P.J.** (2009). Monitoreo de la avifauna amenazada del Aica Barbas-Bremen y evaluación de la población de pava caucana (*Penelope perspicax*) en el cañón del río Barbas. Reporte técnico. 111 p. Doi: 10.13140/RG.2.2.29951.61607
- Meyer, H.A.** (1952). Structure, growth and drain in balanced uneven-aged forests. *J. For.* **50**: 85-92.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MMADS).** (2015). Plan Nacional de Restauración. Restauración Ecológica, rehabilitación y recuperación de áreas disturbadas. Bogotá.
- Muñoz, H.** (1985). Proceso de poblamiento de Salento. Cfr. Congreso Nacional de Historia de la Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.
- Murcia, C. & Guariguata, M.R.** (2014). La restauración ecológica en Colombia: tendencias, necesidades y oportunidades. Documentos Ocasionales 107. Centro para la Investigación Forestal Internacional-CIFOR, Bogor, Indonesia. 86 p.
- NatureServe** (2007). Conservation status assessment. National and Subnational Conservation Status Ranks. Fecha de consulta: entre febrero y marzo de 2019. Disponible en: <http://www.natureserve.org/conservation-tools/conservation-status-assessment>
- Pizano, C. & García, H.** (Ed) (2014). El bosque seco tropical en Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Bogotá, Colombia. Fecha de consulta: en noviembre de 2020. Disponible en: http://infobosques.com/portal/wp-content/uploads/2016/01/BST_en_Colombia_FCF.pdf
- Popma, J., Bongers, F., Meave del Castillo, J.** (1988). Patterns in the vertical structure of the tropical lowland rain forest of Los Tuxtlas, Mexico. *Vegetatio*. **74**: 81-91.
- Rangel-Ch., J.O. & Velásquez, A.** (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En: Rangel-Ch., J., Lowey, P.D., Aguilar-P., M. (Ed). Colombia Diversidad Biótica II, tipos de vegetación en Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C. pp. 59-88.
- Richards, P.W.** (1996). *The tropical rain forest: an ecological study*. 2ed. Cambridge University Press, Cambridge, U.K. 575 p.
- Ríos, M., Giraldo, P., Correa, D.** (2004). Guía de frutos y semillas de la cuenca media del río Otún. Santiago de Cali: Fundación Ecoandina. 248 p.
- Roa-García, C.E.** (2018). Soil properties and land use affecting soil water dynamics in Andisols and Inceptisols at two mid-elevation sites in the Colombian Andes (tesis doctoral). University of British Columbia, Vancouver, Canadá. 159 p.

- Robles, V. C.** (2006). Diversidad vegetal en Donmatías. Caracterización de la diversidad y uso de la flora silvestre en el municipio de Donmatías- Antioquia. Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia. Fecha de consulta: entre octubre y noviembre 2019. Disponible en: http://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/FLORA/AIRNR_CN_6425_2005_Tomo%202.pdf
- Rodríguez, N., Armenteras, D., Morales, M., Romero, M.** (2006). Ecosistemas de los Andes colombianos. Segunda edición. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia, 154 p.
- Rojas-B, S.L.** (2017). Estructura y composición florística de la vegetación en proceso de restauración en los Cerros Orientales de Bogotá (Colombia). *Caldasia*, **39** (1): 124-139.
- Romero-M., A.** (2005). Propuesta metodológica para seleccionar especies pioneras leñosas con fines de restauración ecológica dentro de la Reserva Biológica Cachalú (Encino-Santander). *Colombia Forestal*. **9** (18): 52-59.
- Sánchez-Cuervo, A.M., Aide, T.M., Clark, M.L., Etter, A.** (2012). Land Cover Change in Colombia: Surprising Forest Recovery Trends between 2001 and 2010. *PLoS ONE*. **7** (8): e43943. Doi: 10.1371/journal.pone.0043943
- Sánchez, O., Peters, E., Marquez-Huitzil, R., Vega, E., Portales, G., Valdéz, M., Azuara, D.** (2005). Temas sobre restauración ecológica. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service, Unidos para la Conservación A.C. México. 256 p.
- Sánchez-T, J.A.** (2018). Composición y estructura de la vegetación en dos zonas de vida del Parque Nacional Natural Munchique (Tambo, Cauca, Colombia). *Revista Novedades Colombianas*. **13** (1): 21 -47.
- Sanín, D. & Duque, C.A.** (2006). Estructura y composición florística de dos transectos localizados en la Reserva Forestal Protectora río Blanco (Manizales, Caldas, Colombia). *Boletín Científico - Centro de Museos - Museo de Historia Natural*. **10**: 45-75.
- Simmons, B.I., Sutherland, W.J., Dicks, L.V., Albrecht, J., Farwig, N., García, D., Jordano, P., González-Varo, J.P.** (2018). Moving from frugivory to seed dispersal: Incorporating the functional outcomes of interactions in plant-frugivore networks. *Journal of Animal Ecology*. **87**: 995-1007. Doi: 10.1111/1365-2656.12831
- Suárez, J., Roa-García, M.C., Brown, S., Vargas, W.** (2011). Inventario de plantas-pequeños humedales del Quindío. Fecha de consulta: entre octubre y noviembre de 2019. Disponible en: <https://lfs-plantas.sites.olt.ubc.ca/>
- Torres-Rodríguez, S., Díaz-Triana, J., Villota, A., Gómez, W., Avella-M., A.** (2019). Diagnóstico ecológico, formulación e implementación de estrategias para la restauración de un bosque seco tropical interandino (Huila, Colombia). *Caldasia*. **41** (1): 42-59.
- Treuer, T. L. H., Choi, J. J., Janzen, D. H., Hallwachs, W., Pérez-Aviles, D., Dobson, A. P., Powers, J. S., Shanks, L. C., Werden, L. K., Wilcove, D. S.** (2018). Low-cost agricultural waste accelerates tropical forest regeneration. *Restoration Ecology*. **26** (2): 275-283.
- Tryon, R. M.** (1970). The classification of the Cyatheaceae. *Contr. Gray Herb*. **200**: 3-53.
- Turbay-Ceballos, S., Maldonado-Lizarazo, C., Montalvo, E., Velásquez, H., Perdomo, J.C.** (2013). Lecciones de una experiencia de participación campesina en un proceso de restauración ecológica en el Parque Nacional Natural Las Orquídeas, Colombia. *Gestión y Ambiente*. **16** (1): 5-16.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).** (2012). Categorías y Criterios de la Lista Roja de la UICN, versión 3.1 Segunda Edición. Gland and Cambridge. 35 p.
- UICN** (2018). The UICN Red List of Threatened Species. Version 2018-2. Fecha de consulta: septiembre y octubre de 2019. Disponible en: <http://www.iucnredlist.org>
- Van Der Pijl, L.V.** (1982). Principles of dispersal in higher plants. 3th ed. Berlin: Springer-Verlag. 154 p.
- Vargas, O.** (2007). Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 189 p.
- Vargas, O.** (2011). Restauración ecológica: biodiversidad y conservación. *Acta biológica colombiana*. **16** (2): 221-246.
- Vargas, W.G.** (2002). Guía ilustrada de las plantas de las montañas del Quindío y los Andes Centrales. Centro Editorial, Universidad de Caldas, Manizales. 814 p.
- Vargas, W.G.** (2012). Los bosques secos del Valle del Cauca, Colombia: una aproximación a su flora actual. *Biota Colombiana*. **13** (2): 102-164.

-
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña, A.M.** (2006). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. 2ed. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, Colombia. 236 p.
- Westphal, C., Tremer, N., von Oheimb, G., Hansen, J., von Gadow, K., Härdtle, W.** (2006). Is the reverse J-shaped diameter distribution universally applicable in European virgin beech forests? *Forest Ecology & Management*. **223**: 75-83. Doi: 10.1016/j.foreco.2005.10.057
- Willson, M.F. & Traveset, A.** (2000). The Ecology of Seed Dispersal, Chapter 4. En: *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities*, 2nd edition. (Ed.) M. Fenner. CAB International. pp. 85-110.
- Yepes, A.P., del Valle, J.I., Jaramillo, S.L., Orrego, S.A.** (2010). Recuperación estructural en bosques sucesionales andinos de Porce (Antioquia, Colombia). *Rev. Biol. Trop.* **58** (1): 427-445.

Artículo original

Hongos ingoldianos de la parte media del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia

Ingoldian fungi of the middle section of the Gaira River, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia

Brayan Peñate-Carranza¹, Cesar E. Tamaris-Turizo¹, Jorge A. Luna-Fontalvo^{2,*}

¹Grupo de investigación en biodiversidad y ecología aplicada, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

²Grupo de investigación en manejo y conservación de fauna, flora y ecosistemas estratégicos neotropicales MIKU, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

Los hifomicetos acuáticos son hongos microscópicos que han sido poco estudiados en ríos tropicales y que cumplen un importante papel en la descomposición de la materia orgánica vegetal en los ecosistemas lóticos. El objetivo de este trabajo fue determinar los hifomicetos acuáticos presentes en la parte media del río Gaira (norte de Colombia). Se analizaron muestras cualitativas de espuma del río y de hojas de tres especies vegetales nativas dominantes en el área de estudio (*Ficus tonduzii*, *Zygia longifolia* y *Clusia multiflora*) almacenadas en el lecho del río. Se identificaron diez géneros que incluían cuatro especies: *Diplocladiella scalaroides*, *Heliscus submersus*, *Alatospora acuminata* y *Flabellospora crassa*. En la parte media del río Gaira se registraron por primera vez los géneros *Diplocladiella*, *Triscelophorus*, *Actinospora*, *Lemonniera*, *Alatospora*, *Flabellospora* y *Heliscus*. El estudio evidenció la gran diversidad de hifomicetos acuáticos de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Palabra clave: Hifomicetos acuáticos; Conidia; Espuma; Hojarasca; Sistema lótico.

Abstract

Aquatic hyphomycetes are microscopic fungi that have been poorly studied in tropical rivers. These fungi play an important role in the decomposition of vegetable matter within lotic ecosystems. The objective of this work was to identify the aquatic hyphomycetes of the middle section of the Gaira River (northern Colombia). We analyzed qualitative samples of the river foam and submerged leaves from three dominant native plant species of the study area (*Ficus tonduzii*, *Zygia longifolia*, and *Clusia multiflora*). Ten genera and four species were identified: *Diplocladiella scalaroides*, *Heliscus submersus*, *Alatospora acuminata*, and *Flabellospora crassa*. This is the first record of the genera *Diplocladiella*, *Triscelophorus*, *Actinospora*, *Lemonniera*, *Alatospora*, *Flabellospora*, and *Heliscus* in the Gaira River. Our results showed the lack of sampling effort for this biological group in the middle part of the Gaira River in the Sierra Nevada de Santa Marta.

Keywords: Aquatic hyphomycetes; Conidia; Foam; Leave litter; Lotic system.

Introducción

Los hongos ingoldianos poseen características evolutivas convergentes adaptadas a la vida acuática; una de las más destacadas es su capacidad de generar esporas dentro del agua, las cuales se producen en la fase asexual del ciclo de vida del hongo mediante el desarrollo de diásporas mitóticas conocidas como conidias (Reynolds, 1993; Kendrick, 1991; Webster, 1959; Webster & Davey, 1984). Su identificación se basa en su morfología sigmoide, tetra radiada, filiforme, fusiforme, enrollada y esférica. Presentan tres o más brazos desde la parte central, los cuales se alargan en diferentes direcciones; además, cada grupo posee un tipo de conidia con una morfología distintiva (Ingold, 1975).

Citación: Peñate-Carranza B, Tamaris-Turizo CE, Luna-Fontalvo JA. Hongos ingoldianos de la parte media del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):208-216, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1277>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Jorge A. Luna-Fontalvo;
juna@unimagdalena.edu.co

Recibido: 29 de julio de 2020

Aceptado: 17 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Los hifomicetos acuáticos habitan en zonas templadas y tropicales y se han descrito cerca de 335 especies (**Roldán & Honrubia**, 1988; **Roldán, et al.**, 1987; **Bärlocher**, 1992; **Goh & Hyde**, 1996; **Harrington**, 1997; **Czeczuga & Orłowska**, 1999; **Gönczöl, et al.**, 1999; **Prokhorov & Bodyagin**, 2007a, 2007b; **Shearer, et al.**, 2007; **Duarte, et al.**, 2015; **Fernández & Smits**, 2015). Sin embargo, los registros de hifomicetos en los trópicos son pocos debido a la falta de estudios, fallas en los métodos de muestreo, a las condiciones fisicoquímicas inapropiadas en las corrientes de agua y la competencia con otros microorganismos por el sustrato vegetal (**Graça, et al.**, 2016). Se conoce que la diversidad y la abundancia de los hifomicetos varía según el hábitat o bioma y se ha documentado que en los sistemas tropicales y subtropicales su diversidad es menor en comparación con los sistemas de temperatura templada (**Shearer, et al.**, 2007; **Graça, et al.**, 2016; **Fernández, et al.**, 2010).

Un atributo de importancia ecológica de estos hongos es su capacidad para colonizar la madera y las hojas en los ríos, hecho que los convierte en pioneros en el proceso de descomposición del material vegetal inmerso en el agua, sustrato donde, posteriormente, se presenta una sucesión progresiva que se evidencia en el incremento del número de especies con el paso del tiempo (**Zhou & Hyde**, 2002; **Sanders & Anderson**, 1979; **Roldán, et al.**, 1989). Se ha documentado que el proceso de descomposición ocurre en tres etapas: lixiviación, condicionamiento y fragmentación (**Gimenes, et al.**, 2010). La etapa de condicionamiento es de gran importancia, pues representa la colonización del material vegetal por microorganismos – especialmente hongos ingoldianos – que descomponen sustratos sumergidos produciendo enzimas con actividad celulolítica, lignolítica, pectinolítica y proteolítica mediante la cual degradan polímeros de células vegetales como la celulosa, la hemicelulosa y las pectinas, entre otras (**Chamier**, 1985; **Abdel-Raheem & Ali**, 2004). Estos mecanismos favorecen el ciclo de los nutrientes que posteriormente ingresan en las redes tróficas al ser adquiridos por parte de los productores primarios (**Rosique, et al.**, 2018).

En muchos ríos tropicales de orden bajo la vegetación ribereña generalmente se encuentra bien conservada, lo cual genera un aporte importante de material vegetal a estos sistemas, en especial durante el periodo de sequía cuando se incrementa la senescencia de las hojas con lo que aumenta el aporte de material vegetal al río (**Fontalvo & Tamaris-Turizo**, 2018; **Fernández & Smits**, 2016; **Collantes, et al.**, 2014; **Roldán, et al.**, 1988). Por lo tanto, el estudio de los organismos que protagonizan esta actividad es de vital importancia para obtener información de base sobre su diversidad y el papel que tienen en los ríos tropicales del norte de Colombia.

Los estudios sobre la diversidad de hongos ingoldianos en Colombia son escasos. Durante los últimos diez años se han registrado 34 especies distribuidas en tres zonas del país: en el Caribe se han reportado cinco especies asociadas con la hojarasca presente en la parte baja del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta (**Luna**, 2009); en la región amazónica, se encontraron seis especies en muestras de espumas del río Hacha en Florencia, Caquetá (**Ruíz & Peláez**, 2013), y en el noreste del país, en Floridablanca, Santander, se han registrado 23 especies en muestras de espuma (**Narváez, et al.**, 2016).

Dada la importancia de este grupo de hongos acuáticos en los procesos de descomposición en los ecosistemas lóticos y la escasa información que se tiene de ellos en el norte de Colombia, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar las especies de hifomicetos acuáticos de la parte media del río Gaira en la Sierra Nevada de Santa Marta.

Materiales y métodos

Área de estudio

El muestreo se hizo en la parte media del río Gaira (sector nororiental de la Sierra Nevada de Santa Marta), en una zona conocida como Pozo Azul, localizada entre los 11° 08' 14,5" N y los 74° 06' 16,5" O, a una altitud de 750 m; la temperatura promedio del sitio es de 20,5 °C y la precipitación promedio anual de 2.491 mm (**Tamaris-Turizo, et al.**, 2013). La vegetación ribereña se encuentra bien conservada y entre las especies de plantas más

representativas están *Ficus tonduzii*, *Clusia multiflora* y *Zygia longifolia* (Gutiérrez, *et al.*, 2010). El cauce presenta zonas de corriente rápida y remansos, con predominio de rápidos. Cerca del sitio de muestreo se desarrollan actividades no intensivas de agricultura y aguas abajo del tramo estudiado se encuentra un reconocido balneario.

Toma de muestras

El muestreo se realizó en junio del 2018 durante el inicio de la temporada de lluvias en la zona. En los puntos de recolección de las muestras se midieron algunos parámetros fisicoquímicos del agua: pH (6,16), oxígeno disuelto (5,50 mg/L) y temperatura (18,4 °C). Se tomaron 20 hojas de cada especie (*F. tonduzii*, *Z. longifolia* y *C. multiflora*) que no exhibieran un estado evidente de descomposición de la hojarasca sumergida en el río en zonas de rápidos y remansos. Las muestras de hojarasca se guardaron en bolsas plásticas con cierre hermético y se depositaron en una nevera con hielo.

En el tramo se detectaron zonas en las cuales se formaba espuma entre las rocas y puntos turbulencia del agua debido a pequeñas cascadas (Narváez, *et al.*, 2016). En estos sitios se tomaron manualmente cerca de 150 mL de espuma empleando frascos estériles de 250 mL (cinco frascos para diferentes puntos de muestreo en la misma zona) (Figura 1). Las muestras se preservaron con etanol al 96 % y se mantuvieron refrigeradas (Descals, 2005; Narváez, *et al.*, 2016; Guerrero & Urdiales, 2016) hasta su traslado al laboratorio de la Universidad del Magdalena para su posterior análisis.

Preparación de muestras e identificación de hifomicetos

Se raspó la superficie de cada hoja con un cepillo de dientes previamente esterilizado; el producto del raspado se enjuagó con agua destilada sobre una caja de Petri. Terminado el lavado, se dispusieron las preparaciones microscópicas semipermanentes utilizando láminas portaobjetos sobre las que se depositaron entre 2 y 3 gotas por lámina, que se dejaron secar al aire. Luego, las preparaciones se trataron de manera separada con hidróxido de potasio (KOH) al 5 % y solución de azul de lactofenol al 1 % para determinar las conidias dematiáceas, y fucsina al 1 % para las hialinas (Smits, *et al.*, 2007). Las muestras de espuma se mezclaron manualmente y se les aplicó el mismo procedimiento para la tinción, es decir, se tomaron entre 2 y 3 gotas de espuma diluida por lámina (Ulloa & Hanlin, 2006; Amilcar, *et al.*, 2015; Guerrero & Urdiales, 2016; Fiuza & Gusmão, 2013). Los conidias se observaron en un microscopio Carl Zeiss™ Primo Star™ con 20 X y 40 X. La identificación se hizo mediante la comparación de la morfología de las conidias utilizando las claves de Ingold (1942, 1975), Von Arx (1981), Santos-Flores & Betancourt-López (1997) y Gulis, *et al.* (2005). Además, se consultaron las bases de datos del *National Center for Biotechnology Information* - NCBI (<https://www.ncbi>).

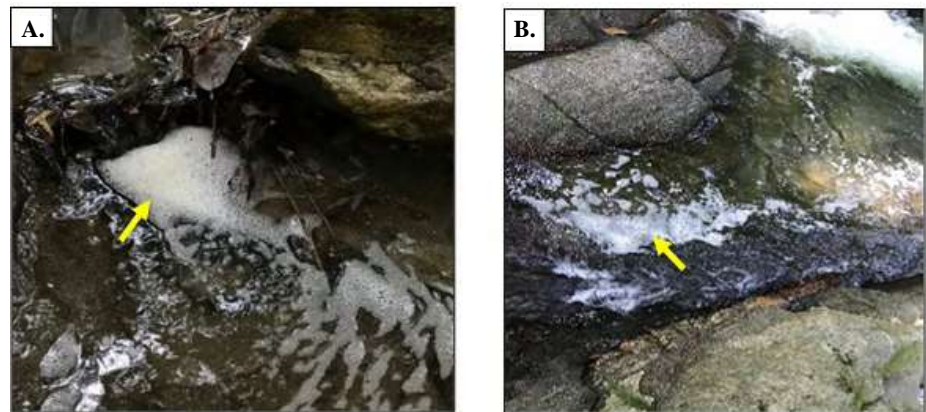


Figura 1. (A) Detalle de la espuma localizada en el tramo de muestreo formada por turbulencia y (B) por pequeñas cascadas

nlm.nih.gov/), de MYCOBANK (<http://www.mycobank.org/>) y el INDEX FUNGORUM (<http://www.indexfungorum.org/names/names.asp>) para confirmar los nombres de las especies y las sinonimias.

Resultados

Se determinaron los géneros de hifomicetos acuáticos *Campylospora*, *Diplocladiella*, *Triscelophorus*, *Actinospora*, *Lemonniera*, *Helicomycetes*, *Clavatospora*, *Alatospora*, *Flabellospora* y *Heliscus* asociados con la espuma y la hojarasca presentes en la parte media del río Gaira (**Tabla 1**) y se identificaron cuatro especies: *Diplocladiella scalaroides*, *Heliscus submersus*, *Alatospora acuminata* y *Flabellospora crassa*.

Todas los conidias se registraron en las muestras de espuma, en tanto que en las muestras de hojarasca solo se encontraron los géneros *Alatospora* y *Campylospora*, específicamente en muestras foliares de *F. tonduzii* (**Tabla 2**). En las muestras de *Z. longifolia* y *C. multiflora* no se encontraron hifomicetos (**Tabla 2**).

Tabla 1. Clasificación taxonómica de hifomicetos acuáticos asociados con la espuma y la hojarasca en el río Gaira

Clase	Orden	Familia	Género	Autor
Pezizomycetes	Pezizales	Pyronemataceae	<i>Actinospora</i>	Ingold (1975)
	<i>Incertae sedis</i>	<i>Incertae sedis</i>	<i>Diplocladiella</i>	Ingold (1975)
	<i>Incertae sedis</i>	<i>Incertae sedis</i>	<i>Flabellospora</i>	Ingold (1975)
Sordariomycetes	Microascales	Halosphaeriaceae	<i>Clavatospora</i>	Ingold (1975)
	Hypocreales	Nectriaceae	<i>Heliscus</i>	Ingold (1975)
	<i>Incertae sedis</i>	Hypocreomycetidae <i>Incertae sedis</i>	<i>Campylospora</i>	Ingold (1975)
Leotiomycetes	Helotiales	Leotiaceae	<i>Alatospora</i>	Ingold (1975)
	Helotiales	Discinellaceae	<i>Lemonniera</i>	Ingold (1942)
Dothideomycetes	Tubeufiales	Tubeufiaceae	<i>Helicomycetes</i>	Goos (1985)
Dothideomycetes <i>incertae sedis</i>	<i>Incertae sedis</i>	<i>Incertae sedis</i>	<i>Triscelophorus</i>	Ingold (1975)

Clasificación taxonómica según **Lumbsch & Huhndorf** (2007) y **Wijayawardene, et al.** (2018)

Tabla 2. Géneros de hifomicetos acuáticos asociados con la espuma y la hojarasca en la parte media del río Gaira. El símbolo + indica la presencia de la especie.

Género	Especie	Hojarasca			Espuma
		<i>F. tonduzii</i>	<i>Z. longifolia</i>	<i>C. multiflora</i>	
<i>Actinospora</i>					+
<i>Alatospora</i>	<i>A. acuminata</i>	+			+
<i>Campylospora</i>		+			+
<i>Clavatospora</i>					+
<i>Diplocladiella</i>	<i>D. scalaroides</i>				+
<i>Flabellospora</i>	<i>F. crassa</i>				+
<i>Helicomycetes</i>					+
<i>Heliscus</i>	<i>H. submersus</i>				+
<i>Lemonniera</i>					+
<i>Triscelophorus</i>					+

Discusión

La riqueza taxonómica de hifomicetos observada en el presente estudio representa un incremento de ocho géneros nuevos en el departamento del Magdalena (Luna, 2009). Al comparar estos hallazgos con los estudios de Mathuriau & Chauvet (2002) en la región andina, de Luna-Fontalvo (2009) en Santa Marta (parte baja del río Gaira) y de Narváez-Parra, *et al.* (2016) en Floridablanca, Santander, se pudo establecer que siete de los géneros son nuevos registros para el norte de Colombia: *Actinospora*, *Alatospora*, *Diplocladiella*, *Flabellospora*, *Heliscus*, *Lemonniera* y *Triscelophorus*, y de estos, *Actinospora* y *Diplocladiella* son nuevos registros para Colombia (Tabla 3).

En un estudio anual de evaluación de los hifomicetos de espuma en el río Chirgua en Venezuela, Fernández, *et al.* (2009) encontraron 44 especies distribuidas en varios géneros, de los cuales ocho coincidieron con los encontrados en este estudio, en tanto que dos fueron propios del río Gaira (*Actinospora* y *Lemonniera*). Por otro lado, en Panamá, Bärlocher, *et al.* (2010) registraron 34 especies de hifomicetos, de los cuales, los géneros

Tabla 3. Géneros y especies de hifomicetos acuáticos registrados para Colombia

Mathuriau & Chauvet (2002) (región andina)	Luna (2009) (Santa Marta- parte baja del río Gaira)	Narváez-Parra, <i>et al.</i> (2016) (Santander- Floridablanca)	Ruíz & Peláez (2013) (Región andino-amazónica)	Presente estudio
<i>Alatospora acuminata</i>	<i>Clavatospora tentacula</i>	<i>Anguillospora pseudolongissima</i>	<i>Pestalotia</i>	<i>Actinospora</i>
<i>Anguillospora longissima</i>	<i>Clavariopsis aquatica</i>	<i>Anguillospora longissima</i>	<i>Triscelophorus monosporus</i>	<i>Alatospora</i>
<i>Articulospora atra</i>	<i>Campylospora chaetocladia</i>	<i>Lemonniera</i> sp.	<i>Campylospora chaetocladia</i>	<i>Campylospora</i>
<i>Campylospora chaetocladia</i>	<i>Helicomycetes</i> sp.	<i>Alatospora</i> sp.	<i>Campylospora filicladia Nawawi</i>	<i>Clavatospora</i>
<i>Flagellospora curvula</i>	<i>Flagellospora curvula</i>	<i>Belthrania</i> sp.	<i>Mycofalcella calcarata</i>	<i>Diplocladiella</i>
<i>Heliscella stellata</i>		<i>Campylospora chaetocladia</i>	<i>Flabellospora acuminata</i>	<i>Flabellospora</i>
<i>Heliscus submersus</i>		<i>Scutisporus brunneus</i>		<i>Helicomycetes</i>
<i>Heliscus tentaculus</i>		<i>Campylospora filicladia</i>		<i>Heliscus</i>
<i>Lunulospora curvula</i>		<i>Flabellospora verticillata</i>		<i>Lemonniera</i>
<i>Mycocentrospora</i> sp		<i>Triscelophorus acuminatus</i>		<i>Triscelophorus</i>
<i>Nawawia filiformis</i>		<i>Campylospora párvula</i>		
<i>Tetracladium marchalianum</i>		<i>Helicomycetes</i> sp.1		
<i>Phalangispora constricta</i>		<i>Triscelophorus curviramifer</i>		
<i>Tripopermium camelopardus</i>		<i>Helicomycetes</i> sp.2		
<i>Tripopermium</i> sp.		<i>Tripopermium</i> sp.		
<i>Triscelophorus konajensis</i>		<i>Isthmologiospora</i> sp.		
		<i>Phalangispora constricta</i>		
		<i>Tripopermium porosporiferum</i>		
		<i>Varicosporium</i> cf. <i>giganteum</i>		
		<i>Weisneriomyces</i> sp.		
		<i>Trinacrium</i> sp.		
		<i>Clavatospora tentacula</i>		
		<i>Camposporium</i> sp.		

Diplocladiella, *Actinospora* y *Helicomyces*, estuvieron presentes en el río Gaira y no en Panamá. A pesar de que los ríos de Venezuela y Panamá poseen condiciones ambientales similares a las del río Gaira, se evidenciaron especies exclusivas de este río de la Sierra Nevada de Santa Marta.

En el Parque Nacional Cajas, de la provincia del Azuay, Ecuador, **Guerrero & Urdiales** (2019) identificaron 95 especies en tres microcuencas. Dicho estudio difiere de este en cuanto a las condiciones ambientales, pues la temperatura de su área de estudio fluctúa entre los 4 °C y los 14°C, a una altura de más de 3.000 m, en tanto que el área del presente estudio se localiza a los 750 m con una temperatura de 20,5 °C. Sin embargo, al comparar los dos estudios, se evidenció que la mayoría de los géneros registrados en este también se encontraron en Ecuador, con excepción de *Actinospora*, lo que permite deducir que estas especies de hongos están presentes en casi todas las regiones tropicales.

En Cuba, **Delgado-Rodríguez & Mena-Portales** (2004) recolectaron muestras en el río San Juan y otras localidades de la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario, en las cuales identificaron 33 especies de hifomicetos aero-acuáticos y seis ingoldianos en restos vegetales sumergidos y hojarasca de ambiente terrestre; cuatro de los géneros (*Diplocladiella*, *Triscelophorus*, *Diplocladiella*, *Campylospora*) también se encontraron en nuestro estudio.

En Serra da Jibóia, Brasil, **Barbosa, et al.** (2013) estudiaron los hifomicetos en ríos con temperaturas similares a las del presente estudio e identificaron 151 taxones en los cuales 136 de las especies correspondieron a hongos mitospóricos y 15 a ascomicetos meiospóricos; entre los hongos mitospóricos, 134 especies correspondían a hifomicetos, en tanto que el presente estudio solo *Helicomyces* coincidió con sus resultados, lo que evidencia que la coincidencia en las condiciones de temperatura y altitud no basta y que, al parecer, la distribución geográfica tiene un papel muy importante en la composición de las comunidades en determinado lugar.

Goh & Hyde (1996) han planteado que la eficiencia de la espuma al atrapar conidias puede estar relacionada con sus formas geométricas: las conidias tetrarradiadas son atrapadas más fácilmente que las conidias sigmoides y ovoides debido a que su forma favorece la flotabilidad y aumenta el área de contacto con la estructura de la espuma; en cuanto a las conidias con formas ovoides, esta afirmación se evidenció en el presente estudio, toda vez que la mayoría de conidias eran tetrarradiadas y correspondían a los géneros *Diplocladiella*, *Triscelophorus*, *Actinospora*, *Lemonniera*, *Helicomyces*, *Clavatospora*, *Flabellospora* y *Heliscus*.

Luna (2009) realizó un estudio local en la parte baja del río Gaira, en el sector de Puerto Mosquito, Santa Marta, donde, por primera vez, se registraron cinco especies de hifomicetos acuáticos para la zona norte de Colombia y solo tres géneros coincidieron con los encontradas en el presente trabajo: *Clavatospora*, *Campylospora* y *Helicomyces*, lo que refleja una variación en la composición de los géneros, pues aquí se reportan diez géneros para la parte media del río Gaira; además, los dos estudios difieren en las condiciones ambientales dado que uno se hizo en la parte media y el otro en la parte baja del mismo río.

Conclusiones

Los muestreos evidenciaron que en la parte media del río Gaira se presenta una importante riqueza taxonómica de hifomicetos acuáticos, lo cual permitió ampliar el número de registros de géneros en esta zona del país. En cuanto a los sustratos muestreados (hojarasca y espuma), en los dos se encontraron conidias, aunque más en la espuma de río, aspecto que debería explorarse en futuras investigaciones. Se requieren nuevos estudios para ampliar el conocimiento sobre la diversidad de microorganismos acuáticos, entre ellos los hifomicetos, en sistemas fluviales y su relación con los procesos de descomposición de la materia orgánica.

Agradecimientos

A Wilson Peñate Barros, por su apoyo financiero para el desarrollo de las actividades de campo y el acompañamiento técnico para llevar esta investigación a feliz término. A los integrantes del Grupo de investigación en biodiversidad y ecología aplicada (GIBEA), por el apoyo en las actividades de campo y laboratorio.

Contribución de los autores

BPC, CETT y JALF diseñaron los métodos de muestreo y participaron en la redacción del manuscrito. BPC y CETT recolectaron las muestras y las procesaron en el laboratorio. JALF confirmó la identificación de los organismos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Abdel-Raheem, A. M. & Ali, E. H.** (2004). Lignocellulolytic enzyme production by aquatic hyphomycetes species isolated from the Nile's delta region. *Mycopathologia*. **157** (3): 277-286.
- Amilcar, C., Castillo, Y. S., Hofmann, A. T.** (2015). Hifomicetos acuáticos asociados a hojarasca sumergida en el río Majagua, Chiriquí, Panamá. *Revista mexicana de micología*. **42**: 65-69.
- Barbosa, F. R., Raja, H. A., Shearer, C. A., Gusmão, L. F. P.** (2013). Some freshwater fungi from the Brazilian semi-arid region, including two new species of hyphomycetes. *Cryptogamie, Mycologie*. **34** (3): 243-258.
- Bärlocher, F.** (1992). The ecology of aquatic Hyphomycetes. Berlín: Springer Verlag. 117 p.
- Bärlocher, F., Helson, J. E., Williams, D. D.** (2010). Aquatic hyphomycete communities across a land-use gradient of Panamanian streams. *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*. **177** (3): 209-221.
- Chamier, A. C.** (1985). Cell-wall-degrading enzymes of aquatic hyphomycetes: a review. *Botanical Journal of the Linnean Society*. **91** (1-2): 67-81.
- Collantes, A., J. Castellanos-Barliza., Tamaris-Turizo, C.E.** (2014). Caída de hojarasca fina del bosque ribereño en la cuenca del río Gaira, Sierra Nevada de Santa Marta – Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. **5** (1): 171-184.
- Czeczuga, B. & Orłowska, M.** (1999). Hyphomycetes in the ice of water reservoirs. *Roczniki Akademii Medycznej w Białymstoku*. **44**: 64-75.
- Descals, E.** (2005). Diagnostic characters of propagules of Ingoldian fungi. *Mycological Research*. **109** (5): 545-555.
- Delgado-Rodríguez, G. & Mena-Portales, J.** (2004a). Hifomicetos (hongos anamórficos) de la Reserva Ecológica “Alturas de Banao” (Cuba). *Boletín de la Sociedad Micológica de Madrid*. **28**: 115-124.
- Delgado-Rodríguez, G. & Mena-Portales, J.** (2004b). Hifomicetos aero-acuáticos e ingoldianos de la Reserva de la Biosfera Sierra del Rosario (Cuba). *Boletín de la Sociedad Micológica de Madrid*. **28**: 105-113
- Duarte, S., Bärlocher, F., Pascoal, C., Cássio, F.** (2016). Biogeography of aquatic hyphomycetes: current knowledge and future perspectives. *Fungal Ecology*. **19**: 169-181.
- Fernández, R. & Smits, G.** (2015). Actualización de inventario de especies de hifomicetos acuáticos en Venezuela. *Gestión y Ambiente*. **18** (2): 153-180.
- Fernández, R. & Smits, G.** (2009). Registro de la presencia de hifomicetos acuáticos en ríos de la Cordillera de la Costa, Venezuela. *Interciencia*. **34** (8): 589-592.
- Fernández, R. & Smits, G.** (2016). Hifomicetos acuáticos en la cabecera del río Chirgua, Carabobo Venezuela. *Interciencia*. **41** (2): 110-113.
- Fernández, R., Smits, G., Pinto, M.** (2010). Características e importancia de los hifomicetos acuáticos y registro de especies en Venezuela. *Revista faraute de ciencia y tecnología*. **5**: 1-15.
- Fiuza, P. O., & Gusmão, L. F. P.** (2013). Ingoldian fungi from semiarid Caatinga biome of Brazil. The genus *Campylospora*. *Mycosphere*. **4** (3): 559-565.
- Fontalvo, J.A. & Tamaris-Turizo, C. E.** (2018). Calidad del agua de la parte baja del río Córdoba (Magdalena, Colombia), usando el ICA-NSF. *Intrópica*. **13** (2): 101-111.

- Gimenes, K. Z., Cunha-Santino, M. B. Da., Bianchini Jr. I.** (2010) Decomposição de matéria orgânica alóctone e autóctone em ecossistemas aquáticos. *Oecologia australis*. **14** (4): 1036-1073.
- Goh, T. K. & Hyde, K. D.** (1996). Biodiversity of freshwater fungi. *Journal of Industrial Microbiology*. **17** (5-6): 328-345.
- Gönczöl, J. Revay, A., Csontos, P.** (1999). Studies on the aquatic hyphomycetes of the Morgò stream, Hungary. *Archiv für Hydrobiologie*. **144** (4): 473-493.
- Goos, R. D.** (1985). A review of the anamorph genus *Helicomyces*. *Mycologia*. **77** (4): 606-618.
- Graça, M. A., Hyde, K., Chauvet, E.** (2016). Aquatic hyphomycetes and litter decomposition in tropical – subtropical low order streams. *Fungal Ecology*. **19**: 182-189.
- Guerrero, J. M., & Urdiales C. L. X.** (2016). Variación de las comunidades de hifomicetos acuáticos y tasa de descomposición de hojarasca en tres microcuencas altoandinas del sur del Ecuador (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- Guerrero-Bolaño, F., Manjarrés-Hernández, A., Núñez-Padilla, N.** (2003). Los macroinvertebrados bentónicos de Pozo Azul (cuenca del río Gaira, Colombia) y su relación con la calidad del agua. *Acta Biológica Colombiana*. **8** (2): 43-55.
- Gulis V., Marvanova L., Descals E.** (2005). An illustrated key to the common temperate species of aquatic hyphomycetes. In: Graça M.A, Bärlocher F, Gessner M.O. (eds), *Methods to Study Litter Decomposition*. Dordrecht, Springer, pp. 153-167.
- Gutiérrez, Y., Velásquez M. S., Carbonó de la Hoz E.** (2010). Composición florística ribereña de la cuenca del río Gaira, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*. **59**: 60.
- Harrington, J.** (1997). Aquatic hyphomycetes of 21 rivers in Southern Ireland. *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy*. **97B** (2): 139-148.
- Ingold, C.** (1942). Aquatic hyphomycetes of decaying alder leaves. *Transactions of the British Mycological Society*. **25** (4): 339-417.
- Ingold, C.** (1975). *Guide to Aquatic Hyphomycetes*. Freshwater Biological Association. Cumbria, England. Scientific publication, 30. p. 96.
- Kendrick B.** (1991). The history of conidial fungi. In: Cole G, Kendrick B (eds), *Biology of Conidial Fungi*. Academic Press, New York, pp. 3-18.
- Luna, J.** (2009). Hongos anamórficos acuáticos asociados a la hojarasca en el río Gaira de la costa del Caribe Colombiano. *Intrópica*. **4**: 37-43.
- Lumsch, H. T. & S. M. Huhndorf.** (2007). Outline of Ascomycota – 2007. *Myconet*. **13**: 1-58.
- Mathuriau, C. & Chauvet, E.** (2002). Breakdown of leaf litter in a Neotropical stream. *Journal of the North American Benthological Society*. **21** (3): 384-396.
- Narváez P. E. X., Jerez J. J. H., Santos F. C. J.** (2016). Hifomicetos ingoldianos del río Frío (Floridablanca), Santander, Colombia. *Revista Biota Colombiana*. **17** (2): 1-11.
- Prokhorov, V. & Bodyagin, V.** (2007a). The ecology of aero-aquatic hyphomycetes. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. **62** (1): 15-20.
- Prokhorov, V. & Bodyagin, V.** (2007b). Aquatic hyphomycetes from forests-Park Bitsa and Vorobiovy hills located on territory of Moscow city. *Biological Series*. **112** (2): 60.
- Reynolds D.** (1993). The fungal holomorph: an overview. En: Reynolds D, Taylor J (Eds.), *the Fungal Holomorph*. CAB International, Wallingford, pp. 15-25.
- Roldán A., Descals E., Honrubia M.** (1988). Hifomicetos acuáticos de sierra nevada y sierra de los Filabres. Málaga, España. *Acta Botánica Malacitana*. **13**: 77-90.
- Roldán A., Puig M., Honrubia M.** (1989). Comunidades fúngicas asociadas a sustratos leñosos en un río mediterráneo. *Annales de Limnologie*. **25**: 191-195.
- Roldán, A., Descals, E., Honrubia, M.** (1987). Hifomicetos acuáticos en las cuencas altas del río Segura y Guadalquivir. *Anales de Biología*. **13** (3): 3-13.
- Roldán, A. & Honrubia, M.** (1988). Nuevas citas de hifomicetos acuáticos en la cuenca del río Segura (España). *Anales de Biología*. **15** (4): 103-105.
- Rosique-Gil, E., Córdova Córdova, I. I., Cappello-García, S., Cid-Martínez, A.** (2018). Hongos ingoldianos de las cascadas del Parque Estatal Agua Blanca, Tabasco, México. *Scientia fungorum*. **47**: 3-11.
- Ruiz-Chala, G. A., & Peláez-Rodríguez, M.** (2013). Registro de hifomicetos acuáticos para la región andinoamazónica colombiana. *Biota Colombiana*. **14** (2): 336-339.
- Sanders, P. F. & Anderson, J. M.** (1979). Colonization of wood blocks by aquatic hyphomycetes. *Transactions of the British Mycological Society*. **73**: 103-107.
- Santos-Flores, C. & Betancourt-López, C.** (1997). Aquatic and water-borne Hypohomycetes (Deuteromycotina) in streams of Puerto Rico (including records from other Neotropical locations). *Caribbean Journal of Science Special Publication*. **2**: 1-116.

- Shearer, C. A., Descals, E., Kohlmeyer, B., Kohlmeyer, J., Arvanova, L., Padgett, D., Porter, D., Raja, A. H., Schmit, P. J., Thorton, A. H., Voglymayr H.** (2007). Fungal biodiversity in aquatic habitats. Berlin, Germany. *Biodiversity and Conservation*. **16**: 49-67.
- Smits, G., Fernández, R., Cressa, C.** (2007). Preliminary study of aquatic hyphomycetes from Venezuelan streams. *Acta Botánica Venezuelica*. **30**: 345-355.
- Tamaris-Turizo, C., Rodríguez-Barríos, J., Ospina-Torres, R.** (2013). Deriva de macroinvertebrados acuáticos a lo largo del río Gaira, vertiente noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Caldasia*. **35** (1): 149-163.
- Ulloa, M. & Hanlin, R. T.** (2006). *New illustrated dictionary of mycology*. Saint Paul (Minnesota), USA: American Phytopathological Society. 672 p.
- Von – Arx, J.** (1980). *The Genera of Fungi Sporulating in Pure Culture*. Vaduz, Liechtenstein: J. Cramer. 424 p.
- Webster, J.** (1959). Experiments with spores of aquatic hyphomycetes: I. Sedimentation, and impact on smooth surfaces. *Annals of Botany*. **23** (4): 595-611.
- Webster, J. & Davey, R. A.** (1984). Sigmoid conidial shape in aquatic fungi. *Transactions of the British Mycological Society*. **83** (1): 43-52.
- Wijayawardene, N. N., Hyde, K. D., Lumbsch, H. T., Liu, J. K., Maharachchikumbura, S. S., Ekanayaka, A. H., Tian, Q., Phookamsak, R.** (2018). Outline of Ascomycota: 2017. *Fungal Diversity*. **88** (1): 167-263.
- Zhou, D.Q. & Hyde, K.D.** (2002). Fungal succession on bamboo in Hong Kong. In: *Fungal Succession* (eds. K.D. Hyde and E.B.G. Iones). *Fungal Diversity*. **10**: 213-227.

Artículo original

Influencia de palizadas en la estructura del zooplancton en un embalse tropical

Influence of logjams in the structure of zooplankton in a tropical dam

Yesica Velásquez-Duque^{1,*}, Silvia Lucía Villabona-González², Hilda Palacio-Betancur³

¹ Grupo de investigación en biodiversidad y recursos naturales, BIONAT, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

² Grupo de investigación en limnología y recursos hídricos, Universidad Católica de Oriente, Rionegro-Antioquia, Colombia.

³ Grupo de investigación de Biología, programa de Ecología, Facultad de Ciencias y Biotecnología, Universidad CES, Medellín, Colombia

Resumen

Las palizadas son acumulaciones de madera en los cauces de los ríos y en sus llanuras de inundación de tamaño variable cuya composición depende de las características del bosque ripario. En este estudio se evaluó la influencia de la palizada formada en la cola del embalse Amaní en la estructura espacial y temporal del zooplancton durante las estaciones de sequía y lluvia del 2016 y su relación con el fitoplancton y las condiciones físicas y químicas influenciadas por la palizada. Se tomaron muestras de plancton y se determinaron las variables físicas y químicas en las zonas situadas antes, en el inicio, la mitad, el final y después de la palizada a lo largo del eje del embalse. Se registraron 64 taxones de los tres principales grupos de zooplancton (rotíferos, cladóceros y copépodos). Las diferencias espaciales y temporales en la densidad del zooplancton fueron significativamente diferentes y se relacionaron con la transparencia y la disponibilidad de algunos nutrientes. Los mayores valores de los descriptores de diversidad del zooplancton se estimaron en la mitad, al final y después de la palizada, probablemente porque esta ofrece mayor disponibilidad de hábitats, diversidad trófica y refugio. La comunidad presentó cambios temporales en la dominancia de taxones probablemente como consecuencia de las fluctuaciones del nivel del embalse durante las tres temporadas analizadas.

Palabras clave: Palizada; Diversidad alfa; Diversidad beta; Rotíferos; Microcrustáceos; Embalse.

Abstract

Log jams are accumulations of wood in riverbeds and floodplains of rivers with variable sizes whose composition depends on the characteristics of the riparian forest. We evaluated the influence of a log jam formed in the riverine zone of the Amaní reservoir on the spatial and temporal structure of the zooplankton during the dry and rainy seasons in 2016 and its relationship with the phytoplankton and the physical and chemical conditions. We took samples of plankton and physical and chemical variables in sites located before, in the beginning, the middle, the end, and after the log jam. A total of 64 taxa of the three major groups of zooplankton were recorded (rotifers, cladocerans, and copepods). The spatial and temporal differences in zooplankton densities were significant and related to the transparency and availability of some nutrients. The highest values of the zooplankton diversity were found in the middle, at the end, and after the log jam probably because it increased habitat heterogeneity, food availability, and refuge. The community presented temporary changes in the dominance of taxa possibly as a result of water level fluctuations in the reservoir level during the three seasons analyzed. The best conditions for zooplankton development were found in the middle, in the end, and after the log jam probably because it decreased the disturbance pressures and increased heterogeneity, food availability, and refuge. The community presented temporal changes in the dominance of taxa possibly as a result of water level fluctuations in the reservoir.

Keywords: Log jam; Alfa diversity; Beta diversity; Rotifers; Microcrustaceans; Reservoir.

Citación: Velásquez-Duque Y, Villabona-González SL, Palacio-Betancur H. Influencia de palizadas en la estructura del zooplancton en un embalse tropical. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):217-228, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1269>

Editor: Gabriel Roldán

***Correspondencia:**

Yesica Velásquez-Duque;
yesi.duquevela@gmail.com

Recibido: 14 de julio de 2020

Aceptado: 27 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Las palizadas son acumulaciones de madera en los cauces y en las llanuras de inundación de los ríos (**Fetherston, et al.**, 1995) cuyo tamaño y composición dependen de las características del bosque de ribera (**Comiti, et al.**, 2006). La incorporación de madera a los cauces se asocia con la caída de árboles de la vegetación ribereña debida a la mortalidad natural (edad, viento) y a la desestabilización de las orillas de las aguas corrientes por procesos erosivos (**Robison & Beschta**, 1990; **Wohl, et al.**, 2012).

Aunque históricamente las palizadas se han eliminado del cauce de los ríos, con el fin de mitigar las inundaciones y evitar alteraciones en la navegación (**Shields & Gippel**, 1995), en los últimos años se han introducido grandes cantidades de madera en sistemas lóticos de Europa, Estados Unidos, Australia y Canadá como una práctica de restauración fluvial (**Lester & Boulton**, 2008; **Biron, et al.**, 2018) para aumentar la estabilidad de la corriente, la complejidad geomorfológica (**Klaar, et al.**, 2009) y la retención de materia orgánica y así facilitar el enriquecimiento de las comunidades de peces e invertebrados (**Wagenhoff & Olsen**, 2014). Según **Baldwin, et al.** (2014) la presencia de los fragmentos de madera altera el potencial de incorporación de carbono en las redes tróficas, lo que implicaría cambios en las condiciones limnológicas relacionadas con la alcalinidad y el pH.

Entre los organismos que pueden asociarse con las palizadas se encuentra el zooplankton, cuya estructura se define como la forma en que una comunidad se distribuye en el espacio para aprovechar las condiciones que ofrece el ambiente en un momento dado (**Pianka**, 1982). Variables como el pH (**Sprules**, 1975), la conductividad eléctrica (**Pinto-Coelho, et al.**, 1998) y el oxígeno disuelto pueden afectar dicha distribución mediante la alteración del ciclo de vida y su desarrollo, así como de las tasas reproductivas (**Smith & Cooper**, 1982; **Branco & Cavalcanti**, 1998; **Bini, et al.**, 2008). Asimismo, en la escala temporal dichas comunidades dependen indirectamente de las lluvias y del viento (**Tundisi & Matsumura-Tundisi**, 2008). En sistemas de embalse las rápidas fluctuaciones del volumen (**Aranguren & Monroy**, 2014) y los ciclos estacionales modifican también la estructura de la comunidad y generan una sucesión en la composición de las especies (**Hutchinson**, 1967; **Edmondson & Litt**, 1982).

Aunque desde la década de los 70 del siglo pasado se incrementó la construcción de embalses en Colombia, la información disponible sobre la diversidad y la dinámica estacional del zooplankton en estos sistemas es aún limitada (**Herrera-Martínez & Guillot**, 1999; **Gallo-Sánchez, et al.**, 2004; **Guevara, et al.**, 2008; **Villabona-González, et al.**, 2015). No obstante, en estudios recientes se ha reportado un aumento en la diversidad funcional del zooplankton cuando el tiempo de retención de los embalses disminuye (<30 días) y aumentan la concentración de nutrientes, la productividad primaria, el oxígeno disuelto y el pH (**Barrera-Herrera, et al.**, 2020). Pero el conocimiento sobre la ecología de los rotíferos, cladóceros y copépodos (**Roldán & Ruiz**, 2001) es aún incipiente y no se dispone de información sobre la comunidad zooplanctónica en palizadas de embalses tropicales.

En este estudio se evaluó la influencia de la palizada en la estructura del zooplankton determinando la variación espacial y temporal de la comunidad durante los períodos secos y de lluvias en relación a la abundancia y composición del fitoplancton y las condiciones físicas y químicas asociadas con el efecto de la palizada. Si se parte de que la palizada y el periodo climático afectan las condiciones físicas y químicas del agua, se espera que se generen diferentes expresiones estructurales de la comunidad en la zona de influencia de la palizada que cambien en las diferentes épocas de muestreo.

Materiales y métodos

Área de estudio

El embalse Amani está ubicado en la vertiente oriental de la cordillera Central, al oriente del departamento de Caldas, Colombia (5°27' a 5°34' N; 74°56' a 74°53' O) y la palizada se encuentra ubicada en la cola del embalse, al ingreso del río La Miel (**Figura 1**). Aunque

el área de estudio presenta un patrón de lluvias bimodal, durante el 2016 se presentó un patrón unimodal debido al fenómeno de El Niño durante los tres primeros trimestres del año (IDEAM, 2017), por lo que los muestreos se realizaron en un periodo seco (febrero) y dos lluviosos (octubre: -lluvia y diciembre: +lluvia). La palizada es dinámica y durante las campañas su ubicación fue diferente, pues se desplazó con los cambios de nivel del embalse.

Se seleccionaron cinco zonas de muestreo (antes, en el inicio, en la mitad, en el final y después de la palizada) (Figura 1). En cada estación se tomaron muestras integradas de la subsuperficie, la mitad y el límite de la zona fótica y el fondo. La transparencia del agua se determinó con un disco de Secchi, la temperatura del agua, la conductividad eléctrica y el pH se midieron *in situ* con una sonda multiparamétrica Hanna® 9813-5 y el oxígeno disuelto con una sonda Ohaus® Starter 3000D. Los datos de las densidades de fitoplancton y las concentraciones de ortofosfatos (PO_4), nitratos (NO_3), sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos totales (ST) se obtuvieron del estudio “Evaluación de las condiciones hidrobiológicas en las palizadas del trasvase del río La Miel, en la Central Hidroeléctrica Miel I” (ISAGEN & Universidad de Caldas, 2016).

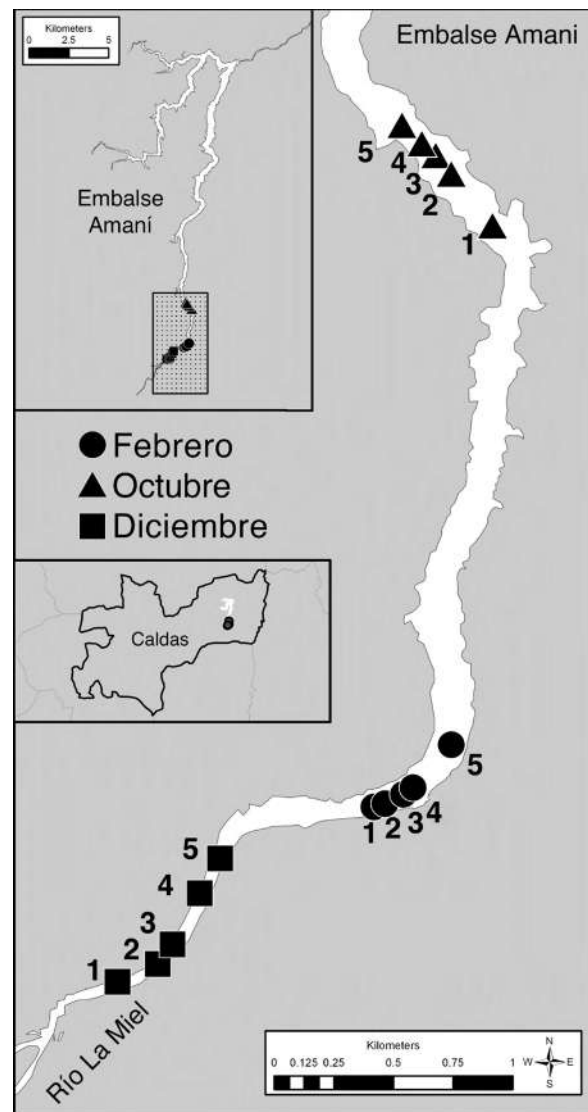


Figura 1. Localización geográfica del embalse Amani y ubicación de la palizada en las diferentes temporadas de muestreo. 1. Antes. 2. Inicio. 3. Mitad. 4. Final. 5. Después

En cada punto de muestreo se tomaron 30 litros de agua con una botella Schindler de 5 litros de capacidad que posteriormente se filtraron con un tamiz de 55 μm de poro. El material se almacenó y se fijó con solución Transeau (Tonolli, 1971). Para el conteo se tomaron cinco alícuotas de 1 ml utilizando una cámara Sedgewick-Rafter en un microscopio óptico invertido (Britton & Greeson, 1977). Para la identificación taxonómica se usaron claves específicas para rotíferos (Kosté, 1978; Kosté & Shield, 1987; Shield & Kosté, 1992; Segers, 1995; Segers, 2007; Paggi & Paggi, 2011; Joko, 2011), cladóceros (Paggi, 1995; El Moor-Loureiro, 1997; El Moor-Loureiro, *et al.*, 2004; Benzie, 2005; Elías, *et al.*, 2008) y copépodos (Sendacz & Kubo, 1982; Reid, 1985; Suárez-Morales, *et al.*, 1996; Gaviria, 2000).

Para evaluar el comportamiento espacial y temporal de la comunidad zooplanctónica se hizo un análisis de varianza bifactorial. Como primer factor se tomó la época de muestreo (febrero, octubre y diciembre), como segundo, la zona de muestreo (antes, inicio, mitad, final y después de la palizada) y como variable de respuesta, la densidad del zooplancton (ind/l). Para discriminar entre los grupos se usó el método de mínima diferencia significativa (*least significant difference*, LSD) de Fisher. Además, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple (previa estandarización de los datos) con la densidad del zooplancton (ind/l) como variable de respuesta y como variables explicativas cuantitativas y cualitativas el muestreo, la zona de muestreo, la precipitación, la cota del embalse, la profundidad total, las variables fisicoquímicas y la densidad del fitoplancton (ind/l). Los análisis se hicieron con el programa de R, versión 3.6.1. (R Project for statistical computing, Vienna, Austria).

Se calculó la diversidad bajo el mismo nivel de cobertura de muestreo, es decir, la proporción de la comunidad representada en la muestra (Chao & Jost, 2012), que varía entre 0 % - inventario incompleto - y 100 % - alta completitud - (Moreno, *et al.*, 2011). Para observar los cambios de la estructura de la comunidad entre los muestreos, se construyeron y compararon curvas de rango-abundancia. Se calcularon los índices de diversidad alfa y beta en términos de números equivalentes o números de Hill “ qD ” (Jost, 2006; Moreno, *et al.*, 2011). El análisis se hizo con el paquete iNEXT del programa de R, versión 3.6.1. (R Project for statistical computing, Vienna, Austria).

Resultados

Se contaron 8.451 individuos distribuidos en nueve órdenes, 20 familias y 64 taxones de rotíferos, cladóceros y copépodos, tres estadios larvales de copépodos (nauplios y copepoditos de Cyclopoida y Harpacticoida) y un protozoario de la familia Thecamoebidae (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1269/2937>). Los rotíferos dominaron la riqueza con 48 taxones de 13 familias, de las cuales Brachionidae, Lecanidae y Trichocercidae presentaron un mayor número de especies. Los cladóceros estuvieron representados por nueve taxones de las familias Chydoridae, Daphnidae, Ilyocryptidae, Moinidae y Sididae, y los copépodos por dos taxones de la familia Cyclopidae y un morfotipo de harpacticoida. Proporcionalmente, el 58 % correspondía a organismos de hábito bentónico y el restante 42 %, de hábito planctónico.

Durante el mes de febrero se cuantificaron 2.274 individuos y la densidad varió entre 4,2 ind/l en el inicio y 484,2 ind/l en la zona media de la palizada; en octubre se encontraron 3.823 individuos y la densidad fluctuó entre 6 ind/l antes y 667,50 ind/l en la zona media de la palizada, y en diciembre se registraron 2.355 individuos y la densidad varió entre 4 ind/l antes y 333,4 ind/l después de esta. Como se observa en la figura 2, la densidad mostró diferencias significativas entre zonas ($F=6,12$; $gl = 2$; $p= 0,0059$) y muestreos ($F=26,46$; $gl=4$; $p= 0,0000$). La interacción entre estos dos factores también fue significativa ($F=2,32$; $gl=8$; $p= 0,0450$).

Espacialmente, la prueba de grupos homogéneos evidenció dos grupos estadísticamente diferentes, uno conformado por las zonas ubicada antes y en el inicio de la palizada, con menor densidad zooplanctónica, y otro por las zonas de la mitad, el final y después de

esta, con las mayores densidades. En cuanto a los muestreos, se observó que en la mitad y después de la palizada el zooplancton fue significativamente más abundante en octubre que en diciembre (**Figura 3**).

Según el análisis de regresión lineal, no hubo una correlación significativa entre el zooplancton y la temperatura del agua, el oxígeno disuelto, el pH, la conductividad eléctrica, el fósforo total, los sólidos disueltos y totales, la precipitación, la cota del embalse y el fitoplancton. Por el contrario, el modelo ($R^2=67,4\%$) presentó mayor correlación con la transparencia y las concentraciones de ortofosfatos y nitratos: densidad del zooplancton (ind/l) = $89.9385 + 180.279 \cdot \text{Mitad_Palizada} + 116.621 \cdot \text{Transparencia} + 556.273 \cdot \text{PO}_4 \text{ (mg/l)} - 230.221 \cdot \text{NO}_3 \text{ (mg/l)}$.

La cobertura de muestreo en cada monitoreo fue superior al 98 %. En febrero los nauplios representaron el 53 % de la densidad total del zooplancton y dominaron en la mitad, el final y después de la palizada. Los copepoditos de *Cyclopoida* aportaron el 28 % de la densidad total y dominaron al final y después de la palizada. El protozoario *Thecamoeba* sp.(6 %) dominó en la mitad de la palizada. Los cladóceros *Alona* sp., *Ilyocryptus spinifer*, *Moina* sp. y *Diaphanosoma spinulosum* representaron el 0,01 % de la densidad total y se registraron principalmente en la mitad de la palizada (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1269/2938>).

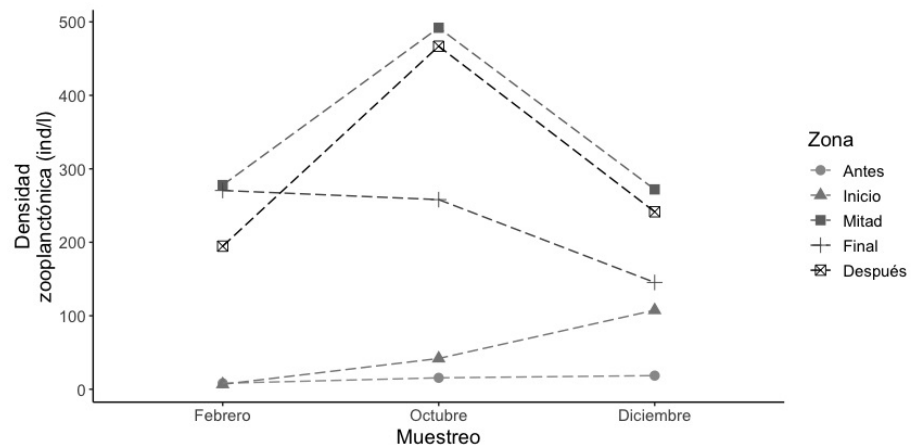


Figura 2. Análisis de varianza para la densidad del zooplancton en la palizada del embalse Amani durante febrero, octubre y diciembre de 2016 antes, en el inicio, la mitad, el final y después de la palizada

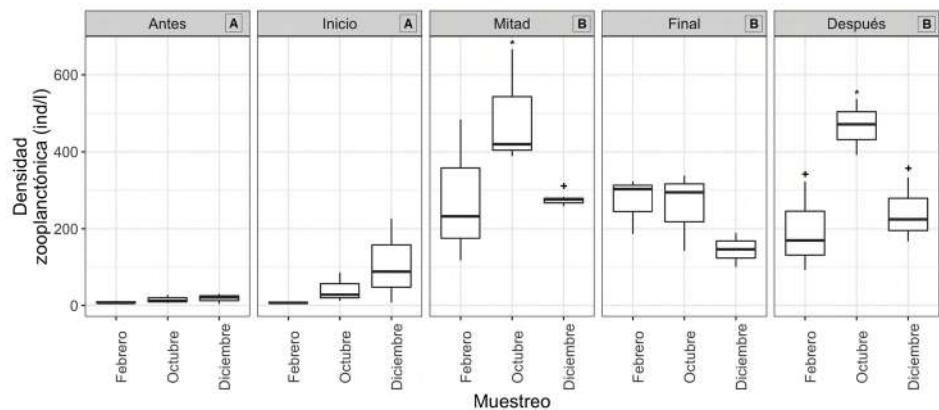


Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes de la densidad del zooplancton del embalse Amani antes, en el inicio, la mitad, el final y después de la palizada durante febrero, octubre y diciembre de 2016. Resultados significativos de la prueba de Fisher: **A.** grupo 1; **B.** grupo 2; * +

En octubre el rotífero *Ptygura libera* contribuyó con el 42 % a la densidad total y dominó en todas las zonas de muestreo, excepto antes de la palizada. Los nauplios aportaron el 26 % de la densidad en las estaciones ubicadas en la mitad de la palizada. Los copepoditos de Cyclopoida contribuyeron con el 19 % de la abundancia total y predominaron en las estaciones después de la palizada. Los cladóceros *Moina* sp., *Diaphanosoma spinulosum*, *Ceriodaphnia* sp., *Ceriodaphnia cornuta rigaudi* e *Ilyocryptus spinifer* aportaron el 0,6 % de la densidad total y se distribuyeron desde el inicio hasta el final de la palizada, pero especialmente en la mitad.

En diciembre cambió el patrón de la dominancia y el copépodo *Thermocyclops decipiens* contribuyó con el 24 % (28 % hembras) de la densidad total y dominó principalmente después, en el final y en la mitad de la palizada. Los nauplios aportaron el 23 % de la densidad total y dominaron en todas las zonas, excepto antes de la palizada, y los copepoditos de Cyclopoida alcanzaron el 17 %. Los cladóceros *Ceriodaphnia* sp., *Moina* sp., *C. cornuta rigaudi*, *Alona* sp. 1, *I. spinifer*, *Alona* sp. 3, *Alona* sp. 2, *D. spinulosum* y *Chydorus* sp. 1 contribuyeron con el 2 % de la densidad total y se registraron desde la zona después de la palizada hasta su inicio, encontrándose en mayor proporción en la mitad de la palizada.

La diversidad alfa de orden 0D fluctuó entre 8 y 38 taxones y durante los tres muestreos fue notablemente superior en la mitad de la palizada e inferior antes de esta. La diversidad de especies comunes (1D) presentó una variación de 2 a 10 taxones y la de especies dominantes (2D) de 2 a 7 taxones. Estos índices fueron similares en todas las zonas y temporadas monitoreadas ($CV < 42\%$); sin embargo, en febrero los valores mayores de orden 1D y de orden 2D se registraron después de la palizada. En octubre se registraron las mayores diversidades de orden 1D y de orden 2D antes y en el inicio de la palizada, y en diciembre el mayor número de especies comunes y dominantes se registró en el final y después de la palizada (**Figura 4**).

El máximo valor de diversidad beta (β), de 1,4, indica que en la palizada dominó una comunidad. Sin embargo, el mayor recambio de especies ${}^0\beta$ se registró entre febrero y diciembre y el menor, entre octubre y diciembre. Por su parte, para los órdenes ${}^1\beta$ y ${}^2\beta$ el mayor recambio de especies ocurrió entre octubre y diciembre y el menor, entre febrero y octubre, así como en febrero y diciembre.

Discusión

Los rotíferos mostraron mayor riqueza que los cladóceros y copépodos, lo cual también es usual en la zona de agua abiertas de los embalses (**Pulgarín, et al., 2020**). En este estudio las familias Brachionidae, Lecanidae y Trichocercidae registraron el mayor número de taxones, como ocurre generalmente en ambientes de agua dulce (**Aoyagui & Bonecker,**

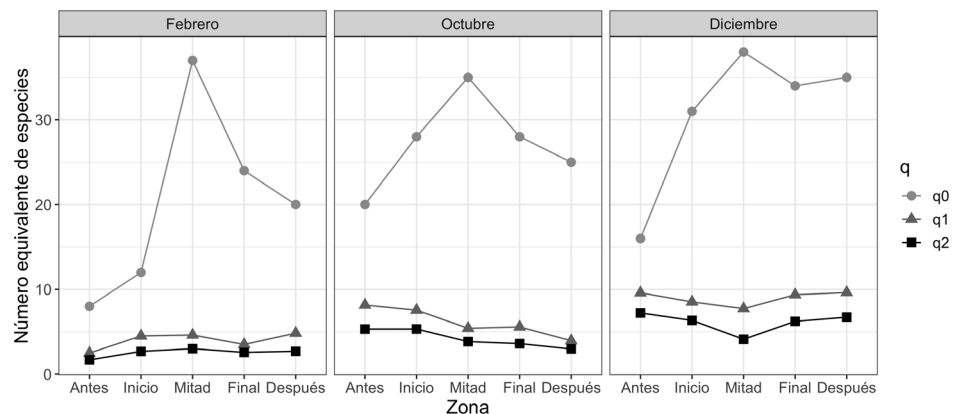


Figura 4. Perfil de diversidad alfa del zooplancton en la palizada del embalse Amaní durante febrero, octubre y diciembre de 2016

2004; **Mantovano, et al.**, 2015). Esta alta representatividad de rotíferos se ha reportado comúnmente en otros embalses tropicales (**Villabona-González**, 2012; **Aranguren & Monroy**, 2014), ya que los rotíferos reaccionan más rápidamente que otros grupos a cambios en las condiciones del agua por la facilidad que tienen de usar recursos tróficos de baja calidad (**Mangas & García**, 1991). Esta tendencia está asociada con hábitats fluctuantes sujetos a cambios temporales importantes de las condiciones físicas y químicas en sistemas acuáticos (**Esteves, et al.**, 2011).

Desde el punto de vista temporal, la densidad total del zooplancton fue similar, con excepción de la temporada lluviosa de octubre en la zona media y después de la palizada, cuando la comunidad fue significativamente más abundante. No obstante, esta diferencia no se relacionó con ninguna de las variables ambientales analizadas. Además, se observaron tres respuestas en la dominancia de taxones probablemente relacionadas con la fuerte sequía ocasionada por el fenómeno de El Niño durante los primeros tres trimestres del 2016, lo que provocó cambios temporales en el nivel de agua del embalse y la ubicación de la palizada. Al igual que lo hallado por **Aranguren & Monroy** (2014) en el embalse La Chapa, la fluctuación del volumen del sistema modificó la estructura de la comunidad generando un cambio en la composición de las especies en la palizada del embalse Amaní.

Aunque los nauplios (filtradores) dominaron en todos los muestreos, en febrero la densidad fue mayor. **Padovesi-Fonseca, et al.** (2002) reportaron el mismo comportamiento durante la época seca en el lago Paranoá (Brasil) y **Cole** (1966) sugirió que la presencia de un gran número de individuos en etapas jóvenes respondía a una estrategia de adaptación a entornos altamente inestables. Además, *T. decipiens* (depredador) registró una menor densidad en este monitoreo (99,47 ind/l) que en los siguientes, lo que coincidió con los bajos niveles de nitratos y fosfatos y refleja la incompatibilidad de *T. decipiens* con los ambientes de baja concentración de nutrientes (**Landa, et al.**, 2007).

En octubre, cuando se redujo la transparencia del agua y aumentaron los fosfatos, se registró una alta dominancia y frecuencia del rotífero detritívoro *P. libera* (**Nogradý, et al.**, 1993) y un leve aumento en la densidad de *T. decipiens*, principalmente de hembras. **Simões, et al.** (2008) encontraron que el predominio de hembras grávidas (*T. decipiens* y *Moina* sp.) puede indicar un gran esfuerzo reproductivo y una alta tasa de mortalidad. Este hecho parece estar asociado con el aumento de las lluvias y de la disponibilidad de nutrientes en el sistema (**Quitana, et al.**, 1998). Además, **Padovesi-Fonseca, et al.** (2002) encontraron que aunque las tasas de natalidad de *T. decipiens* se mantuvieron constantes durante todo su estudio, la población fluctuó significativamente entre la época seca y la de lluvias debido probablemente a la relación inversa entre el tiempo de desarrollo y el suministro de alimento.

En diciembre se incrementaron la precipitación, el nivel del embalse, la concentración de nitratos y la densidad del copépodo *T. decipiens*, en especial los machos. Según **Hutchinson** (1951), *T. decipiens* es una especie pionera, de gran dispersión, predominante en sistemas eutróficos y con una alta capacidad para colonizar nuevos ambientes (**Reid, et al.**, 1988; **Carvalho, et al.**, 1997). Según **Landa, et al.** (2007), esta especie se ve favorecida principalmente en épocas de lluvia, cuando el deterioro de la calidad del agua se asocia con la contaminación proveniente de las áreas agrícolas.

Por otro lado, en este mes se registró mayor riqueza de cladóceros, probablemente porque el sistema presentaba condiciones más estables que en los muestreos anteriores, pues se ha encontrado que este grupo tiene una relación negativa con la inestabilidad ambiental por su mayor tamaño y especificidad alimenticia (**Aranguren, et al.**, 2011). Aunque las poblaciones de *C. cornuta* son frecuentes y abundantes en distintos hábitats de agua dulce (**Fernando**, 1979; **Korinek**, 2002) con estados tróficos diferentes (**Sampaio, et al.**, 2002), estas pueden ser reguladas por variaciones en la calidad y la cantidad de los recursos (**Villalobos & González**, 2006). Según **Infante y Riehl** (1984) y **Sampaio, et al.** (2002), cuando hay bajas densidades de cianobacterias filamentosas *C. cornuta* se mantiene abundante, en tanto que con una elevada biomasa de cianobacterias su densidad

se reduce hasta desaparecer (**Infante & Rielh**, 1984). En este estudio *C. cornuta* no se registró en febrero, cuando las cianobacterias filamentosas presentaron la mayor densidad (**ISAGEN & Universidad de Caldas**, 2016).

Los resultados muestran que, a diferencia del zooplancton, el fitoplancton fue más abundante en la zona limnética libre de palizada, por lo que podría inferirse que la falta de correlación entre estas dos comunidades se debe a la poca luz para la fotosíntesis (**Esteves**, 1998) y al incremento de la competencia con algas perifíticas (**Jones, et al.**, 2002, **Joo, et al.**, 2007) en la palizada.

Durante todos los muestreos el mayor valor de diversidad alfa (0D) y el mayor número de individuos zooplanctónicos se registraron dentro de la palizada, en tanto que los menores valores se observaron en las estaciones ubicadas en el río La Miel. Esto probablemente se debió a que la palizada, al igual que las macrófitas acuáticas (**Colares, et al.**, 2013), disminuye la presión de las perturbaciones en el sistema (**Scheffer**, 1998) al ofrecer una gran disponibilidad de hábitats, refugios y nichos para el zooplancton y el zoobentos (**Fahd, et al.**, 2000; **Cottenie, et al.**, 2001; **Scheffer, et al.**, 2006). Además, la presencia de fragmentos de vegetación parece favorecer la condición léntica y la oferta trófica debido a la adhesión de algas perifíticas y a que el proceso de descomposición incrementa la disponibilidad de bacterias y hongos (**Triska & Cromack**, 1980; **Triska**, 1984) para los zoopláncteres de hábitos detritívoros.

En pocos estudios de comunidades zooplanctónicas se han utilizado los números efectivos de especies, que son las unidades de medición de la diversidad verdadera (**Jost**, 2006), pues durante años se han calculado índices como el de Shannon y Weaver que miden la entropía y no la diversidad de la comunidad como tal. En este estudio la diversidad de especies comunes (1D) y dominantes (2D) de zooplancton no presentó un patrón definido en espacio y tiempo, lo que coincide con estudios realizados en humedales urbanos y en diferentes embalses de la zona andina colombiana (**Hoyos Rincón, et al.**, en prensa, y **Giraldo-Giraldo**, 2019).

A pesar de los cambios en la estructura y la composición de especies en los distintos sitios y épocas de muestreo, según el índice de diversidad beta (β), la palizada estuvo dominada por una única comunidad. El recambio de especies fue mayor en los meses de febrero (sequía) y diciembre (+lluvias) y las especies compartidas fueron a la vez las más abundantes. Por el contrario, entre octubre (-lluvia) y diciembre (+lluvia) el recambio de especies fue menor y las especies compartidas fueron diferentes a las dominantes. **Hutchinson** (1961) menciona que el reemplazo de las especies en un ambiente está determinado por la exclusión generada por la competencia para obtener recursos, proceso que a la vez está regulado por los cambios estacionales en las condiciones ambientales. Así, la heterogeneidad ambiental parece ser más importante que los otros factores evaluados en la determinación de la diversidad beta (**Galir-Balkić, et al.**, 2018) y, en este caso, las diferencias parecen basarse en los rasgos funcionales de las especies (**Braghin, et al.**, 2018) y sus requisitos de nicho (**Bonecker, et al.**, 2009) (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1269/2937>).

Los resultados del estudio evidenciaron que la concentración de nutrientes, las aguas más claras, la heterogeneidad de nicho, la oferta trófica diversa y la disminución de las perturbaciones dentro de la palizada favorecieron la presencia de poblaciones zooplanctónicas más abundantes y una comunidad con mayor diversidad taxonómica, y que, desde la escala temporal, las diferencias en la estructura de la comunidad se relacionaron principalmente con el cambio de las especies dominantes.

Información suplementaria

Tabla 1S. Composición y hábitos de la comunidad zooplanctónica en la palizada del embalse Amaní. Vea la tabla S1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1269/2937>

Figura 1S. Curvas de rango-abundancia de especies del zooplancton en la palizada del embalse Amaní. Vea la tabla S1 en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1269/2938>

Agradecimientos

Los autores agradecen a ISAGEN y a la Universidad de Caldas por la financiación del proyecto, a Ana María Mesa, Patricia Jiménez y Milton Montaña por la colaboración en la recopilación de datos, a Beatriz Toro por la asesoría durante el desarrollo del proyecto y a Carmen Dussan por la asesoría del componente estadístico.

Contribución de los autores

YVD participó en el trabajo de campo, el proceso de organización de las bases de datos, el análisis de la información y la escritura del manuscrito.

SLVG e HPB contribuyeron en la revisión de las bases de datos y el análisis de los datos, y en el componente teórico y científico del manuscrito.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar.

Referencias

- Aoyagui, A. S. & Bonecker, C. C.** (2004). The art status of rotifer studies in natural environments of South America, floodplains. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*. **26**: 385-406.
- Aranguren, N. J., Guisande C., Ospina, R.** (2011). Factors controlling crustacean zooplankton species richness in Neotropical lakes. *Journal of Plankton Research*. **33**: 1295-1303
- Aranguren, N. J. & Monroy, J. D.** (2014). Zooplankton responses in a tropical system (La Chapa Reservoir, Colombia) with environmental stress. *Acta Biológica Colombiana*. **19**: 281-290.
- Baldwin, D. S., Whitworth, K. L., Hockley, C. L.** (2014). Uptake of dissolved organic carbon by biofilms provides insights into the potential impact of loss of large woody debris on the functioning of lowland rivers. *Freshwater Biology*. **59**: 692-702.
- Barrera-Herrera, J. A., Aranguren-Riaño, N., Páez-Ruiz, Y. M.** (2020). Incidencia del tiempo de retención hidráulica en el plancton del reservorio La Chapa (Santana, Boyacá), Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **44** (171): 407-422. Doi: 10.18257/raccefyn.1022
- Benzie, J.** (2005). Cladocera: The genus *Daphnia* (including *Daphniopsis*) (Anomopoda: Daphniidae). Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world, Volume 21. Leiden, The Netherlands: The Quarterly Review of Biology 80.
- Bini, L. M., Silva, L. C., Velho, L. F. M., Bonecker, C. C., Lansac-Tôha, F. A.** (2008). Zooplankton assemblages concordance patterns in Brazilian Reservoirs. *Hydrobiologia*. **598**: 247-255.
- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Massé, S.** (2018). The need for river management and stream restoration practices to integrate hydrogeomorphology. *Canadian Geographer*. **62**: 288-295.
- Bonecker, C.C., Aoyagui A.S.M., Santos R. M.** (2009). The impact of impoundment on the rotifer communities in two tropical floodplain environments: interannual pulse variations. *Braz J Biol*. **69**: 529-537.
- Braghin, L.S.M., Almeida, B.A., Amaral, D.C., Canella, T.F., Gimenez, B.C.G., Bonecker CC.** (2018). Effects of dams decrease zooplankton functional b-diversity in river-associated lakes. *Freshwater Biol*. **00**: 1-10. Doi: 10.1111/fwb.13117
- Branco, C. W. & Cavalcanti, C. G. B.** (1998). Ecologia das comunidades planctônicas no lago paranoá. En R. Henry. *Ecologia de reservatórios: estrutura, função e aspectos sociais* (576-595). Botucatu, Brasil: FAPESP/FUNBIO.
- Britton, L. J. & Greeson, P. E.** (1977). Methods for collection and analysis of aquatic biological and microbiological samples. In T.A. Ehlke, G.A. Irwin, B.W. Lium, and K.V. Slack. *Techniques of Water-Resources Investigations 05-A4* (113-119) Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Fecha de consulta: 5 de octubre del 2015. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/twri/05a04-1977/report.pdf>
- Carvalho, M.C., Coelho-Botelho, M.J., Lamparelli, M.C., Roquetti-Humaitá, M.H., Salvador, M.E., Souza, C.R., Truzzi, A.** (1997). Spatial and temporal variations of chlorophylla, plankton and some physico-chemical factors at Billings Complex. *Biology of lakes and reservoirs*. **26**: 452-457.
- Chao, A. & Jost, L.** (2012). Coverage-based rarefaction and extrapolation, Standardizing samples by completeness rather than size. *Ecology*. **93** (12): 2533-2547.

- Colares, M.A.M., Bonecker, C.C., Simões, N.R., Alves, G.M., Lansac-Tôha, F.A.** (2013). Structure of the zooplankton communities in macrophytes stand of a Neotropical floodplain (the Paraná River, Brazil). *International Review of Hydrobiology*. **98**: 89-103
- Cole, G.A.** (1966). Contrasts among calanoid copepods from Permanent and temporary ponds in Arizona. *The American Midland Naturalist*. **76**: 351-368.
- Comiti, F., Andreoli, A., Lenzi, M.A., Mao, L.** (2006). Spatial density and characteristics of woody debris in five mountain rivers of the Dolomites (Italian Alps). *Geomorphology*. **78**: 44-63.
- Cottenie, K., Nuytten, N., Michels, E., De-Meester, L.** (2001). zooplankton community structure and environmental conditions in a set of interconnected ponds. *Hydrobiologia*. **442**: 339-350.
- Edmondson, W. T. & Litt, A. H.** (1982). *Daphnia* in Lake Washington. *Limnology and Oceanography*. **27**: 272-293.
- El Moor-Loureiro, L. M.** (1997). Manual de identificação de cladóceros límnicos do Brasil. Brasília, Brasil: Editora Universa - UCB. 156p.
- El Moor-Loureiro, L. M., Mendonça-Galvão, L., Padovesi-Fonseca, C.** (2004). New cladoceran records from lake Paranoá, central Brasil. *Braz. J. Biol.* **64**: 415-422.
- Elías, M., Suárez-Morales, E., Gutiérrez-Aguirre, M., Silva-Briano, M., Granados-Ramírez, J., Garfias-Espejo, T.** (2008). Cladocera y Copepoda de las aguas continentales de México. Guía ilustrada. México DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Esteves, F.** (1998). Fundamentos de limnología 2ª ed. Río de Janeiro, Brasil: Interciência. 226p.
- Esteves, F., Bozelli, R., Castelo, C.** (2011). Comunidade zooplanctônica. En F. Esteves. Fundamentos de Limnología 3ª ed. (523-577). Río de Janeiro, Brasil: Interciência. 790p.
- Fahd, K., Serano, L., Toja, J.** (2000). Crustacean and rotifer composition of temporary ponds in the Doñana National Park (SW Spain) during floods. *Hydrobiology*. **436**: 41-49.
- Fernando, C. H.** (1979). The freshwater zooplankton of Sri Lanka with a discussion of tropical freshwater zooplankton composition. *Hydrobiology*. **65**: 85-125.
- Fetherston, K. L., Naniman, R. J., Bilby, R. E.** (1995). Large woody debris, physical process and riparian forest succession in montane river networks of the Pacific Northwest. *Geomorphology*. **13**: 133-144.
- Galir-Balkić, A., Ternjej, I., Bogut, I.** (2018). Impact of habitat heterogeneity on zooplankton assembly in a temperate river-floodplain system. *Environ Monit Assess.* **190**: 143.
- Gallo-Sánchez, L. J., Gaviria-Melo, S., Ramírez-Restrepo, J. J.** (2004). Dinámica de la comunidad zooplanctónica (excepto protozoa) en la laguna del Parque Norte, Medellín (Antioquia, Colombia). *Actualidades Biológicas*. **26**: 231-241.
- Gaviria, S.** (2000). Guía de laboratorio para identificación de cladóceros, copépodos y rotíferos. Curso sistemática del zooplancton de las aguas continentales de Colombia. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia, Instituto de Biología. 13p.
- Giraldo-Giraldo, V.** (2019). Estructura de comunidades planctónicas y su relación con la calidad de agua en embalses Andinos Colombianos. Trabajo de grado, Ingeniería Ambiental. Universidad Católica de Oriente, Medellín, Colombia.
- Guevara, G., Lozano, P., Reinoso, G., Villa, F.** (2008). Horizontal and seasonal patterns of tropical zooplankton from the eutrophic Prado Reservoir (Colombia). *Limnologia*. **39**: 128-139.
- Herrera-Martínez, Y. & Guillot, G.** (1999). Composición taxonómica del zooplancton del embalse de Betania, Departamento del Huila, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. **4**: 5-19.
- Hoyos-Rincón, L., Osorio-Santa, N., Árias, L., Villabona-González, S.** (en prensa). Evaluación de la calidad del hábitat de dos humedales urbanos del Oriente antioqueño, con base en la estructura de las comunidades de fitoplancton y zooplancton.
- Hutchinson, G. E.** (1951). Copepodology for the Ornithologist. *Ecology*. **32**: 571-577.
- Hutchinson, G. E.** (1961). The paradox of the plankton. *The American Naturalist* **95** (882): 137-145.
- Hutchinson, G. E.** (1967). A treatise on limnology, introduction to lake biology and the limnoplankton. New York, London, Sydney: John Wiley & Sons. 1115p.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.** (2017). Boletín de monitoreo fenómeno El Niño y La Niña. Fecha de consulta: entre enero de 2016 y enero de 2017. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co>
- Infante, A. & Riehl, W.** (1984). The effect of Cyanophyta upon zooplankton in a eutrophic tropical lake (Lake Valencia, Venezuela). *Hydrobiologia*. **113**: 293-298.
- ISAGEN & Universidad de Caldas.** (2016). Evaluación de las condiciones hidrobiológicas en las palizadas del trasvase del río La Miel, en la Central Hidroeléctrica Miel I. Convenio 47/180.
- Joko, C. Y.** (2011). Taxonomia do rotíferos monogonontas da planície de inundação do alto rio Paraná (MS/PR). Maringá, Brasil: Universidad Estadual de Maringá. Fecha de consulta: 5 de octubre del 2015. Disponible em: <https://www.oceandocs.org/handle/1834/10063>

- Jones, J. I., Young, J. O., Eaton, J. W., Moss, B.** (2002). The influence of nutrient loading, dissolved inorganic carbon and higher trophic levels on the interaction between submerged plants and periphyton. *Journal of Ecology*. **90**: 12-24.
- Joo, Sungbae, Young, J., Park, S.** (2007). Inhibition of submerged macrophytes on phytoplankton - I. Field evidence for submerged macrophyte inhibition on phytoplankton biomass. *Korean J. Limnol.* **40**: 511-519.
- Jost, L.** (2006). Entropy and diversity. *Oikos*. **113**: 363-375.
- Klaar, M.J., Maddock, I., Milner, A.M.** (2009). The development of hydraulic and geomorphic complexity in recently formed streams in Glacier Bay National Park, Alaska. *River Research and Application*. **25**: 1331-1338.
- Korinek, V.** (2002). Cladocera. En C.H. FERNANDO. *A Guide to Tropical Freshwater Zooplankton - Identification, Ecology and Impact on Fisheries (69-122)*. Leiden, the Netherlands: Backhuys Publishers.
- Kosté, W.** (1978). Rotatoria, die Rädertiere Mitteleuropas, Überordnung Monogononta, ein Bestimmungswerk. Berlin, Alemania: Gebruder Bornträger. 673, 234 pls.
- Kosté, W., Shield R. J.** (1987). Rotifera from Australian Inland Waters. II Epiphanidae and Brachionidae (Rotifera, Monogononta). *Invertebrate Taxonomy*. **7**: 949-1021.
- Landa, G., Rodrigues, F., Rietzler, A., Maia-Barbosa, P.** (2007). *Thermocyclops decipiens* (Kiefer, 1929) (Copepoda, Cyclopoida) as indicator of water quality in the State of Minas Gerais, Brazil. *Archives of Biology and Technology*, **50**: 695-705.
- Lester, R. E. & Boulton, A. J.** (2008). Rehabilitating agricultural streams in Australia with wood, a review. *Environmental Management*. **42**: 310-326.
- Mangas, E. & García, H.** (1991). Seasonal fluctuations of zooplankton biomass in Lake Xólotlan (Managua). *Hydrobiological Bulletin*. **24**: 157-162.
- Mantovano, T., Leite, A. R., Fatoreto, S. L., Costa, B. C., Lansac-Tôha, F. A.** (2015). Rotifer community structure along a stretch under the influence of dams in the Upper Paraná River floodplain. Maringá. *Acta Scientiarum. Biological Sciences*. **37**: 281-289.
- Moreno, C. E., Barragán, F., Pineda, E., Pavón, N. P.** (2011). Reanálisis de la diversidad alfa, Alternativas para interpretar y comparar información sobre comunidades ecológicas. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. **82**: 1249-1261. Doi: 10.7550/rmb.28802
- Nogrady, T., Wallace, R. L., Snell, T. W.** (1993). Rotifera. Vol I, Biology, ecology and systematics. guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world. The Hague, Netherlands: SPB Academic Publishing. 299 p.
- Padovesi-Fonseca, C., Mendonça-Galvão, L., Pereira-Rocha, D. L.** (2002). Temporal fluctuation and reproduction of *Thermocyclops decipiens* (Copepoda, Cyclopoida) in an eutrophic lake of central Brasil. *Rev. Biol. Trop.* **50**: 57-68.
- Paggi, J. C.** (1995). Crustacea Cladocera. En E. C. Lopretto y G. Tell. *Ecosistemas de aguas continentales Tomo III (909-951)*. La Plata, Argentina: Ediciones Sur.
- Paggi, S., Paggi, J. C.** (2011). A new species of Polyarthra Ehrenberg, 1834 belonging to the vulgaris-group (Rotifera, Monogononta, Synchaetidae) from Argentina, with a key to the identification of species in the Neotropical Region. *Zootaxa*. **2828**: 51-57.
- Pianka, E. R.** (1982). *Ecología evolutiva*. Barcelona, España: Omega. S.A. 365p.
- Pinto-Coelho, R. M., Nunes, C. M., Barbeitos, M., Moraes, C. A., Guerra, S. T.** (1998). O impacto da Refinaria Gabriel Passos na estruturação da comunidade zooplancônica no reservatório de Ibirité, Betim, Minas Gerais. *Bios*. **6**: 11-19
- Quitana, X. D., Moreno-Amich, R., Comim, F.A.** (1998). Nutrient and plankton in a Mediterranean salt marsh dominated by incidents of flooding. Part 2, Response of the zooplankton community to disturbances. *J. Plankton Res.* **20**: 2109-2127.
- Reid, J. W.** (1985). Chave de identificação e lista de referências bibliográficas para as espécies continentais sulamericanas de vida livre da ordem Cyclopoida (Crustacea, Copepoda). *Bolm Zoologia*. **9**: 17-143.
- Reid, J.W., Pinto-Coelho, R. M., Giani, A.** (1988). Uma apreciação da fauna de copépodos (Crustacea) da região de Belo Horizonte, com comentários sobre espécies de Minas Gerais. *Acta Limnologica Brasiliensia*. **2**: 527-547.
- Ríos-Pulgarín, M. I., Benjumea-Hoyos, C. A., Villabona-González, S. L.** (2020). Cambios y tendencias en la limnología de un Sistema de embalses andino: 10 años de estudio de los ecosistemas del complejo Puchiná-San Lorenzo-Calderas. Rionegro, Antioquia. Fondo Editorial Universidad Católica de Oriente. 306 p.

- Robison, E. G. & Beschta, R. L.** (1990). Characteristics of coarse woody debris for several coastal streams of southeast Alaska, USA. *Can. S. Fish. Aquat. Sci.* **47**: 1686-1693.
- Roldán, G. & Ruiz, E.** (2001). Development of limnology in Colombia. In R.G. Wetzel y B. Gopal. *Limnology in Developing Countries* (69-119). International Society of Limnology.
- Sampaio, E.V., Rocha, O., Matsumura-Tundisi, T., Tundisi, J.G.** (2002). Composition and abundance of zooplankton in the limnetic zone of seven reservoirs of the Paranema River, Brasil. *Brasilian Journal of Biology.* **62**: 525-545.
- Scheffer, M.** (1998). *Ecology of shallow lakes*. London, England: Springer US. 357p.
- Scheffer, M., Van-Geest, G.J., Zimmer, K., Jeppesen, E., Sondergaard, M., Butler, M.G., Hanson, M., Declerck, S., De-Meester, L.** (2006). Small habitat size isolation can promote species richness, second-order effects on biodiversity in shallow lakes and ponds. *Oikos.* **112**: 227-231.
- Segers, H.** (1995). Rotifera 2: The Lecanidae (Monogononta). In H. J. Dumont, and T. Nogrady. *Guides to the identification of the microinvertebrates of the continental waters of the world 6*. The Hague, The Netherlands: SPB Academic Publishing. 226p.
- Segers, H.** (2007). Annotated checklist of the rotifers (Phylum Rotifera), with notes on nomenclature, taxonomy and distribution. *Zootaxa.* **1564**: 1-104.
- Sendacz, S. & Kubo, E.** (1982). Copepoda (Calanoida e Cyclopoida) de reservatórios do Estado de São Paulo. *Boletim do Instituto de Pesca.* **9**: 51-89.
- Shield, R. J. & Kosté, W.** (1992). Rotifera from Australian inland waters VIII. Trichocercidae (Monogononta). *Royal Society of South Australia Inc.* **116**: 1-27.
- Shields, F.D. & Gippel, C.J.** (1995). Prediction of effects of woody debris removal on flow resistance. *American Society of Civil Engineers, Journal of Hydraulic Engineering.* **121**: 341-354.
- Simões, N.R., Sonoda, S.L., Ribeiro, S.M.** (2008). Spatial and seasonal variation of microcrustaceans (Cladocera and Copepoda) in intermittent rivers in the Jequeizinho River Hydrographic Basin, in the Neotropical semiarid. *Acta Limnologica Brasiliensia.* **20**: 197-204.
- Smith, D. W. & Cooper, S. D.** (1982). Competition among Cladocera. *Ecology.* **63**: 1004-1015.
- Sprules, W.G.** (1975) Midsummer crustacean zooplankton communities in acid-stressed lakes. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada.* **32**: 389-395.
- Suárez-Morales, E., Reid, J. W., Liffé, T.M., Fiers, F.** (1996). Catálogo de los copépodos (Crustácea) continentales de la península de Yucatán, México. Quintana Roo, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Tonolli, V.** (1971). Methods of collection-Zooplankton. In W.T. Edmondson and G.G. Winberg. *A manual on methods for the assessment of secondary productivity in fresh waters International Biological Programme Handbook*. Oxford and Edinburgh: Blackwell Scientific Publications. **17**: 1-14.
- Triska, F.J.** (1984). Role of woody debris in modifying channel geomorphology and riparian areas of a large lowland river under pristine conditions, a historical case study. *Proceedings of the International Association of Theoretical and Applied Limnology (SIL).* **22**: 1876-1892.
- Triska, F.J. & Cromack, J.K.** (1980). The role of wood debris in forests and streams. In R.H. Waring. *Forests, fresh perspectives from ecosystem analysis* (171-190). Corvallis, Oregon: Proceedings of the 40th Annual Biology Colloquium Oregon State Univ. Pres.
- Tundisi, J.G. & Matsumura-Tundisi, T.** (2008). *Limnologia*. São Paulo, Brasil: Oficina de Textos. 632p.
- Villabona-González, S. L.** (2012). Variación en las escalas espacial y temporal de la estructura del zooplancton del embalse Riogrande II, Antioquia, Colombia y su relación con variables abióticas y grupos algales. Propuesta doctorado en biología. Medellín (Colombia), Universidad de Antioquia 57.
- Villabona-González, S. L., Ramírez-Restrepo, J. J., Palacio-Baena, J. A., Costa, B. C.** (2015). Respuesta de la biomasa zooplanctónica a los gradientes de estado trófico y precipitación de un embalse tropical. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.* **152**: 374-388.
- Villalobos, L. J. & González, R. E.** (2006). Estudios sobre la biología y ecología de *Ceriodaphnia cornuta* SARS, una revisión. *Interciencia.* **31**: 351-357.
- Wagenhoff, A. & Olsen, D.A.** (2014). Does large woody debris affect the hyporheic ecology of a small New Zealand pasture stream? *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research.* **48**: 547-559.
- Wohl, E., Bolton, S., Cadol, D., Comiti, F., Goode, J. R., Mao, L.** (2012). A two end-member model of wood dynamics in headwater neotropical rivers. *Journal of hydrology.* **462**: 67-76

Artículo original

Avifauna del interfluvio de la cuenca media Caquetá-Putumayo (Japurá-Içá), al sur de la Amazonia colombiana y su respuesta a la huella humana

Avifauna of the Caquetá-Putumayo (Japura-Içá) middle interfluvial region in the southern Colombian Amazon and its response to the human footprint

Orlando Acevedo-Charry^{1,*}, Flor Ángela Peña-Alzate^{2,4}, Jurgen Beckers³,
Mónica Cabezas⁴, Brayán Coral-Jaramillo⁵, Ottavio Janni⁶, David Ocampo⁷,
Sandra Milena Peñuela-Gomez⁸, Diego Rocha-López^{4,9}, Jacob B. Socolar¹⁰,
Zuania Colón-Piñero¹¹

¹ Asociación Colombiana de Ornitología & Colecciones Biológicas, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Villa de Leyva, Boyacá, Colombia

² Parque Nacional Natural La Paya, Putumayo, Colombia

³ Reserva Natural Isla Escondida, Vereda El Líbano, Orito, Putumayo, Colombia

⁴ Grupo de Observadores de Aves de Leguízamo – GOAL, Leguízamo, Putumayo, Colombia

⁵ Jardín Botánico Tabanok & Fundación Kindicocha, Sibundoy, Putumayo, Colombia

⁶ Via GG D'Amore 21, 81016 Piedimonte Matese CE, Caserta, Italia

⁷ Colecciones Biológicas, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Villa de Leyva, Boyacá, Colombia

⁸ Parque Nacional Natural La Paya & Asociación de Veterinarios de Vida Silvestre, Colombia

⁹ Asociación Quintí, Puerto Asís, Putumayo, Colombia.

¹⁰ Norwegian University of Life Sciences, Ås, Norway

¹¹ Reserva Natural Los Yátaros, Gachantivá, Boyacá, Colombia; Department of Biology, University of Florida, Gainesville, FL, Estados Unidos

Citación: Acevedo-Charry O, Peña-Alzate FÁ, Beckers J, *et al.* Avifauna del interfluvio de la cuenca media Caquetá-Putumayo (Japurá-Içá), al sur de la Amazonia colombiana y su respuesta a la huella humana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):229-249, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1307>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Orlando Acevedo-Charry;
acevedocharry@gmail.com

Recibido: 24 de septiembre de 2020

Aceptado: 16 de diciembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021

Resumen

La frontera sur de Colombia incluye extensos bosques amazónicos con diferentes grupos taxonómicos aún inexplorados. Presentamos una lista de especies de aves registradas entre los ríos Caquetá y Putumayo, o Japurá e Içá, a partir de la recopilación de datos históricos provenientes de especímenes biológicos y muestreos en campo realizados principalmente entre 2015 y 2020. Comparamos la diversidad taxonómica y funcional, así como el interés para el aviturista, en relación con un índice de huella humana que permite clasificar el grado de intervención antrópica. La lista incluye 531 especies distribuidas en 66 familias y 25 órdenes, siendo la familia Tyrannidae la de mayor riqueza. La diversidad taxonómica y el interés para el aviturista disminuyeron con el aumento del índice de huella humana, en tanto que la diversidad funcional no varió tan evidentemente con el grado de intervención humana. El refuerzo de estrategias de monitoreo participativo en las zonas rurales de Colombia puede contribuir al crecimiento económico local y tener alcances regionales de conservación que involucren áreas protegidas y otras zonas de importancia ecosistémica a la espera del establecimiento de programas de conservación participativos.

Palabras clave: Amazonia; Aves; Colombia; Huella humana; Inventario; La Paya; Lista de especies.

Abstract

The southern border of Colombia includes extensive Amazon forests with many taxonomic groups still unexplored. We present a list of bird species recorded between the Caquetá and Putumayo rivers, or Japurá and Içá, based on a compilation of records of historical data on biological specimens and samplings done between 2015 and 2020. We compared taxonomic and functional diversity, as well as the interest for avitourism, based on a human footprint index that allows classifying the degree



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

of human intervention. The list includes 531 species distributed in 66 families and 25 orders, where the Tyrannidae family had the greatest diversity. The taxonomic diversity and avitourism interest decreased as the human footprint index increased while the change in functional diversity was not so evident. Reinforcing participatory monitoring strategies in Colombian rural areas can support local economic growth with a regional conservation scope in protected areas or strategic ecosystems while participatory conservation programs are established.

Keywords: Amazon; Birds; Colombia; Human footprint; Inventory; La Paya; Species list.

Introducción

El contraste entre los altos niveles de biodiversidad esperada y su escasa documentación es evidente en el noroccidente de la cuenca amazónica colombiana. Salvo registros aislados (Acevedo-Charry, *et al.*, 2018), el departamento de Putumayo cuenta con un solo trabajo de compilación enfocado a la diversidad de mamíferos (Ramírez-Chaves, *et al.*, 2014). A esta falta de documentación se le suman las amenazas históricas y otras recientes a la biodiversidad de la región (Ruiz, *et al.*, 2007, Armenteras, *et al.*, 2019; Clerici, *et al.*, 2019) que afectan ecosistemas estratégicos y las dinámicas poblacionales de diferentes especies como producto de la transformación del hábitat (Santamaría-Rivero, *et al.*, 2016; Roque, *et al.*, 2018). Ello ha llevado a que la región noroccidental de la Amazonia haya sido priorizada para iniciar procesos de restauración (Garzón, *et al.*, 2020), contexto en el cual las exploraciones biológicas en estas zonas poco estudiadas y la publicación de los datos son fundamentales para el entendimiento, manejo y protección de la región.

En el 2010, la autoridad ambiental de la región (CORPOAMAZONIA) inició una serie de esfuerzos por establecer la figura de áreas de importancia para la conservación de las aves (AICA) en el departamento de Putumayo (Gutiérrez-Zamora, *et al.*, 2013). Estas iniciativas fomentaron las exploraciones ornitológicas en el Valle de Sibundoy, en la región andina del departamento (Acevedo-Charry, 2014; Acevedo-Charry & Coral-Jaramillo, 2017) y el piedemonte de la transición Andes-Amazonia en Mocoa y Villagarzón (Acevedo-Charry, *et al.*, 2017; López-Ordóñez, *et al.*, 2017), en las que se encontraron nuevos registros de aves para el país (*Glaudicum parkeri*; Acevedo-Charry, *et al.*, 2015). En las llanuras amazónicas del municipio de Leguízamo, en la cuenca media del río Putumayo (Ruiz, *et al.*, 2007), se iniciaron en el 2015 una serie de visitas para registrar la avifauna del municipio (Acevedo-Charry, *et al.*, 2016). A partir de estas visitas, se consolidó una iniciativa de monitoreo participativo en la que las comunidades locales han liderado recientes descubrimientos (Bonilla-Castillo, *et al.*, 2017; Peña-Alzate, *et al.*, 2020).

Las iniciativas de ciencia participativa deben fortalecerse a nivel local con el entrenamiento constante en buenas prácticas del uso de las herramientas para un mejor desempeño en el monitoreo de la naturaleza (Pocock, *et al.*, 2017, Kelling, *et al.*, 2019), y un efectivo monitoreo de la biodiversidad (Neate-Clegg, *et al.*, 2020). Los entrenamientos promueven nuevas generaciones de expertos o científicos locales que se apropian del proceso de generación de conocimiento. Esta información, acompañada de evidencia multimedia, permite confirmar identidades de especies fácilmente confundibles y conocer más a fondo aspectos de la historia natural de muchas especies (Acevedo-Charry, *et al.*, 2020). La articulación entre el monitoreo estructurado, la colaboración con científicos locales y la revisión constante de las plataformas de ciencia participativa mejoran el conocimiento de la biodiversidad de muchos grupos en Colombia (de Roux, *et al.*, 2019); esta colaboración es particularmente importante en áreas protegidas y en sus zonas de amortiguación (Gómez, *et al.*, 2020, Linares-Romero, *et al.*, 2020), en donde las observaciones de científicos locales están aportando significativamente al conocimiento y entendimiento de la biota colombiana (Peña Alzate, *et al.*, 2020). Sumado a esto, el apoyo al desarrollo económico local mediante el aprovechamiento sostenible de su biota en actividades como el aviturismo (Ocampo-Peñuela & Winton, 2017; Winton & Ocampo-Peñuela, 2018) abre el camino a una conservación basada en el desarrollo comunitario (Şekercioğlu, 2002).

Aunque la zona es de gran interés biológico, muy pocos estudios han documentado la biodiversidad de Leguízamo en el interfluvio Caquetá-Putumayo. Estos dos ríos, que se conocen en territorio brasilero como Iça y Japurá, son los principales afluentes desde Colombia a la gran cuenca de la Amazonia. En cuanto a conservación se refiere, hay dos áreas protegidas que incluyen el municipio de Leguízamo: 1) el Parque Nacional Natural (PNN) La Paya, de 422.000 ha, el cual no tiene programas de ecoturismo y ha restringido el acceso al público, y 2) la Reserva Forestal de la Amazonia, consolidada por la Ley 2 de 1959, de 10.784 km² (SINCHI, 2012). El primer estudio sobre un grupo biológico de Leguízamo se hizo en el PNN La Paya (Polanco-Ochoa, *et al.*, 2000). Más recientemente, algunos registros incidentales han corroborado este inventario de los mamíferos en el municipio (Acevedo-Charry, *et al.*, 2018). Otros recuentos de especies de diferentes grupos taxonómicos incluyen descripciones de una especie de escarabajo (Boucher & Salazar, 2016), informes técnicos (Peñuela-Gómez, *et al.*, 2019a) y una recopilación de la biodiversidad del corredor trinacional de áreas protegidas La Paya – Cuyabeno – Güeppí Sekime (Usma, *et al.*, 2016), con una escala muy amplia cuyo inventario ornitológico se centró en el complejo lagunar Lagartococha, entre Cuyabeno y Güeppí (Naranjo, *et al.*, 2016). En sentido amplio, en ese corredor trinacional se han hecho inventarios rápidos biológicos y sociales del *Field Museum*, en particular en el interfluvio Napo-Putumayo, al sur de este último, entre la Reserva de Producción Faunística Cuyabeno en Ecuador y la Zona Reservada Güeppí de Perú (Alverson, *et al.*, 2008). Por último, en abril del 2018 *Field Museum* hizo otro inventario rápido en la zona, esta vez al norte del río Caquetá (Pitman, *et al.*, 2018). Este panorama de inventarios deja el interfluvio Putumayo-Caquetá sin un compilado de registros de biodiversidad a pesar de su reciente exploración por parte de ornitólogos locales (Bonilla-Castillo, *et al.*, 2017; Peña-Alzate, *et al.*, 2020).

Presentamos una lista de los registros ornitológicos del interfluvio entre los ríos Putumayo y Caquetá, en el municipio de Leguízamo, que incluye datos del PNN La Paya. Nuestro interés es presentar una línea de base unificada para apoyar las gestiones de conservación y el manejo sostenible del territorio y su biodiversidad, de modo que puedan contribuir a futuras investigaciones sobre aves en esta zona de la Amazonia, así como a un desarrollo del turismo de naturaleza en la región. Para este fin, después de compilar la lista de especies con registros de aves analizamos su diversidad taxonómica y funcional en un gradiente de perturbación humana en la zona (Correa Ayram, *et al.*, 2020). Además, resaltamos intereses potenciales para la bioeconomía local y el aviturismo. Aspiramos, asimismo, a acordar procesos participativos con investigadores de otros grupos taxonómicos para explorar la región y compilar dicha información en aras de una buena gobernanza del territorio y el bienestar de los actores locales.

Materiales y métodos

Área de estudio y contexto histórico regional

Compilamos los registros de aves entre los ríos Caquetá (Japurá) y Putumayo (Iça) en sus cuencas medias en Colombia, entre los 00°36' N, 00°36' S y los 75°42', 74°00'41,5" O (Figura 1). Esta zona interfluvial pertenece políticamente al municipio de Leguízamo en Putumayo, departamento que, en general, se caracteriza por unidades vegetales típicas de la unidad biogeográfica del distrito Alto Putumayo y las ecorregiones de bosques húmedos del Napo, Purus Varzea e, incluso, de los bosques húmedos Solimões-Japurá (Hernández-Camacho, *et al.*, 1992, Olson, *et al.*, 2001, Ramírez-Chaves, *et al.*, 2014). El primer pueblo fue fundado en 1920 como Caucayá, en la desembocadura del río Caucayá al río Putumayo, pero fue devastado por un incendio en 1949 y trasladado al lugar que ocupa hoy. Para esa fecha se le dio el nombre de Puerto Leguízamo, pero en 1958 asciende a categoría de municipio y su nombre cambia a Leguízamo (De la Hoz, *et al.*, 2007).

Leguízamo es el municipio más grande del departamento de Putumayo, con 1.164.000 ha. Aunque la gran mayoría de su territorio contiene bosques amazónicos continuos, existen áreas afectadas histórica y recientemente por iniciativas extractivas que incluyen

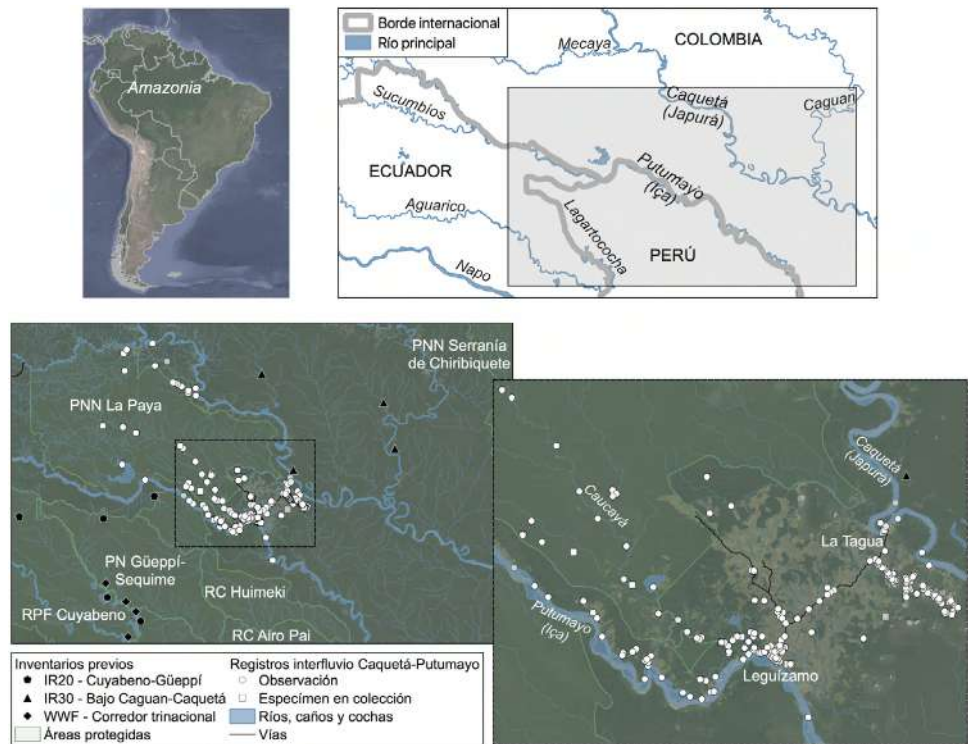


Figura 1. Mapa del área de estudio y registros de aves en el interfluvio entre los ríos Caquetá y Putumayo. Parte superior: área de estudio en Suramérica (izquierda) y las cuencas medias de los ríos mencionados (derecha). Parte inferior: detalle de los registros (izquierda), con un acercamiento o detalle particular de la zona con mayor concentración de registros (derecha). IR20: inventario rápido del *Field Museum* #20 (Alverson, et al., 2008), IR30: inventario rápido del *Field Museum* #30 (Pitman, et al., 2019), WWF: exploraciones del Fondo Mundial para la Naturaleza (Naranjo, et al., 2016)

el aprovechamiento de maderas, la cacería y el establecimiento posterior de ganadería extensiva. Dichas dinámicas han generado un cambio paisajístico en algunas zonas, estableciendo una matriz de fragmentación que corta la selva amazónica a lo largo de la vía entre el municipio de Leguizamo, sobre el río Putumayo, y el corregimiento de La Tagua, sobre el río Caquetá (Ruiz & Valencia, 2007), lo cual ha permitido el ingreso de elementos ajenos a la Amazonia que aprovechan la apertura de los bosques (Bonilla-Castillo, et al., 2017). Hacia la parte norte y occidente del municipio se documentan otras problemáticas de orden público por la presencia de grupos armados al margen de la ley, terrenos con minas antipersonales y establecimiento de cultivos ilícitos, específicamente sobre los caños Mecaya y Sencella, así como hacia la laguna de la Apaya y los centros poblados de Piñuña Negro, Piñuña Blanco, La Paya y Puerto Ospina (De la Hoz, et al., 2007). Cada uno de estos lugares ha tenido una referencia emblemática de la Amazonia de Putumayo y su representación biológica, pues han servido como localidad tipo de varios organismos, por ejemplo, *Piper putumayoense*, recolectado por primera vez en Puerto Ospina (Tropicos.org, 2020), o *Cheracebus medemi*, recolectado por primera vez en el río Mecaya (Herchkovitz, 1963).

Elaboración de la lista de aves

Para elaborar la lista de aves utilizamos registros biológicos y observaciones de campo. Realizamos una búsqueda de especímenes depositados en colecciones biológicas a partir de la infraestructura global de información de biodiversidad (*Global Biodiversity Information Facility* - GBIF), y encontramos las siguientes colecciones: colección de aves

del Instituto Humboldt (IAvH-A), *University of Michigan Museum of Zoology – Division of Birds* (UMMZ), *Los Angeles County Museum Vertebrate Collection* (LACM) y *Western Foundation of Vertebrate Zoology* (WFVZ) (GBIF, 2020). No incluimos tres de los registros por estar mal georreferenciados (del piedemonte de Putumayo) del *Museum of Vertebrate Zoology – University of California at Berkeley* (MVZ-Birds-140726 y 140707) y del *Museum of Comparative Zoology – Harvard University* (MCZ-Orn-235483). También incluimos una revisión física de la colección ornitológica del Instituto de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia (ICN) e IAvH-A.

Los registros provenientes de observaciones correspondieron a cuatro fuentes de datos: en el 2015 durante el proyecto de CORPOAMAZONIA (1), OAC hizo exploraciones ornitológicas que aportaron información preliminar (Acevedo-Charry, *et al.*, 2016) y se impartió entrenamiento de avistamiento de aves a cerca de 90 pobladores locales. Algunos de ellos (en particular FAPA, MC, DR) siguieron explorando varios lugares en Leguízamo como parte de las actividades de monitoreo participativo del Grupo de Observadores de Aves de Leguízamo (GOAL) y manteniendo una base de datos personal (2) (de FAPA y MC) que incluía registros dentro del PNN La Paya hechos conjuntamente con SMPG. Los registros dentro del PNN La Paya se enmarcaban en las acciones de prevención, vigilancia y control, investigación y monitoreo, así como de participación en eventos internacionales (*Global Big Day*, conteo de aves acuáticas) y de implementación del sistema de monitoreo de Parques Nacionales Naturales (SULA: <http://sula.parquesnacionales.gov.co>). Los observadores locales recibieron visitas esporádicas de algunos observadores de aves nacionales y extranjeros (BCJ, DR, JB, OJ) en Leguízamo (3). Estos registros fueron extraídos de la plataforma de registros ornitológicos para la ciencia participativa eBird (Sullivan, *et al.*, 2009). La plataforma eBird cuenta con un grupo de revisores a nivel nacional que intentan mantener la curaduría de los registros; para hacerlo con las observaciones provenientes de Leguízamo, OAC, DO y JBS (revisores de eBird) tuvieron especial interés en revisar cada uno de estos registros, algunas veces corrigiendo identidades con observaciones que contaban con documentación multimedia. Unificamos estos registros de eBird en una matriz que incluye datos hasta mayo del 2020 y, con el fin de no sobreestimar los registros, las listas compartidas (varios observadores en una sola jornada) se ajustaron a una sola con la función *read_ebd* del paquete *auk* en R (Strimas-Mackey, *et al.*, 2018) y eliminamos los registros duplicados. Por último, en el 2019 JBS estableció puntos de conteo en bosques y potreros dentro de un proyecto de colaboración entre el Instituto Humboldt y la *Norwegian University of Life Science* en Leguízamo (4). No incluimos en el total de especies aquellos registros identificados hasta género o en los que había dudas entre dos especies (con excepción de *Empidonax traillii/almorum* como se verá más adelante).

La mayoría de los registros a partir de observaciones surgieron de jornadas específicas y oportunistas de registro de las aves en diferentes hábitats de Leguízamo, durante caminatas en senderos, desplazamientos por río, registros incidentales o puntos estacionales. En el 2015 se complementaron los muestreos con la captura de aves usando 5 a 10 redes de niebla de 12 m, que se abrían esporádicamente en horas de la mañana (05:30 a 11:00) cuando el estado del tiempo lo permitía. Asimismo, cuando fue posible recolectamos aves y las depositamos principalmente en el ICN, aunque también en el IAvH-A.

Todas las aves se identificaron hasta el nivel de especie usando guías de referencia en campo (Hilty & Brown, 1986, Ayerbe-Quñones, 2018). La taxonomía se actualizó con la versión 1.3 del 7 de febrero de 2020 de la Asociación Colombiana de Ornitología (ACO, 2020), la cual sigue fundamentalmente a Avendaño, *et al.* (2017) con algunos ajustes sugeridos por Remsen, *et al.* (2020). Por ejemplo, aunque *Vireo olivaceus* es claramente un grupo polifilético (Slager, *et al.*, 2014) y su ajuste taxonómico ha sido sugerido en otros comités de clasificación como el norteamericano, aún no hay un consenso taxonómico en el comité suramericano de clasificación de aves (Remsen, *et al.*, 2020), por ello, al no tener certeza de haber registrado individuos migratorios boreales o residentes, en nuestros registros tratamos esta especie como *Vireo olivaceus* (*sensu*

lato aff. *chivi*). Los registros de las especies migratorias boreales *Empidonax traillii* y *E. alnorum* fueron consolidados en *E. traillii/alnorum*, dadas las dificultades de identificación en campo durante su migración, incluso en el caso de observadores experimentados (A. Bartels & N. Bayly, com. pers.).

Análisis del efecto de la huella humana

Debido a que la mayoría de los registros se concentraban entre el 2015 y el 2020, asignamos un valor de índice de huella humana (IHH) a cada punto de registro, estimando el promedio entre la evaluación espacio-temporal en Colombia en el 2015 (Correa Ayram, et al., 2020) y el 2018 (Correa Ayram, en preparación). Los valores del IHH se expresan en una escala entre 0 y 100, considerando un valor 0 para las áreas naturales y 100 para las áreas con máxima intervención humana.

Utilizando solo los datos de las observaciones, hicimos una curva de rarefacción para cuatro rangos del IHH para evaluar la representatividad de muestreo en cada rango de valor de la huella humana y así poder comparar con esa variable. Los rangos se escogieron para lugares con muy poca huella humana (IHH: <21), poca a media (IHH: 21-41), media a alta (IHH: 41-62) y alta (IHH: >62). Tomamos la decisión de contrastar rangos a manera de categorías del IHH, pues los registros no contaban con una unidad de muestreo constante (duración o distancia). Las rarefacciones se basaron en el número de individuos observados como interpolación dentro de cada rango del IHH, extrapolando hasta 20.000 individuos con 100 iteraciones de remuestreo por *bootstrap* a partir de los números de Hill $q=0$, $q=1$ y $q=2$ (Chao, et al., 2014). Cuando $q=0$, la diversidad de especies se expresó como riqueza de especies no sensible a la abundancia. Por su parte, cuando $q=1$, la diversidad se expresó en el valor exponencial del índice de Shannon, representando las especies comunes en el muestreo. Por último, cuando $q=2$, la diversidad se expresó en el inverso del índice de Simpson, representando las especies dominantes y que proporcionalmente contribuyen más a la diversidad. Debido a que podrían generar ruido en los análisis, no usamos especímenes de las colecciones ni de capturas, pues este tipo de información no incluye metodologías con sustento cuantitativo en nuestros datos, aunque sí se usaron para complementar el listado general.

Abundancias relativas

Desarrollamos un índice de abundancia relativa (IAR) que incluye la razón de abundancia (posible dominancia) y la razón de los días de registro (posible frecuencia de registros relacionada con la probabilidad de detección) de cada especie en los cuatro rangos del IHH. El índice se expresó con la ecuación (1):

$$IAR = \frac{(n_i/n_k) + (t_i/t_k)}{2} \quad (1),$$

donde n_i representa el número de individuos total reportados para la especie i , n_k el número de individuos total reportado para la especie más abundante k , t_i el número de días de registro de la especie i , y t_k el número de días de registro de la especie con más días de registros k en cada rango del IHH. A partir del IAR se hizo una curva de abundancia de rango para los cuatro rangos del IHH y contrastamos sus pendientes por medio de un análisis de varianza de dos vías (ANOVA) de los modelos lineales de la fórmula $\log_{10}(IAR) \sim \text{Especie} + \text{RangoIHH}$.

Análisis de recambio de especies

Evaluamos nuestra lista en los cuatro rangos del IHH en cuanto a los patrones de posible recambio de diversidad taxonómica, así como la posible pérdida de diversidad funcional en el gradiente de la huella humana del interfluvio Putumayo-Caquetá. El potencial recambio entre los listados de los cuatro rangos del IHH se evaluó utilizando el índice de disimilitud de Jaccard con el paquete *vegan* de R (Oksanen, et al., 2019): cuanto más altos los valores del índice de Jaccard, más alto el recambio o mayor la disimilitud (Jaccard, 1912). Para la diversidad funcional usamos la base de datos global de rasgos de Elton (Willman, et al., 2014), particularmente el estrato de forrajeo, la masa y la categoría de dieta de cada

especie, y contrastamos mediante un análisis de varianza de modelo lineal generalizado (GLM) que vinculaba la variable de respuesta (valor del rasgo) con el factor fijo de rangos del IHH (cuatro grupos). Cada GLM de los rasgos funcionales del estrato de forrajeo se vinculó con la función de enlace de distribución binomial, pero transformando la escala del valor del rasgo al dividir en 100 (de 0-100 a 0-1); el valor de masa se vinculó con la función del enlace de distribución gamma debido a la distribución de los datos (los modelos se seleccionaron al comparar los valores del criterio de información de Akaike, AIC, entre diferentes modelos). La masa de las especies en cada categoría de dieta también se vinculó con la función del enlace de distribución gamma. El GLM del número de especies de cada categoría de dieta se vinculó con la función del enlace de la distribución de Poisson. Para determinar las diferencias entre rangos, usamos una prueba *post-hoc* de comparación múltiple de Tukey.

Dado que varios de los registros en Leguízamo provenían de actividades de aviturismo, también evaluamos la diversidad de aves en relación con este importante componente de la conservación ambiental actual (Şekerciöglu, 2002). Asignamos a cada especie la categoría de amenaza global de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y la categoría de amenaza nacional de los Libros rojos de Colombia (Renjifo, *et al.*, 2014, 2016). Es posible que la región amazónica no contenga muchas “aves de alto valor” para aviturismo (es decir, endémicos y amenazados) en comparación con la región andina y sus estribaciones (Ocampo-Peñuela & Winton, 2017), así que realizamos un análisis más amplio considerando otros factores en el segmento de posibles visitantes en escenarios de aviturismo. Incluimos el interés de cada especie reportada dentro de cuatro categorías de posibles visitantes: 1) ocasional: con poco interés específico por las aves, pocas destrezas para identificarlas, pero vocación y admiración por la actividad como pasatiempo dentro de planes ecoturísticos generales; 2) interesado: similar al ocasional, pero con un poco más de destrezas e interés particular por las aves y la actividad; 3) entusiasta: con mucho interés por las aves y la posibilidad de hacer viajes exclusivos para observarlas, aunque sus destrezas son menos agudas que las del siguiente grupo, lo cual lo hace menos exigentes, y 4) avanzado: son aquellos avituristas experimentados, con actitud coleccionista, que destinan menos tiempo en el campo, pues buscan principalmente especies raras y difíciles de ver. Comparamos las especies estimadas para cada categoría de aviturista con los cuatro rangos del IHH mediante una prueba de ji al cuadrado.

Resultados

Detectamos registros de 531 especies de aves de 66 familias y 25 órdenes en el interfluvio entre los ríos Caquetá y Putumayo a la altura media de la cuenca en Colombia (Tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2962>). Las cuatro familias con mayor número de especies pertenecen al orden más diverso de aves, Passeriformes (283 especies), y fueron Tyrannidae (61), Thamnophilidae (49), Thraupidae (44) y Furnariidae (33). De las 531 especies reportadas, hay 17 con algún riesgo de amenaza a nivel nacional o internacional (Tabla 1).

Compilamos 18.203 registros de 69.899 individuos de aves entre los años 1947 y 2020 (Figura 2). El mayor número de registros provino de observaciones, con 17.986 registros de 69.682 individuos para 524 especies entre el 2015 y 2020 (Figura 2). El primer registro de aves de Leguízamo provino de colecciones biológicas en 1947 (*Laterallus exilis*, ICN-01317). Luego hubo poca representación de este tipo de información, que en general ha recibido mucho menos atención que las observaciones recientes (127 especímenes Vs. 17.986 observaciones). Determinamos cinco años principales de registros por especímenes biológicos: el 2015 con 41 especímenes durante el proyecto de CORPOAMAZONÍA depositados en ICN; 1994, con 23 especímenes de William Piragua recolectados durante una expedición de la Fundación Natura al PNN La Paya (la misma expedición reportada por Polanco-Ochoa, *et al.*, 2000, pero sin datos publicados para aves) y depositados en el ICN; 1968, con 19 especímenes, y 1969 y 1973 con 10 especímenes. En estos tres años los

Tabla 1. Relación de especies con riesgo de amenaza a nivel internacional (IUCN) y nacional (Libros rojos) registradas en el interfluvio Caquetá-Putumayo en Leguízamo, Putumayo, Colombia

Orden	Familia	Especie	IUCN	Libros rojos
Tinamiformes	Tinamidae	<i>Tinamus tao</i>	VU	No evaluado
		<i>Tinamus major</i>	NT	No evaluado
		<i>Tinamus guttatus</i>	NT	No evaluado
Galliformes	Odontophoridae	<i>Odontophorus gujanensis</i>	NT	No evaluado
Columbiformes	Columbidae	<i>Patagioenas subvinacea</i>	VU	No evaluado
Gruiformes	Psophiidae	<i>Psophia crepitans</i>	NT	No evaluado
Charadriiformes	Scolopacidae	<i>Calidris subruficollis</i>	NT	No evaluado
Pelecaniformes	Ardeidae	<i>Agamia agami</i>	VU	No evaluado
		<i>Zebrilus undulatus</i>	NT	No evaluado
Accipitriformes	Accipitridae	<i>Harpia harpyja</i>	NT	NT
Piciformes	Ramphastidae	<i>Ramphastos tucanus</i>	VU	No evaluado
	Picidae	<i>Celeus torquatus</i>	NT	No evaluado
Psittaciformes	Psittacidae	<i>Touit huetii</i>	VU	No evaluado
		<i>Pyrrhula barrabandi</i>	NT	No evaluado
		<i>Amazona festiva</i>	NT	No evaluado
		<i>Amazona farinosa</i>	NT	No evaluado
Passeriformes	Thamnophilidae	<i>Thamnophilus praecox</i>	NT	No evaluado

NT: casi amenazado, VU: vulnerable

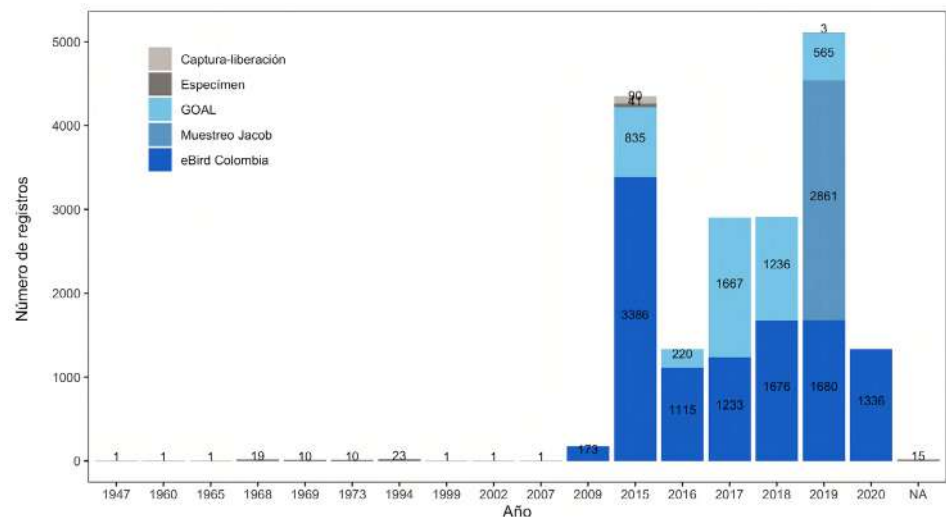


Figura 2. Historia de registros de aves en el interfluvio Caquetá-Putumayo en Leguízamo. Los números en cada barra indican el número total de registros por año y el color, el tipo de registro; las observaciones incluyen aquellas hechas por el Grupo de Observadores de Aves de Leguízamo (GOAL), eBird Colombia y puntos de conteo de JBS. NA: especímenes sin año de registro

especímenes se registraron principalmente en las expediciones de Cornelis J. Marinkelle, Jorge Morales, Carlos Chaparro, Hernando Chiriví y Jorge Mora, y se depositaron en varios museos (IAvH-A, UMMZ, LACM, WFVZ). No se consignó la información sobre el año de recolección de 15 especímenes, la mayoría proveniente de la localidad Quebrada La Nutria en el PNN La Paya, territorio indígena Siona, cabildo Bajo Casacunte (coordenadas

aproximadas 0°07'45" S y 75°01'12" O). Los especímenes del 2015 provinieron de capturas esporádicas con redes de niebla, las cuales acumularon 90 registros con la subsecuente liberación. Corroboramos la identidad de individuos de *Neopipo cinnamomea* (IAvH-A-15306), *Pteroglossus azara* (IAvH-A-1529) y dos individuos de *Forpus xanthopterygius* (WFVZ-23062, WFVZ-23063) que estaban en el GBIF como *Forpus conspicillatus*, especie poco probable incluso en Leguizamo (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>). Cinco de las especies se registraron con un único espécimen: *Picumnus rufivertex* (ICN-32183), *Sclerurus caudacutus* (ICN-32181), *Grallaria guatimalensis* (ICN-33287), *Terenotriccus erythrurus* (ICN-32182) y *Sporophila minuta* (UMMZ-216542), todas de interior de bosque y muchas veces difíciles de registrar, excepto *S. minuta*, cuya identidad podría haberse confundido con *Sporophila castaneiventris*, muy común en las áreas abiertas de Leguizamo.

Las observaciones se hicieron en lugares con diferentes valores de IHH (**Figura 3A**). El porcentaje de diversidad de riqueza de especies ($q=0$) reportado comparado con lo estimado osciló entre el 70 % en lugares con mayor IHH y 80 a 90 % en lugares con menor IHH (**Figura 3B**), con una mayor riqueza en los lugares menos intervenidos y menor en los más intervenidos. Las rarefacciones permitieron evidenciar que la distribución gradual de mayor diversidad en lugares con poco IHH (menos intervenidos) a lugares con mas IHH (mas intervenidos) se mantenía tanto para especies comunes ($q=1$; **Figura 3C**) como para especies dominantes ($q=2$; **Figura 3D**).

Complementariamente, nuestra clasificación por abundancia relativa permitió ratificar la menor diversidad en lugares con mayor IHH (**Figura 4A**). Las tres especies dominantes en los lugares más naturales (IHH: <21) fueron *Psarocolius angustifrons*, *Cacicus cela* y *Ramphastos tucanus*, en tanto que en el siguiente rango (IHH: 21-41) fueron *P. angustifrons*, *Coragyps atratus* y *C. cela*. En el rango de transformación intermedia a alta (IHH: 41-62) las especies más abundantes fueron *C. atratus*, *P. angustifrons* y *Crotophaga ani*.

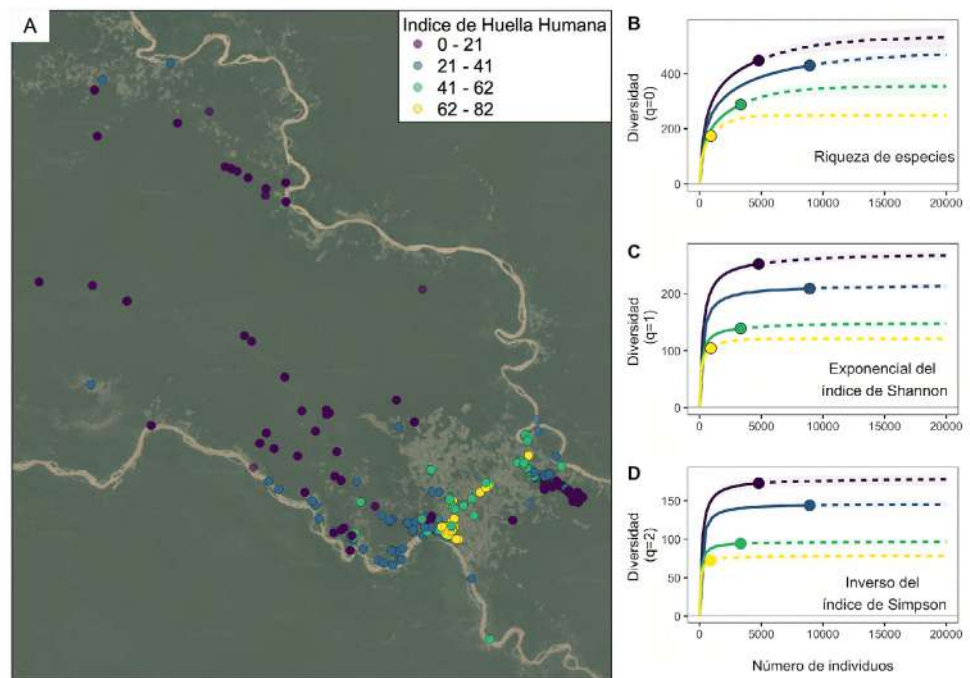


Figura 3. Relación de registros de aves en Leguizamo con índice de huella humana - IHH (A). Curvas de rarefacción de diversidad usando números de Hill basadas en números de individuos observados en cuatro rangos de IHH. Nótese las diferencias en el eje Y. Diversidad expresada como $q=0$ (B), $q=1$ (C) y $q=2$ (D). La línea continua representa los datos interpolados (diversidad observada) y la línea punteada, la extrapolación (diversidad esperada)

Por último, en los lugares con mayor huella humana (IHH: >62) dominaron las especies *Graydidascalus brachyurus*, *Amazona amazonica* y *C. atratus*. Por otro lado, 65 especies reportaron un IAR bajo (0,004), todas registradas en un solo día con entre uno y siete individuos (*Berlepschia rikeri*, *Heterocercus aurantiivertex*). Las pendientes de las curvas de abundancia de rango (Figura 4A) fueron diferentes para todas las combinaciones ($F_{1,3} = 796,82$, $p < 0,001$), excepto en lugares más naturales (IHH: <21) y lugares con valor del IHH medio a bajo (IHH: 21-41; Figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>); es decir que los lugares más naturales en esos dos rangos del IHH tienen una comunidad más equitativa que aquellos con mayor intervención humana y rangos de

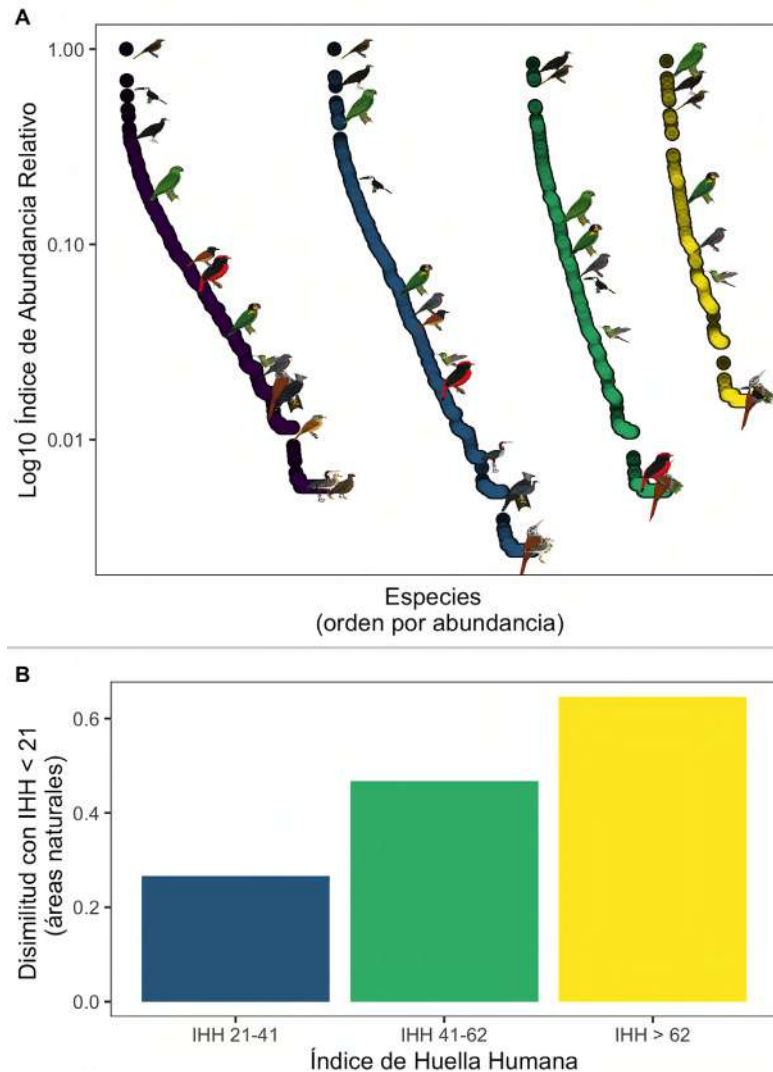


Figura 4. A) Curva de abundancia de rango con base en el logaritmo de base 10 de la abundancia relativa (IAR), considerando número de individuos y días de registro. Los colores en los cuatro paneles corresponden a los cuatro rangos del índice de huella humana (IHH) donde se registraron aves en Leguízamo, Putumayo. Las ilustraciones de Fernando Ayerbe-Quiñones© (no están a escala) muestran algunas especies representativas: *Psarocolius angustifrons*, *Ramphastos tucanus*, *Coragyps atratus*, *Graydidascalus brachyurus*, *Thamnophilus praecox* (hembra), *Phoenicircus nigricollis* (macho), *Pyrilia barrabandi*, *Lophornis chalybeus* (macho), *Sporophila castaneiventris* (macho), *Berlepschia rikeri*, *Harpia harpyja*, *Neopipo cinnamomeus*, *Agamia agami*, *Calidris subruficollis*, *Odontophorus gujanensis* y *Tinamus tao*. **B)** Disimilitud de Jaccard desde áreas naturales a áreas más intervenidas; los mayores valores de disimilitud asumen un mayor recambio

IHH más altos. En la curva de abundancia de rango fue evidente que algunas especies con altos valores de abundancia en áreas más naturales son poco abundantes en áreas más intervenidas (e.g., *Ramphastos tucanus*) o, inclusive, han desaparecido en estas últimas (e.g., *Phoenicircus nigricollis*). También hay especies que muestran el patrón contrario, es decir, fueron poco abundantes en áreas naturales y aumentaron con la intervención humana (e.g., *S. castaneiventris*, *Lophornis chalybeus* o *Pyrrhuloxia barrabandi*). La diferencia en composición fue evidente al comparar la disimilitud de los lugares en áreas naturales (IHH: <21) con otras áreas usando el índice de Jaccard (**Figura 4B**). La disimilitud fue aumentando de áreas con intervención poca a media (IHH: 21-41; 0,27) a aquellas con intervención media a alta (IHH: 41-62; 0,47) hasta las de más alta intervención (IHH: >62; 0,65). Es decir, además de perder especies y ser dominadas por unas pocas (**Figuras 3 y 4A**), las áreas con mayor intervención humana en el interfluvio Caquetá-Putumayo presentaban una composición diferente en más de un 60 % que las áreas naturales.

Los rasgos funcionales del estrato de forrajeo de las aves del interfluvio Caquetá-Putumayo no variaron significativamente entre los rangos del IHH ($F_{1,3}=0,528$, $p=0,663$; **Figura 5A**). Aunque las masas corporales mayores tienden a desaparecer en áreas más intervenidas, dicha diferencia tampoco fue significativa ($F_{1,3}=0,913$, $p=0,434$; **Figura 5A**). El número de especies de cada grupo de dieta en los diferentes rangos del IHH disminuyó significativamente desde las áreas naturales a los sitios más intervenidos ($F_{1,3}=4,005$, $p=0,034$; **Figura 5B**), con particular diferencia entre los rangos de intervención humana más contrastantes (IHH: <21 Vs. IHH: >62; **Figura 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>). De hecho, el número de especies fue diferente también entre los grupos de dieta ($F_{1,4}=15,735$, $p<0,001$; **Figura 5B**), con diferencias marcadas en el número de especies de aves que se alimentan de invertebrados (**Figura 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>). La tendencia hacia la disminución gradual fue evidente en frugívoros y nectarívoros, aves que consumen invertebrados y omnívoros; por su parte, las aves que consumen plantas y semillas, al igual que las

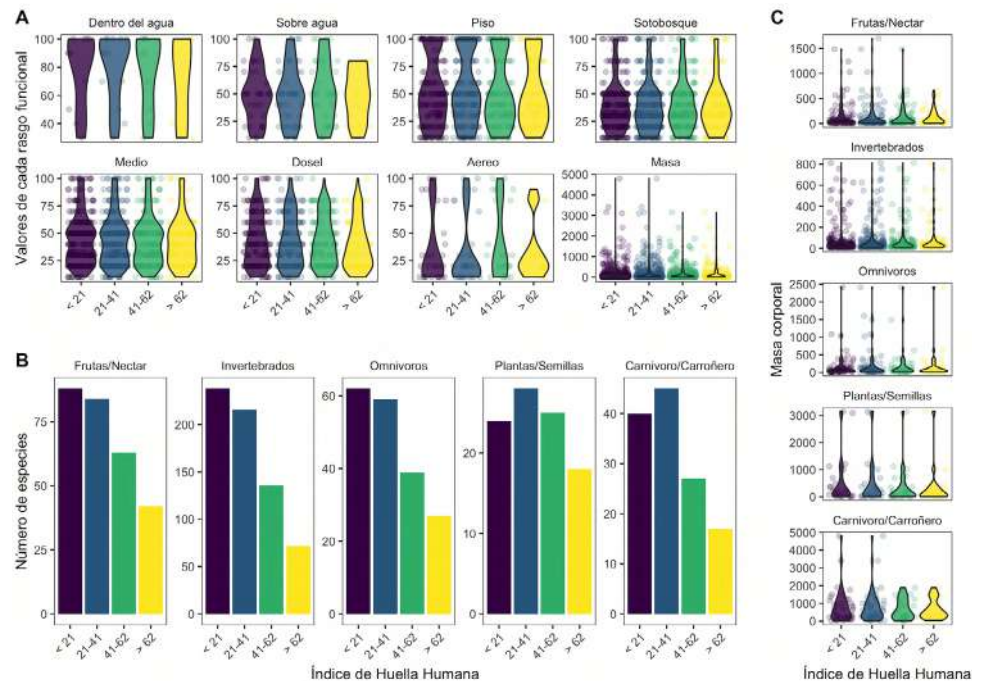


Figura 5. Aspectos de diversidad funcional con relación al índice de huella humana en áreas donde se registraron aves en Leguizamo, Putumayo. **A)** Estratos de forrajeo y masas corporales de las aves registradas. **B)** Número de especies de cinco categorías tróficas. **C)** Detalle de las masas corporales de las aves en las cinco categorías tróficas

carnívoras y carroñeras, tuvieron un pico de riqueza de especies en las áreas con alteración intermedia. La masa corporal de las especies fue diferente entre las categorías de dietas ($F_{1,4} = 100,227$, $p < 0,001$; **Figura 5C**), con excepción de las comparaciones entre omnívoras y semilleras y frugívoras-nectarívoras y consumidoras de invertebrados, siendo las aves más grandes carnívoras o carroñeras y las más pequeñas las que se alimentan de invertebrados. Los valores de masa, aunque pareciera haber una pérdida de los valores más altos en los carnívoros-carroñeros y los frugívoros-nectarívoros, no variaron significativamente entre los rangos de huella humana ($F_{1,3} = 1,183$, $p = 0,315$; **Figura 5C**; **Figura 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>).

Encontramos una asociación entre el número de especies en cada rango de intervención humana y los cuatro tipos de avituristas considerados (**Tabla 2**). El mayor número de especies de interés se concentró en los rangos de menor intervención humana (IHH: <21 e IHH: 21-41). El número de especies únicas para los rangos de intervención fue drásticamente menor para los diferentes tipos de avituristas en los lugares con mayor intervención humana. La prueba de ji al cuadrado permitió detectar una discrepancia entre los valores esperados y los observados para cada tipo de aviturista ($X^2 = 41,384$; $df = 9$; $p < 0,001$). Basado en sus residuales, encontramos que el número de especies que despiertan interés en avituristas avanzados es mayor de lo esperado en el rango de IHH <21 (áreas naturales) y menor de lo esperado para los rangos de mayor alteración antrópica (IHH: 41-62 e IHH: > 62).

Discusión

Los efectos de la presión de los cambios antrópicos en la diversidad tropical aún no se conocen en su totalidad. En este estudio evaluamos la diversidad de aves del interfluvio Caquetá-Putumayo en su cuenca media, al sur de Colombia, mediante una matriz de intervención antrópica variable elaborada con base en el índice de huella humana para el país (**Correa-Ayram, et al., 2020**). El inventario se hizo a partir de combinaciones de métodos que incluyeron la aproximación a un programa de monitoreo participativo durante aproximadamente 5 años de apoyo a iniciativas de ciencia participativa a nivel local (**Neate-Clegg, et al., 2020**) y estrategias de manejo del área protegida PNN La Paya. La avifauna dentro de este interfluvio es muy diversa, con 531 especies registradas, y los mayores valores de diversidad taxonómica y de composición se encontraron en los lugares más naturales. Como se ha reportado ampliamente en la Amazonia, el recambio de diversidad funcional no fue tan evidente como el recambio taxonómico (**Fluck, et al., 2020**), pero la reducción de especies en los puntos de mayor intervención humana sí lo fue. El hecho de que la diversidad funcional no cambiara drásticamente evidenció una posible redundancia ecológica representativa de lugares altamente diversos (**Loiselle, et al., 2007**). En general, el actual inventario entre los ríos Caquetá y Putumayo incluye más especies que otros realizados al sur, en el interfluvio Putumayo-Aguarico (**Alverson, et al., 2008**; **Naranjo, et al., 2016**) o al norte, en el interfluvio Caguán-Caquetá (**Pitman, et al., 2018**). Además, aunque el interés de los diferentes tipos de avituristas se centra en los lugares

Tabla 2. Estimación del número de especies con interés para cuatro posibles tipos de avituristas en cuatro rangos de áreas con índice de huella humana (IHH) diferencial. Entre paréntesis aparece el número de especies únicas

Tipo de aviturista	IHH < 21	IHH 21-41	IHH 41-62	IHH > 62	Total
Ocasional	237 (21)	242 (18)	164 (2)	106 (2)	273 (9)
Interesado	378 (50)	364 (29)	244 (7)	147 (4)	435 (6)
Entusiasta	408 (71)	376 (32)	241 (8)	140 (4)	468 (35) ^a
Avanzado	212 (61)	172 (22)	74 (2)	29 (2)	244 (0) ^a

^aEstos dos grupos de avituristas compartieron 49 especies únicas entre ellos.

menos intervenidos, la diversidad en zonas perturbadas permite desarrollar recorridos recreativos en el marco de iniciativas de aprovechamiento sostenible de la avifauna del interfluvio Caquetá-Putumayo.

A pesar de la gran diversidad reportada en nuestro estudio, algunas especies características de la región occidental de la Amazonia no reportadas en la zona de estudio podrían seguir sumándose a las ya enumeradas en el interfluvio Caquetá-Putumayo (*Celeus spectabilis*, *Epinecrophylla ornata*, *Hemitriccus iohannis*). Además, con los nuevos hallazgos registrados para el país en esta zona (*Thamnophilus praecox*, *H. aurantiivertex*) (Peña-Alzate, *et al.*, 2020), no sería sorprendente encontrar más especies nuevas (*Oneillornis lunulatus*, *Conopophaga peruviana*). De hecho, en la información suplementaria (Apéndice) incluimos un detallado recuento de especies novedosas o de interés particular en nuestra área de estudio (Tabla 3). Algunos ejemplos serían las especies de áreas abiertas que pudieran propagarse hacia el sureste en la Amazonia de Ecuador y Perú desde los llanos de la Orinoquia colombiana (*Eudocimus* spp, *Syrigma sibilatrix*, *Mustelirallus albicollis*) (Bonilla, *et al.*, 2017). Asimismo, hay algunas especies amazónicas con pocos registros o no registradas en el norte de Perú o Ecuador (*Myrmotherula ambigua*, *Conirostrum speciosum*, *Ramphotrigon megacephalum*), poco conocidas aún en Colombia (*Touit huetii*, *Th. praecox*, *Mazaria propinqua*, *Tolmomyias traylori*), y algunas cuya delimitación biogeográfica y taxonómica sigue en discusión o requiere estudios más detallados (*Hypocnemis flavescens*, *Tolmomyias sulphurescens*, *Xiphorhynchus ocellatus*). La avifauna especialista de bosques de suelos pobres amazónicos (*Nyctibius bracteatus*) (Borges, *et al.*, 2016) pareciera extenderse más ampliamente al noroccidente de la Amazonia de lo esperado (Álvarez-Alonso & Whitney, 2003; Vásquez-Arévalo, *et al.*, 2020). Dados los recientes hallazgos en la avifauna del noroccidente de la Amazonia, es relevante explorar de nuevo las delimitaciones biogeográficas de las áreas de endemismos y estudiar más en detalle el efecto de los ríos en el mantenimiento y recambio de biodiversidad en la Amazonia colombiana (Janni, *et al.*, 2018; Fluck, *et al.*, 2020; Peña-Alzate, *et al.*, 2020).

Aunque la hipótesis de que los ríos funcionan como barreras biogeográficas ha sido ampliamente explorada para explicar la distribución de aves en la Amazonia (Cracraft, 1985; Ribas, *et al.*, 2012), así como el mantenimiento de su biodiversidad (Naka & Brumfield, 2018), recientemente se han considerado otros elementos geográficos y climáticos para estudiar este patrón (Oliveira, *et al.*, 2017; Fluck, *et al.*, 2020). El noroccidente de la Amazonia es uno de los puntos con menor exploración y, por consiguiente, de mayor prioridad para la exploración biológica (Janni, *et al.*, 2018; Pitman, *et al.*, 2018). Al comparar nuestro inventario del interfluvio Caquetá-Putumayo con otros recientes cercanos al sur del río Putumayo (Alverson, *et al.*, 2008; Naranjo, *et al.*, 2016) y al norte del río Caquetá (Pitman, *et al.*, 2018), se evidenció una similitud muy cercana con los inventarios rápidos de Cuyabeno-Güepí y Bajo Caguán-Caquetá (Tabla 4), lo que se refleja en el gran número de especies compartidas (más de 350). Un total de 76 especies reportadas en nuestro sitio de estudio no habían sido reportadas por los inventarios previos consultados. Nuestros resultados resaltan la necesidad de articulación para la gestión y conservación en la zona de Cuyabeno-Güepí hacia el norte (Usma, *et al.*, 2016) e, incluso, hasta el PNN Serranía de Chiribiquete (Álvarez-Reboyedo, *et al.*, 2003; Stiles & Naranjo, 2017).

Específicamente en la principal área de conservación del interfluvio Caquetá-Putumayo, el PNN La Paya, rastreamos 2.142 registros de 364 especies (Tabla 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2963>). Así, la consolidación de los registros de aves del PNN La Paya representa una importante oportunidad de gestión y una primera aproximación a un inventario real de este componente de la biodiversidad dentro de esta área protegida desde su declaración como tal en 1984. La falta de información de línea de base en el PNN La Paya es una de las situaciones que debe superarse para fortalecer su manejo (Peñuela-Gómez, *et al.*, 2019a, 2019b; PNN La Paya, 2019). Algunos de los principales desafíos en las áreas protegidas son el fortalecimiento de la articulación

Tabla 3. Especies de aves de interés particular en el interfluvio de la cuenca media Caquetá-Putumayo (Japurá-Içá) al sur de la Amazonia colombiana (ver detalles en el Apéndice)

Especie	Interés por	Especie	Interés por
<i>Tinamus tao</i>	4	<i>Sciaphylax castanea</i>	5
<i>Dendrocygna autumnalis</i>	7	<i>Xiphorhynchus ocellatus</i>	8
<i>Tachybaptus dominicus</i>	4	<i>Campylorhamphus (trochilirostris)</i>	4
<i>Columbina minuta</i>	1	<i>Mazaria propinqua</i>	6
<i>Nyctibius bracteatus</i>	4, 5	<i>Heterocercus aurantiivertex</i>	4, 5
<i>Chordeiles nacunda</i>	4	<i>Neopipo cinnamomea</i>	5
<i>Avocettula recurvirostris</i>	2	<i>Tolmomyias sulphurescens</i>	8
<i>Chrysuronia versicolor</i>	1	<i>Tolmomyias traylori</i>	6
<i>Chlorestes cyanus</i>	4	<i>Hemitriccus striaticollis</i>	1
<i>Aramus guarana</i>	4	<i>Poecilatriccus calopterus</i>	6
<i>Mustelirallus albicollis</i>	1	<i>Elaenia flavogaster</i>	1
<i>Porzana carolina</i>	3	<i>Attila citriniventris</i>	5
<i>Vanellus chilensis</i>	1	<i>Ramphotrigon megacephalum</i>	4
<i>Gallinago (paraguaiae)</i>	4	<i>Myiozetetes cayanensis</i>	1
<i>Syrigma sibilatrix</i>	1	<i>Conopias parvus</i>	5
<i>Eudocimus albus</i>	1	<i>Tyrannus albogularis</i>	6
<i>Eudocimus ruber</i>	1	<i>Fluvicola pica</i>	1
<i>Phimosus infuscatus</i>	1	<i>Progne subis</i>	7
<i>Platalea ajaja</i>	4	<i>Petrochelidon pyrrhonota</i>	7
<i>Cathartes burrovianus</i>	1	<i>Mimus gilvus</i>	1
<i>Geranoaetus albicaudatus</i>	1	<i>Sturnella magna</i>	1
<i>Pseudastur albicollis</i>	7	<i>Leistes militaris</i>	1
<i>Caracara cheriway</i>	1	<i>Cacicus sclateri</i>	4
<i>Touit huetii</i>	6	<i>Geothlypis philadelphia</i>	3
<i>Amazona festiva</i>	6	<i>Setophaga striata</i>	3
<i>Thamnophilus praecox</i>	2	<i>Conirostrum speciosum</i>	4
<i>Megastictus margaritatus</i>	5	<i>Sicalis flaveola</i>	1
<i>Myrmotherula ambigua</i>	2, 5	<i>Loriotus luctuosus</i>	4
<i>(Myrmotherula sunensis)</i>	2	<i>Dacnis albiventris</i>	5
<i>Microrhophias quixensis</i>	7	<i>(Sporophila minuta)</i>	1
<i>Hypocnemis flavescens</i>	2	<i>Sporophila crassirostris</i>	7
<i>Hypocnemis hypoxantha</i>	5	<i>Sporophila nigricollis</i>	1
<i>Myrmoborus leucophrys</i>	4	<i>Schistochlamys melanopsis</i>	1

1: de áreas abiertas ampliando hacia el sureste de la Amazonia; 2: amazónicas que tienen muy pocos registros en Perú; 3: migrantes boreales con pocos registros en Perú; 4: amazónicas con poblaciones peruanas, pero sin poblaciones conocidas al norte de Amazonia peruana; 5: especialistas de suelos pobres; 6: poco conocidas en Colombia; 7: poco conocidas en la Amazonia colombo-peruana; 8: de interés taxonómico. Los nombres entre paréntesis requieren futuro estudio de confirmación.

estratégica, en énfasis de la gestión en la planificación y el manejo a nivel de paisaje, así como la búsqueda de oportunidades y estrategias que contribuyan al mantenimiento de los procesos ecológicos (Hurtado, et al., 2013). Nuestros resultados proyectan un amplio abanico de oportunidades para el establecimiento de procesos que favorezcan los objetivos y prioridades de conservación del PNN La Paya y ofrezcan medios de vida a las

Tabla 4. Comparación de similitudes de Jaccard entre diferentes sitios al noroccidente de la Amazonia. El presente inventario es del interfluvio Caquetá-Putumayo. Arriba de la diagonal: similitud de Jaccard (1-disimilitud Jaccard), va de 0 (no similitud) a 1 (mucho similitud). Debajo de la diagonal: número de especies en común entre pares de sitios

	Caquetá-Putumayo	IR20 ^a	Lagartococha ^b	IR30 ^c
Caquetá-Putumayo	---	0,68	0,40	0,64
IR20	391	---	0,48	0,70
Lagartococha	222	222	---	0,48
IR30	365	347	210	---
No. Especies	531	437	245	407

^a IR20: inventario rápido del *Field Museum* #20 (Alverson, *et al.*, 2008); ^b Lagartococha: exploraciones en ese complejo lagunar realizadas por el Fondo Mundial para la Naturaleza (Naranjo, *et al.*, 2016); ^c IR30: inventario rápido del *Field Museum* #30 (Pitman, *et al.*, 2019).

comunidades indígenas y campesinas que habitan y rodean el área protegida. En efecto, entre las iniciativas de relación con campesinos e indígenas, el ecoturismo se ha mencionado como una alternativa o estrategia para mejorar la gobernanza y la articulación territorial, por lo que pensar en una ruta de planeación participativa para ello es factible (Peñuela-Gómez, *et al.*, 2019a; PNN La Paya, 2019) y se articula perfectamente con las estrategias de conservación y gestión regional del noroccidente de la Amazonia (Usma, *et al.*, 2016).

Los análisis previos sobre el potencial aviturismo en Colombia se han centrado en los avituristas avanzados (Ocampo-Peñuela & Winton, 2017) que dedican desplazamientos exclusivamente para observar aves, especialmente las más raras, y tienen mayor experticia para identificarlas, y fueron ellos los que marcaron la mayor diferencia estadística. Sin embargo, en este estudio segregamos las aves reportadas en el interfluvio Caquetá-Putumayo desde el punto de vista del posible interés de otros tipos de avituristas menos expertos, con miras a incentivar el ecoturismo para diferentes públicos. Se puede viajar a Leguízamo en vuelos comerciales desde Bogotá (actualmente los tiquetes cuestan cerca de COL \$600.000, ~US \$200), o llegar por tierra hasta Puerto Asís (Putumayo) y recorrer el río Putumayo en botes comerciales que realizan uno a dos viajes diarios en la mañana. Otra opción es llegar por tierra hasta Florencia (Caquetá) y recorrer el río Caquetá hasta el corregimiento de La Tagua. En el centro poblado de Leguízamo los turistas encuentran una buena oferta de hospedaje, lo que lo convierte en un punto central de rutas aviturismo en los diferentes ecosistemas de las llanuras amazónicas de Putumayo. El desarrollo de la infraestructura de vías en el municipio es prioritario para el crecimiento económico de este sector y el aviturismo dentro del PNN La Paya y en territorios indígenas deberá orientarse a ofrecer medios de vida para los pobladores. Asimismo, la articulación binacional con senderos en el Perú y el fortalecimiento de grupos al norte del río Caquetá sería un apoyo para la economía local y tendría repercusiones en la preservación de los bosques por parte de los pobladores, como se ha visto con el apoyo a la reciente AICA Gaoyá-Leguízamo (BirdLife International, 2020).

En conclusión, nuestro inventario llena parte del vacío de información sobre la biodiversidad del noroccidente de la cuenca amazónica. El interfluvio Caquetá-Putumayo es un área importante de representación avifaunística de los bosques amazónicos (BirdLife International, 2020). La gran diversidad de aves, sin embargo, puede verse significativamente afectada por la intervención humana actual en la región, con el ingreso de avifauna de otras regiones, lo que facilita la desaparición de elementos sensibles, como las aves que se alimentan de invertebrados en el sotobosque denso (Stouffer, *et al.*, 2020), y podría reducir la redundancia ecológica esperada (Loiselle, *et al.*, 2007). Por ello, darle continuidad al monitoreo participativo, la articulación entre diferentes actores y la posible

recuperación de áreas naturales mediante incentivos a los emprendimientos locales de aviturismo y protección de las áreas naturales en la Amazonia resulta prioritario. En este sentido, los programas de educación y restauración ecológica local son esenciales para generar una nueva relación de la sociedad con la naturaleza en la Amazonia colombiana (Garzón, et al., 2020).

Información suplementaria

Figura 1S. Especímenes de *Forpus xanthopterygius* WFVZ-23062 y WFVZ-23063 atribuidos a *F. conspicillatus*. Vea la figura 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>

Figura 2S. Resultado post-hoc Tukey entre los GLM de las curvas rango abundancia para cuatro rangos de Índice de Huella Humana (IHH): Rango1, IHH <21; Rango2, IHH 21-41; Rango3, IHH 41-62; Rango4, IHH >62. Vea la figura 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>

Figura 3S. Resultado post-hoc Tukey entre los GLM de número de especies para cuatro rangos de Índice de Huella Humana (IHH): Rango1, IHH <21; Rango2, IHH 21-41; Rango3, IHH 41-62; Rango4, IHH >62 (superior), en cuanto a categorías de dieta: Invertebrate, invertebrados; Fruit-Nect, frugívoros y nectarívoros; Omnivore, omnívoros; PlantSeed, plantas y semillas; VertFishScav, carnívoras y carroñeras (inferior). Vea la figura 3S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>

Figura 4S. Resultado post-hoc Tukey entre los GLM de masas corporales de aves en cuatro rangos de Índice de Huella Humana (IHH): Rango1, IHH <21; Rango2, IHH 21-41; Rango3, IHH 41-62; Rango4, IHH >62 (superior), en cuanto a categorías de dieta: Invertebrate, invertebrados; Fruit-Nect, frugívoros y nectarívoros; Omnivore, omnívoros; PlantSeed, plantas y semillas; VertFishScav, carnívoras y carroñeras (inferior). Vea la figura 4S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>

Apéndice. Aves novedosas o de interés particular en el Interfluvio de la cuenca media Caquetá-Putumayo (Japurá-Içá) al sur de la Amazonia colombiana. Vea el apéndice en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2958>

Tabla 1S. Lista de especies de aves del Interfluvio Caquetá-Putumayo. Taxonomía sigue a Remsen et al. (2020). Para cada especie se presenta alguna evidencia adicional (ML significa audio o foto en Macaulay Library, Capt: captura con red de niebla, Espe: Especímen depositado en colección biológica, IAvH-CSA: audio en la Colección de Sonidos Ambientales Mauricio Álvarez-Rebolledo del Instituto Humboldt) y presencia (1) o ausencia (0) en los cuatro rangos de intervención antrópica (IHH) e interés para avituristas. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2962>

Tabla 2S. Lista de especies de aves registradas dentro del Parque Nacional Natural La Paya, inmerso en el Interfluvio Caquetá-Putumayo. Taxonomía sigue a Remsen et al. (2020). Para cada especie se presenta la categoría de amenaza internacional (IUCN) y nacional (Libro Rojo). Vea la tabla 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1307/2963>

Agradecimientos

OAC agradece a CORPOAMAZONIA por la invitación a participar en el proyecto I-06-086-57302-04-05 53-13 “Establecimiento de áreas de importancia para la conservación de las aves (AICAs) en el departamento de Putumayo. Fase III”, en especial a Vanessa Perdomo, Jonh Jairo Mueses y Víctor Hugo Capera-Moreno. A Parques Nacionales Naturales de Colombia, en particular a la Dirección Territorial Amazonia y al PNN La Paya, por permitir y apoyar la realización de muestreos. A la comunidad de Leguízamo por permitirnos “pajarear” en su territorio. A Viviana Ruiz por los talleres sobre aprovechamiento de los datos de eBird Colombia utilizando el paquete auk como parte de una beca Fullbright U.S. Specialist. A René Corado por las fotos de especímenes del *Western Foundation of*

Vertebrate Zoology. A F. Gary Stiles por su ayuda para el ingreso de especímenes y el acceso a la colección del ICN. A Fernando Ayerbe-Quiñones por permitirnos el uso de sus ilustraciones de la “Guía Ilustrada de la Avifauna Colombiana” y a Camilo Correa por compartir los *rasters* de sus artículos ya publicados y en preparación. A Juan Freile por sus comentarios sobre las aves reportadas aquí, así como a dos revisores anónimos y al comité editorial de la revista por su apoyo y constructivas sugerencias. JBS tiene una beca postdoctoral del *Research Council of Norway* (Grant No. 262378). OJ agradece a Michele Viganò y Andrea Corso.

Contribución de los autores

Todos los autores participaron en la idea de la publicación. El levantamiento de datos estuvo a cargo principalmente de OAC, FAPA, JB, MC, OJ, BCJ, JBS y DR, con apoyo de otros miembros del Grupo de Observadores de Aves de Leguízamo – GOAL. El análisis de datos estuvo a cargo de OAC, ZCP y DO, con apoyo de SMPG, FAPA, MC, OJ, JB, JBS, BCJ y DR. La escritura del manuscrito fue dirigida por OAC con apoyo de todos los autores.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses de ningún tipo que pueda posiblemente afectar la publicación o los resultados de este proceso de investigación.

Referencias

- Acevedo-Charry, O. (2014). Aves de Quindicocha - Valle de Sibundoy, Putumayo: potencial área de conservación. *Universitas Scientiarum*. **19**: 29-41.
- Acevedo-Charry, O. & Coral-Jaramillo, B. (2017). Anotaciones sobre la distribución de *Doliornis remseni* (Cotingidae) y *Buthraupis wetmorei* (Thraupidae). *Ornitología Colombiana*. **16**: eNB04.
- Acevedo-Charry, O., Cárdenas, Á., Coral-Jaramillo, B., Daza-Díaz, W., Jaramillo, J., Freile, J. F. (2015). First record of Subtropical Pygmy owl *Glaucidium parkeri* in the Colombian Andes. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*. **135**: 77-79.
- Acevedo-Charry, O., Perdomo-Castillo, I. V., Capera-Moreno, V. H. (2016). Lista de aves de la llanura amazónica, Leguízamo, Putumayo-Colombia. Fecha de consulta: 1 de agosto de 2020. Disponible en: https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=aicas_fase3.
- Acevedo-Charry, O., Certuche-Cubillos, K., Rosero, E. A., Guerrero Carvajal, P., Carantón-Ayala, D. (2017). Un aporte a la historia natural de *Galbula patatae* (Galbulidae) en el piedemonte amazónico colombiano. *Ornitología Colombiana*. **16**: eA05.
- Acevedo-Charry, O., Henao-Rodríguez, M. P., Morales-Martínez, D. M. (2018). Incidental records of mammals from Leguízamo, Putumayo, Amazon region at the southern border of Colombia. *Mammalogy Notes | Notas Mastozoológicas*. **4**: 34-37.
- Acevedo-Charry, O., Daza-Díaz, W., Colón-Piñeiro, Z. (2020). First record of Rufous-thighed Kite *Harpagus diodon* in Colombia. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*. **140**: 104-109.
- Álvarez-Alonso, J. & Whitney, B. M. (2003). New distributional records of birds from White-Sand forests of the northern Peruvian Amazon, with implications for biogeography of northern South America. *The Condor*. **105**: 552-566.
- Álvarez-Rebolledo, M., Umaña, A. M., Mejía, G. D., Cajiao, J., von Hildebrand, P., Gast, F. (2003). Aves del Parque Nacional Natural Serranía de Chiribiquete, Amazonia-Provincia de la Guyana, Colombia. *Biota Colombiana*. **4**: 49-63.
- Alverson, W. S., Vriesendorp, C., Del Campo, A., Moskovits, D. K., Stotz, D. F., Garcia Donayre, M., Borbor, L. A. (2008). Ecuador, Perú: Cuyabeno-Güepí. Rapid Biological and Social Inventories Report 20. Chicago Field Museum of Natural History.
- Armenteras, D., Murcia, U., González, T. M., Barón, O. J., Arias, J. E. (2019). Scenarios of land use and land cover change for NW Amazonia: Impact on forest intactness. *Global Ecology and Conservation* **17**.
- Asociación Colombiana de Ornitología - ACO. (2020). Lista de referencia de especies de aves de Colombia - 2020. v2. Fecha de consulta: 5 de julio de 2020. Disponible en: https://ipt.biodiversidad.co/sib/resource?r=aco_listaavescolombia2017.

- Avendaño, J. E., Bohórquez, C. I., Roselli, L., Arzuza-Buelvas, D., Estela, F., Cuervo, A. M., Stiles, F. G., M. Renjifo, L.** (2017). Lista de chequeo de las aves de Colombia: una síntesis del estado de conocimiento desde Hilty & Brown (1986). *Ornitología Colombiana*. **16**: en imprenta.
- Ayerbe-Quñones, F.** (2018). Guía ilustrada de la avifauna colombiana. Wildlife Conservation Society-Colombia, Bogotá D.C., Colombia. 444 p.
- BirdLife International.** (2020). Important Bird Areas factsheet: Gaoyá-Leguizamo. Fecha de consulta: 5 de julio de 2020. Disponible en: <http://www.birdlife.org> on 01/12/2020
- Bonilla-Castillo, C., Peña-Alzate, F. Á., Bonilla-Velazquez, C., Velazquez-Figueroa, I.** (2017). La corocora (*Eudocimus ruber*) en la llanura amazónica entre los ríos Caquetá y Putumayo. *Ornitología Colombiana*. **16**: eNB01.
- Borges, S. H., Cornelius, C., Ribas, C., Almeida, R., Guilherme, E., Aleixo, A., Dantas, S., Dos Santos, M. P., Moreira, M.** (2016). What is the avifauna of Amazonian White-sand vegetation? *Bird Conservation International*. **26**: 192-204.
- Boucher, S. & Salazar, K.** (2016). A new *Veturius* (*Veturius*) of the “*cephalotes*” group from southern Colombia, Putumayo (Coleoptera: Passalidae). *Annales de la Societe Entomologique de France*. **52**: 204-208.
- Chao, A., Gotelli, N. J., Hsieh, T. C., Sander, E. L., Ma, K. H., Colwell, R. K., Ellison, A. M.** (2014). Rarefaction and extrapolation with Hill numbers: A framework for sampling and estimation in species diversity studies. *Ecological Monographs*. **84**: 45-67.
- Clerici, N., Salazar, C., Pardo-Díaz, C. D., Jiggins, J. E., Richardson, Linares, M.** (2019). Peace in Colombia is a critical moment for Neotropical connectivity and conservation: Save the northern Andes–Amazon biodiversity bridge. *Conservation Letters*. **12**: 1-7.
- Correa Ayram, C. A., Etter, A., Díaz-Timoté, J., Rodríguez Buriticá, S., Ramírez, W., Corzo, G.** (2020). Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecological Indicators*. **117**: 106630.
- Cracraft, J.** (1985). Historical biogeography and patterns of differentiation within the South American avifauna: Areas of Endemism. *Ornithological Monographs*. **36**: 49-84.
- De la Hoz, N., Rozo, C., Valencia, M.** (2007). Contexto histórico-social. Pages 38–56 en S. L. Ruiz R., E. Sánchez, E. Tabares, A. Prieto, J. C. Arias, R. Gómez, D. Castellanos, P. García, & L. Rodríguez, editores. *Diversidad biológica y cultural del corredor trinacional de áreas protegidas La Paya - Cuyabeno - Güepí Sekime*. Colombia – Ecuador - Perú. CORPOAMAZONIA, Instituto Alexander von Humboldt, Instituto Sinchi, UAESPNN, Bogotá D.C., Colombia.
- Fluck, I. E., Cáceres, N., Hendges, C. D., do N. Brum, M., Dambros, C. S.** (2020). Climate and geographic distance are more influential than rivers on the beta diversity of passerine birds in Amazonia. *Ecography*. **43**: 860-868.
- Garzón, N. V., Rodríguez León, C. H., Ceccon, E., Pérez, D. R.** (2020). Ecological restoration-based education in the Colombian Amazon: Toward a new society-nature relationship. *Restoration Ecology*. Aceptado: rec.13216.
- GBIF.** (2020). GBIF Occurrence Download - Aves Leguizamo. Fecha de consulta: 10 de julio de 2020. Disponible en: <https://www.gbif.org/occurrence/download/0019219-200613084148143>
- Gómez, D., Orozco, K., Cardona, F., Pineda, M., Bedoya, M. L., Ocampo, D.** (2020). Avifauna del Parque Nacional Natural Selva de Florencia (Samaná, Caldas, Colombia): nuevos registros y ampliaciones de distribución. *Biota Colombiana*. **21**: 40-71.
- Gutiérrez-Zamora, E. A., Mueses-Cisneros, J. J., Ramírez-Enríquez, M., Perdomo-Castillo, I. V.** (2013). Aves del Valle de Sibundoy, Alto Putumayo, Colombia, Guía de campo. CORPOAMAZONIA, Mocoa, Putumayo, Colombia.
- Herchkovitz, P.** (1963). A systematic and zoogeographic account of the monkeys of the genus *Callicebus* (Cebidae) of the Amazon and Orinoco river basins. *Mammalia*. **27**: 1-79.
- Hernández-Camacho, J., Hurtado G., A., Ortíz Q., R., Walschburger, T.** (1992). Unidades biogeográficas de Colombia. P. 105-151 en I. G. Halfiter, editor. *La diversidad biológica de Iberoamérica*. Acta Zoológica Mexicana, Instituto de Ecología, A.C., México, México.
- Hilty, S. L. & Brown, W. L.** (1986). *A Guide to the Birds of Colombia*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Hurtado G., A., Santamaría, M., Matallana, C.** (2013). Plan de investigación y monitoreo del Sistema Nacional de Áreas Protegidas-SINAP: avances construidos desde la mesa de investigación y monitoreo entre 2009 y 2012. Bogotá D.C., Colombia.
- Jaccard, P.** (1912). The distribution of the flora in the Alpine zone. *New Phytologist*. **11**: 37-50.

- Janni, O., Corso, A., Viganò, M.** (2018). Range extensions for White-shouldered Antshrike *Thamnophilus aethiops*, Imeri Warbling Antbird *Hypocnemis flavescens* and Black-headed Antbird *Percnostola rufifrons* along the Putumayo River in Colombia, and their biogeographical significance. *Bulletin of the British Ornithologists' Club*. **138**: 244-259.
- Kelling, S., Johnston, A., Bonn, A., Fink, D., Ruiz-Gutiérrez, V., Bonney, R., Fernández, M., Hochachka, W. M., Julliard, R., Kraemer, R., Guralnick, R.** (2019). Using Semi-structured Surveys to Improve Citizen Science Data for Monitoring Biodiversity. *BioScience*. **69**: 170-179.
- Linares-Romero, L. G., Acevedo-Charry, O., Avellaneda, F., Cortés-Herrera, O., Cuervo, A. M., Galindo-T., R. Hernández, D. Pérez-Peña, S., Pulido, Á. R., Pulido-Santacruz, P., Santana, D., Seeholzer, G. F., Sierra-Buitrago, M. del S., Soto-Patiño, J., Laverde-R, O.** (2020). Aves del Parque Nacional Natural Chingaza y zona de amortiguación, Cordillera Oriental de Colombia. *Biota Colombiana*. **21**: 117-129.
- Loiselle, B. A., Blendinger, P. G., Blake, J. G., Ryder, T. B.** (2007). Ecological redundancy in seed dispersal systems: A comparison between manakins (Aves: Pipridae) in two tropical forests. P. 178-196 en A. J. Dennis, E. W. Schup, R. Green, & D. W. Westcott, editores. *Seed Dispersal: Theory and its Application in a Changing World*. CABI Publishing, Wallingford, Oxfordshire, UK.
- López-Ordóñez, J. P., Carantón-Ayala, D., Certuche-Cubillos, K., Rosero, E. A., Fajardo, Y., Acevedo-Charry, O.** (2017). *Nystalus obamai* en Colombia : primeros reportes para el país y aportes a su historia natural. *Ornitología Colombiana*. **16**: eNB06.
- Naka, L. N. & Brumfield, R. T.** (2018). The dual role of Amazonian rivers in the generation and maintenance of avian diversity. *Science Advances*. **4**: eaar8575.
- Naranjo, L. G., Salinas-Sánchez, L., Quinteros-León, K., Chiu-Werner, A., Chota-Martínez, S., Talexio-Michi, G., Tangoy-Flórez, H., Chimbo-Ríos, D., Macanilla, D., Gómez, L.** (2016). Caracterización ornitológica del complejo lagunar Lagartococha. P. 290-333 en J. S. Usma, C. Ortega P., S. Valenzuela, J. Deza, & J. Rivas, editores. *Diversidad biológica y cultural del corredor trinacional de áreas protegidas La Paya - Cuyabeno - Güepfí Sekime*. Colombia – Ecuador - Perú. World Wildlife Fund, Bogotá D.C., Colombia.
- Neate-Clegg, M. H. C., Horns, J. J., Adler, F. R., Kemahlı Aytekin, M. Ç., Şekercioglu, Ç. H.** (2020). Monitoring the world's bird populations with community science data. *Biological Conservation*. **248**: 108653.
- Ocampo-Peñuela, A. & Winton, R. S.** (2017). Economic and Conservation Potential of Bird-Watching Tourism in Postconflict Colombia. *Tropical Conservation Science*. **10**: 1-6.
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., Mcglinn, D., Minchin, P. R., O'Hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Szoecs, E., Wagner, H.** (2019). Community Ecology Package 'vegan'. <https://cran.r-project.org>; <https://github.com/vegandevs/vegan>
- Oliveira, U., Vasconcelos, M. F., Santos, A. J.** (2017). Biogeography of Amazon birds: Rivers limit species composition, but not areas of endemism. *Scientific Reports*. **7**: 2992.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V. N., Underwood, E. C., D'Amico, J. A., Itoua, I., Strand, H. E., Morrison, J. C., Loucks, C. J., Allnutt, T. F., Ricketts, T. H., Kura, Y., Lamoreux, J. F., Wettengel, W. W., Hedao, P., Kassem, K. R.** (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*. **51**: 933-938.
- Peña-Alzate, F. Á., Manjarrez, C., Acevedo-Charry, O.** (2020). *Heterocercus aurantiivertex* (Aves: Passeriformes: Pipridae), una nueva especie para Colombia del Parque Nacional Natural La Paya, Leguízamo, Putumayo. *Caldasia*. **42**: 142-146.
- Peñuela-Gómez, S. M., Villalva-Cortes, L., Vera, T.** (2019a). Portafolio de investigación del Parque Nacional Natural La Paya y procedimiento para la construcción de conocimiento en el Plan de Manejo 2020-2024 del Parque Nacional Natural La Paya. Leguízamo, Putumayo, Colombia.
- Peñuela-Gómez, S. M., Villalva-Cortes, L., Vera, T.** (2019b). Programa de monitoreo del Parque Nacional Natural La Paya. Leguízamo, Putumayo, Colombia.
- Pitman, N., Salazar-Molano, A., Samper-Samper, F., Vriesendorp, C., Vásquez-Cerón, A., Del Campo, A., Miller, T. L., Matapi-Yacuna, E. A., Thompson, M. E., de Souza, L., Reyes-Alvira, D., Lemos, A., Stotz, D. F., Kotlinski, N., Wachter, T., Woodward, E., Botero-García, R.** (2018). Colombia: Bajo Caguán-Caquetá. Rapid Biological and Social Inventories Report 30. Chicago Field Museum of Natural History, Chicago.

- PNN La Paya.** (2019). Plan de manejo del Parque Nacional Natural La Paya 2020-2024. En reformulación, versión noviembre 2019. Leguízamo, Putumayo, Colombia.
- Pocock, M. J. O., Tweddle, J. C., Savage, J., Robinson, L. D., Roy, H. E.** (2017). The diversity and evolution of ecological and environmental citizen science. *PLoS ONE*. 12(4): e0172579.
- Polanco-Ochoa, R., Jaimes, V., Piragua, W.** (2000). Los mamíferos del Parque Nacional Natural La Paya, Amazonía colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 23: 671-682.
- Ramírez-Chaves, H. E., Noguera-Urbano, E. A., Rodríguez-Posada, M. E.** (2014). Mamíferos (Mammalia) del departamento de Putumayo, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 37: 263.
- Remsen, J. V., Jr., Areta, J. I., Bonaccorso, E., Claramunt, S., Jaramillo, A., Pacheco, J. F., Ribas, C., Robbins, M. B., Stiles, F. G., Stotz, D. F., Zimmer, K. J.** (2020). A classification of the bird species of South America. Fecha de consulta: 17 de agosto de 2020. Disponible en: <http://www.museum.lsu.edu/~Remsen/SACCBaseline.htm>
- Renjifo, L. M., Amaya-Villareal, Á. M., Burbano-Girón, J., Velásquez-Tibatá, J.** (2016). Libro rojo de aves de Colombia, Volumen II: Ecosistemas abiertos, secos, insulares, acuáticos continentales, marinos, tierras altas del Darién y Sierra Nevada de Santa Marta y bosques húmedos del centro, norte y oriente del país. Volumen II. Editorial Pontificia Universidad Javeriana e Instituto Alexander von Humboldt. 563 p.
- Renjifo, L. M., Gómez, M. F., Velásquez-Tibatá, J., Amaya-Villareal, A. M., Kattan, G. H., Amaya-Espinel, J. D., Burbano-Girón, J.** (2014). Libro rojo de aves de Colombia. Volumen I. Editorial Pontificia Universidad Javeriana e Instituto Alexander von Humboldt, Bogotá D.C., Colombia. 465 p.
- Ribas, C. C., Aleixo, A., Nogueira, A. C. R., Miyaki, C. Y., Cracraft, J.** (2012). A palaeobiogeographic model for biotic diversification within Amazonia over the past three million years. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 279: 681-689.
- Roque, F. D. O., Menezes, J. F. S., Northfield, T., Ochoa-Quintero, J. M., Campbell, M. J., Laurance, W. F.** (2018). Warning signals of biodiversity collapse across gradients of tropical forest loss. *Scientific Reports*. 8: 1-7.
- de Roux, J. M., Noguera-Urbano, E. A., Ramírez-Chaves, H. E.** (2019). The vulnerable Colombian weasel *Mustela felipei* (Carnivora): new record from Colombia and a review of its distribution in protected areas. *Therya*. 10: 207-210.
- Ruiz, S. L. & Valencia, M.** (2007). Contextualización del sur de la Amazonia colombiana. P. 31-34 en S. L. Ruiz, E. Sánchez, E. Tabares, A. Prieto, J. C. Arias, R. Gómez, D. Castellanos, P. García, and L. Rodríguez, editores. *Diversidad biológica y cultural del Corredor Trinacional de áreas protegidas La Paya - Cuyabeno - Güepí Sekime*. Colombia – Ecuador - Perú. CORPOAMAZONIA, Instituto Alexander von Humboldt, Instituto Sinchi, UAESPNN, Bogotá D.C., Colombia.
- Ruiz, S. L., Sánchez, E., Tabares, E., Prieto, A., Árias, J. C., Gómez, R., Castellanos, D., García, P., Rodríguez, L.** (2007). *Diversidad biológica y cultural del sur de la Amazonia colombiana – Diagnóstico*. CORPOAMAZONIA, Instituto Alexander von Humboldt, Instituto Sinchi, UAESPNN, Bogotá D.C., Colombia. 636 p.
- Santamaría-Rivero, W., Leyequién, E., Hernández-Stefanoni, J. L., Wood, P.** (2016). Influence of landscape structure and forest age on the richness and abundance of different bird feeding guilds and forest-dependent birds in a seasonal dry tropical forest of Yucatan, Mexico. *Tropical Ecology*. 57: 313-332.
- Şekercioğlu, Ç. H.** (2002). Impacts of birdwatching on human and avian communities. *Environmental Conservation*. 29: 282-289.
- SINCHI.** (2012). Zonificación ambiental y ordenamiento de la Reserva Forestal de la Amazonia, creada mediante la Ley 2ª de 1959, en los departamentos de Guainía, Vaupés y Amazonas. Informe Final del Convenio 118 de 2011. Bogotá D.C., Colombia.
- Slager, D. L., Battley, C. J., Bryson, R. W., Voelker, G., Klicka, J.** (2014). A multilocus phylogeny of a major New World avian radiation: The Vireonidae. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 80: 95-104.
- Stiles, F. G. & Naranjo, L. G.** (2017). La avifauna del Parque Nacional Natural Chiribiquete: resultados de tres expediciones recientes a sectores previamente inexplorados. *Revista Colombia Amazónica*. 10: 141-160.
- Stoffer, P. C., Jirinec, V., Rutt, C. L., Bierregaard Jr., R. O., Hernández-Palma, A., Johnson, E. I., Midway, S. R., Powell, L. L., Wolfe, J. D., Lovejoy, T. E.** (2020). Long-term change in the avifauna of undisturbed Amazonian rainforest: ground-foraging birds disappear and the baseline shifts. *Ecology Letters*. Early View: 13628.

- Strimas-Mackey, M., Miller, E. T., Hochachka, W.** (2018). auk: eBird Data Extraction and Processing with AWK. R package version 0.3.0. <https://cloud.r-project.org/package=auk>
- Sullivan, B. L., Wood, C. L., Iliff, M. J., Bonney, R. E., Fink, D., Kelling, S.** (2009). eBird: A citizen-based bird observation network in the biological sciences. *Biological Conservation*, **142**: 2282-2292.
- Tropicos.org, W.** (2020). Tropicos.org Missouri Botanical Garden. Fecha de consulta: 14 de febrero de 2020. Disponible en: <https://www.tropicos.org/home>
- Usma, J. S., Ortega, C., Valenzuela, S., Deza, J., Rivas, J.** (2016). Diversidad biológica y cultural del Corredor Trinacional de áreas protegidas La Paya - Cuyabeno - Güeppí Sekime. WWF, Bogotá D.C., Colombia. 333 p.
- Vásquez-Arévalo, F. A., Zárate-Gómez, R., Socolar, J. B., Díaz-Alván, J., Pérez-Peña, P. E.** (2020). First record of the Gray-legged Tinamou, *Crypturellus duidae*, and other poor-soil specialist birds from peatlands in the Putumayo river basin, Loreto, Peru. *Acta Amazonica*, **50**: 155-158.
- Willman, H., Belmaker, J., Simpson, J., de la Rosa, C., Rivadeneira, M. M., Jetz, W.** (2014). EltonTraits 1.0 : Species-level foraging attributes of the world's birds and mammals. *Ecology*, **95**: 2027.
- Winton, R. S., & Ocampo-Peñuela, N.** (2018). How to realize social and conservation benefits from ecotourism in post-conflict contexts. *Biotropica*, **50**: 719-722.

Artículo original

Efecto de las variables meteorológicas sobre la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) de la lima ácida Tahití en el piedemonte llanero, Colombia

Effect of weather variables on the anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) affecting Tahiti lime in the Colombian eastern foothill piedmont

Ángela María Mogollón-Ortiz¹, Nathali López-Cardona^{2,*},
Javier Orlando Orduz-Rodríguez²

¹ Universidad de los Llanos, Villavicencio, Meta, Colombia

² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, AGROSAVIA. Centro de Investigación La Libertad, Villavicencio, Meta, Colombia

Resumen

La antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) reduce considerablemente el rendimiento de los cítricos. Los síntomas de la enfermedad se caracterizan por necrosis de los pétalos, caída prematura de los frutos y formación de cálices persistentes. Con el fin de determinar el efecto del patrón y de condiciones ambientales como la precipitación, la humedad relativa y la temperatura en el desarrollo de la antracnosis, se seleccionaron al azar plantas de lima ácida Tahití injertadas en seis portainjertos: Citrumelo, Sunky x English, Carrizo, Volkameriano, Kryder 15-3 y Cleopatra, establecidos en un huerto experimental en el Centro de Investigación La Libertad de la Corporación Colombiana Agropecuaria AGROSAVIA en Villavicencio, Meta. El experimento se llevó a cabo durante tres estaciones de floración, cada una con condiciones climáticas diferentes. Se evaluó la incidencia de la enfermedad y el porcentaje de cálices persistentes. Los resultados no evidenciaron diferencias significativas en la incidencia de la enfermedad y el número de cálices persistentes entre los patrones evaluados. Sin embargo, el efecto en la caída de los frutos, expresado en cálices persistentes, dependió de las condiciones climáticas que favorecieron el desarrollo del patógeno, siendo los meses lluviosos, la humedad relativa elevada y las temperaturas bajas factores predisponentes de la pérdida considerable de frutos a causa de la enfermedad en la lima ácida Tahití cultivada en el piedemonte llanero de Colombia.

Palabras clave: Temperatura; Antracnosis; Precipitación; Incidencia; Cálices; Piedemonte.

Abstract

Citrus anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) can cause considerable yield loss in citrus orchards. The symptoms of the disease include petal necrosis, premature fruit drop, and persistent calyces. To determine the effect of the pattern and environmental conditions such as precipitation, relative humidity, and temperature on the development of anthracnose, we randomly selected Tahiti lime plants grafted onto six rootstocks: Citrumelo, Sunky x English, Carrizo, Volkameriano, Kryder 15-3 and Cleopatra prepared at the *Corporación Colombiana Agropecuaria AGROSAVIA "La Libertad"* experimental orchard in Villavicencio, Meta. We conducted the experiment during three flowering seasons, each with different climatic conditions. We evaluated the incidence of the disease and the percentage of persistent calyces. The results showed no significant differences in the incidence of the disease and the number of persistent calyces among the patterns under evaluation. However, the effect on the fruit drop, expressed in persistent calyces, depended on the climatic conditions favoring the development of the pathogen, i.e., the rainy months, the high relative humidity, and low temperatures, as well as predisposing factors causing considerable fruit loss due to the disease in Tahiti limes grown in the Colombian eastern foothill piedmont.

Keywords: Temperature; Anthracnose; Precipitation; Incidence; Calyces; Foothills.

Citación: Mogollón-Ortiz AM, López-Cardona N, Orduz-Rodríguez JO. Efecto de las variables meteorológicas sobre la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) de la lima ácida Tahití en el piedemonte llanero, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):250-259, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1237>

Editor: Jairo Castaño Zapata

***Correspondencia:**

Nathali López-Cardona;
nlopezc@agrosavia.co

Recibido: 15 de junio de 2020

Aceptado: 20 de enero de 2021

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Los cítricos constituyen el cultivo frutal de mayor producción en el mundo (Agusti, *et al.*, 2014). Los principales países productores de lima Tahití son México y Brasil y los mayores consumidores son la Unión Europea, México y Estados Unidos (Valenciano, *et al.*, 2015). En Colombia sobresalen los departamentos de la costa Atlántica, Tolima y el Meta por su potencial de producción debido al régimen pluviométrico que no exige el uso de riego para lograr buenos rendimientos (Orduz, *et al.*, 2009). En el Meta la producción se ha concentrado en pocos municipios del piedemonte llanero, y en los últimos años se ha convertido en un importante productor, con 5 % de la producción total del país, con lo que abastece el mercado local y parte de la gran demanda del mercado de Bogotá (Orduz, *et al.*, 2009).

A pesar de los aspectos favorables para el desarrollo cítrico rentable en el Meta, hay características inherentes del trópico, como la alta precipitación y las temperaturas constantes durante todo el año, que favorecen el ataque continuo de fitopatógenos, factor este que limita la obtención de frutas de buena calidad y es uno de los principales aspectos que deben considerarse en la proyección de una citricultura altamente rentable y competitiva.

El hongo *Colletotrichum* spp., agente causal de la antracnosis, es un patógeno limitante que ocasiona reducciones del 80 % en la producción de cítricos, pues causa la caída de los frutos en desarrollo infectados (Silva, *et al.*, 2014a). La especie *C. acutatum* ya fue reportada como el agente causal de la antracnosis de la lima ácida Tahití en Villavicencio, Meta (Sanabria, *et al.*, 2010).

En los cítricos, *C. acutatum* produce lesiones de color naranja-café en los pétalos tanto de los botones florales como de las flores abiertas, lo que da lugar a la abscisión de frutos en desarrollo y la retención del pedúnculo y los cálices, conocidos también como cálices persistentes, que son el reflejo de los frutos perdidos a causa de la enfermedad (Peres, *et al.*, 2008). El patógeno llega a ocasionar la caída del 100 % de los frutos cuando las condiciones ambientales son favorables (Ciampi, *et al.*, 2013). La frecuencia y la cantidad de las precipitaciones determinan las pérdidas causadas por la antracnosis (Soares, *et al.*, 2015).

A medida que cambian los factores climáticos, el riesgo de la enfermedad también, lo que implica que las estrategias de manejo deben actualizarse dependiendo de las condiciones climáticas (Hernández, *et al.*, 2014). Las épocas con largos periodos de lluvias durante la etapa de la floración favorecen la enfermedad al acortar su ciclo y proporcionan grandes cantidades de inóculo (Kupper, *et al.*, 2012). Uno de los retos en el manejo de la antracnosis es determinar el momento ideal para aplicar fungicidas, de manera que el tipo y la frecuencia de la aplicación de las estrategias de control y las zonas de riesgo están determinadas por las condiciones climáticas (Garrett, *et al.*, 2015; Soares, *et al.*, 2015).

Dada la importancia de los cítricos a nivel regional y la influencia de las condiciones climáticas en el desarrollo de la enfermedad, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la precipitación, la humedad relativa y la temperatura media en el desarrollo de la antracnosis en plantas de lima ácida Tahití injertadas sobre seis patrones: Citrumelo, Sunky x English, Carrizo, Volkameriano, Kryder y Cleopatra bajo las condiciones climáticas del piedemonte llanero.

Materiales y métodos

Localización

El experimento se hizo en un lote del Centro de Investigación La Libertad de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, AGROSAVIA, ubicado en Villavicencio (Meta), en un suelo caolínico clasificado como Typic Hapludox (Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC, 2004), de terraza alta en el piedemonte llanero, a 4°03'20" de latitud Norte y 73°28'40" de longitud Oeste, a una altitud de 334 m s.n.m., con una precipitación media anual de 2.900 mm, temperatura media anual de 27 °C y humedad relativa entre 80 y 95 %. La distribución de la precipitación es monomodal, con un periodo de lluvias que inicia en el mes de marzo y termina en noviembre, y un período seco entre noviembre y marzo.

Descripción del ensayo

Se evaluaron plantas de seis años después de trasplantadas en seis patrones utilizados en cítricos: Citrumelo Swingle o CPB 44-75 (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf. x *Citrus paradisi* Macf.), Kryder 15-3 (*Poncirus trifoliata* (L.) Raf.), Citrange Carrizo (*Citrus sinensis* Osb. x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) y Sunki x English (*Citrus sunki* hort. ex. Tanaka x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.), mandarina Cleopatra (*Citrus reshni* hort. ex Tanaka) y el limón Volkameriana (*Citrus volkameriana* Ten. y Pasq). Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar (BCA) con cuatro repeticiones y seis plantas por unidad experimental. Las plantas evaluadas no recibieron tratamiento con fungicidas de síntesis química durante las etapas previas ni en la evaluación. Antes de iniciar el experimento el lote recibió tratamientos de correctivos y fertilización siguiendo las recomendaciones de **Orduz & Baquero** (2003) para el piedemonte llanero. El experimento comenzó al inicio de las lluvias en abril del 2009.

Variables evaluadas

Durante las tres floraciones ocurridas en octubre del 2015 y marzo y abril del 2016, se hicieron registros diarios de precipitación, humedad relativa y temperatura media de la estación meteorológica del IDEAM ubicada en el centro de investigación La Libertad de AGROSAVIA, ubicada a 500 m del sitio de experimento. Para la variable precipitación, se tuvo en cuenta el registro de lluvia acumulada el día anterior y el día después a la evaluación de la enfermedad en campo.

En cada floración se obtuvo el porcentaje de incidencia seleccionando al azar dos ramas por planta en cada patrón y en cada bloque. La incidencia correspondió al número de flores enfermas con relación al total de flores por rama. En la selección de las ramas se tuvo en cuenta que fueran vigorosas y suficientemente maduras y con una proporción adecuada entre el número de hojas y el número de brotes florales. Una vez iniciada la floración se registraron diariamente los datos relativos a la enfermedad. El porcentaje de cálices persistentes se determinó al final de la floración con base en el número de botones florales iniciales y la caída fisiológica de las flores.

Análisis de los datos

El modelo de análisis de los datos para las variables de incidencia consistió en parcelas divididas arregladas en bloques (tres meses, cada uno correspondiente a una floración); la parcela principal correspondió a los patrones (6 patrones) y la subparcela fue el tiempo de evolución de la enfermedad en días (4 días). En cuanto a la variable de cálices persistentes, se utilizó el tiempo a manera de bloques, en tanto que el error fue la interacción del patrón con el tiempo. Se aplicaron las transformaciones *Box-Cox*; para la incidencia se aplicó la función $\log(\text{Incidencia} + 1)$. Los datos del porcentaje de cálices se transformaron mediante la función $\log(\text{Calices} + 1)$. Posteriormente, todos los datos se sometieron a análisis de varianza y pruebas de Tukey utilizando el programa estadístico R.

Resultados y discusión

Durante los tres periodos de floración de la lima acida Tahití ocurridos en octubre de 2015 y marzo y abril de 2016 se registraron lesiones necróticas en pétalos y la caída prematura tanto de flores como de frutos (**Figura 1**). El incremento significativo diario de la incidencia de la antracnosis durante las floraciones (**Tabla 1**) confirmó la naturaleza de *C. acutatum*, patógeno que en los tejidos jóvenes y sensibles causa un ciclo epidémico rápido con niveles de enfermedad que se incrementan aceleradamente en el hospedante (**Waller, 1992**), lo que la cataloga como una enfermedad de progreso explosivo (**Soares, et al., 2015**) que, en presencia de precipitaciones y de humedades relativas altas, causa considerables pérdidas económicas por el elevado porcentaje de cálices persistentes al final de cada floración (**Figura 1**).

El avance de la incidencia de la antracnosis y su relación con la humedad relativa, la precipitación acumulada, la temperatura media y la velocidad del viento durante las

floraciones de lima ácida Tahití en octubre del 2015 y marzo y abril del 2016 en el piedemonte llanero se presentan en las **figuras 2, 3 y 4**. Bajo las condiciones del estudio, durante la floración de octubre se registraron precipitaciones diarias superiores a los 5 mm, humedades relativas entre 86 y 93 % y una temperatura media entre 26 y 27 °C, lo que dio lugar a porcentajes de incidencia que oscilaron entre 33 y 52 % (**Figura 2 a, b**). La pérdida de frutos en desarrollo reflejada en el porcentaje de cálices persistentes fue de 51 % (**Figura 5**). En abril se dieron condiciones similares de precipitación, humedad relativa y temperatura media entre los 25 y los 28 °C, lo que significó incidencias de 25 a 56 % (**Figura 3a, b**) y un 29 % de cálices persistentes (**Figura 5**). En marzo, cuando no se registraron precipitaciones, la humedad relativa osciló entre 55 y 67 % y la temperatura entre 29 a 32 °C, los porcentajes de incidencia fueron de 9 y 65 % (**Figura 4 a,b**) y solamente se registró un

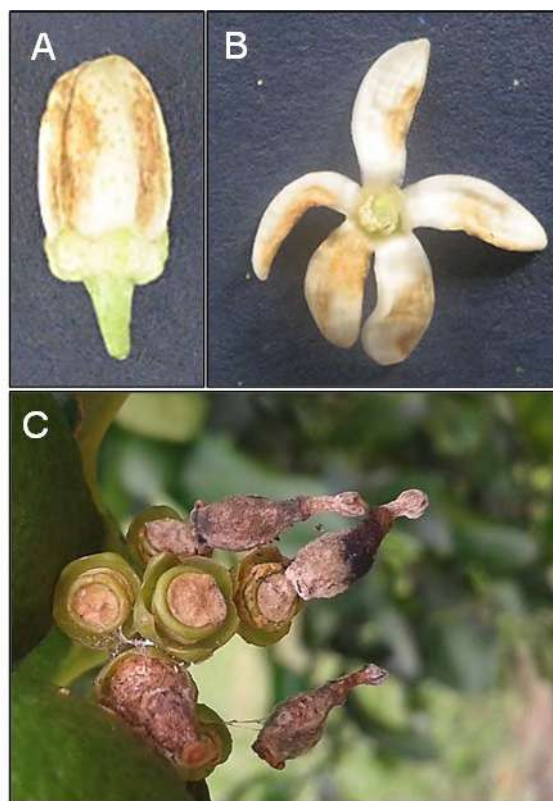


Figura 1. Síntomas característicos de la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) en lima ácida Tahití. **a.** Lesiones necróticas en botones florales. **b.** Lesiones necróticas en flores. **c.** Cálices persistentes y frutos en desarrollo perdidos por causa de la necrosis. Fotografías: Ángela M. Mogollón-Ortíz

Tabla 1. Porcentajes de incidencia de la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) en lima Tahití a lo largo de los días de floración

Días de floración evaluados	Incidencia ^b
Día 4	57,5 a ^a
Día 3	36,5 bc
Día 2	43,4 b
Día 1	27,3 c

^a Lo promedios con diferente letra representan diferencias estadísticas ($p \leq 0,05$); ^b Datos transformados mediante $\log(\text{incidencia} + 1)$

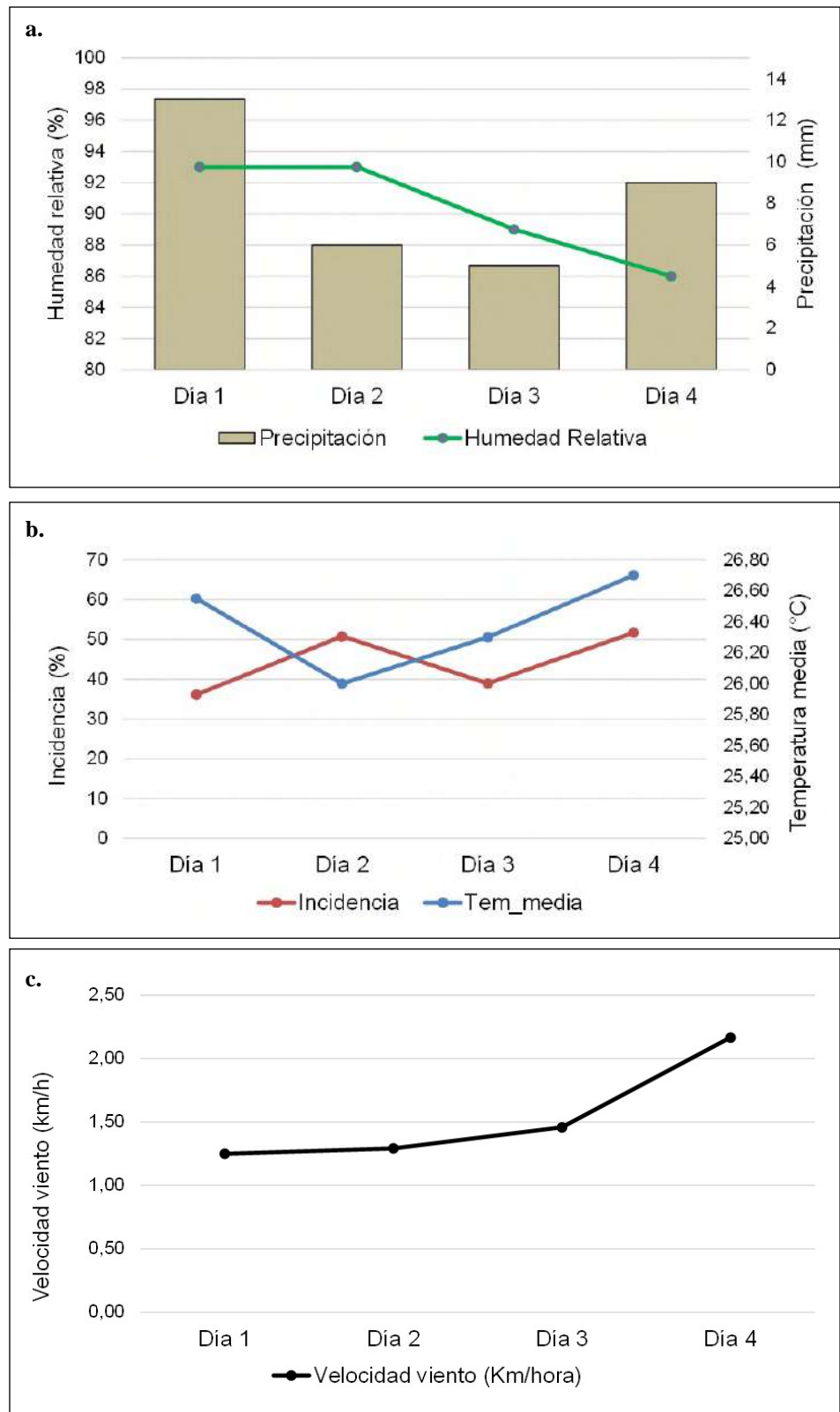


Figura 2. Progreso de la incidencia de la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) y su relación con la humedad relativa, la precipitación acumulada (a), la temperatura media (b) y la velocidad del viento (c) durante la floración ocurrida en octubre del 2015 en lima ácida Tahití en el piedemonte llanero

3% de cálices persistentes (**Figura 5**). A pesar de la presencia de síntomas en todas las floraciones, no se presentaron diferencias significativas entre los periodos evaluados, y la caída de los frutos expresada en cálices persistentes dependió de las condiciones climáticas favorables al desarrollo del patógeno. Los meses lluviosos, las humedades relativas altas y las temperaturas bajas constituyeron factores predisponentes de la enfermedad, lo que

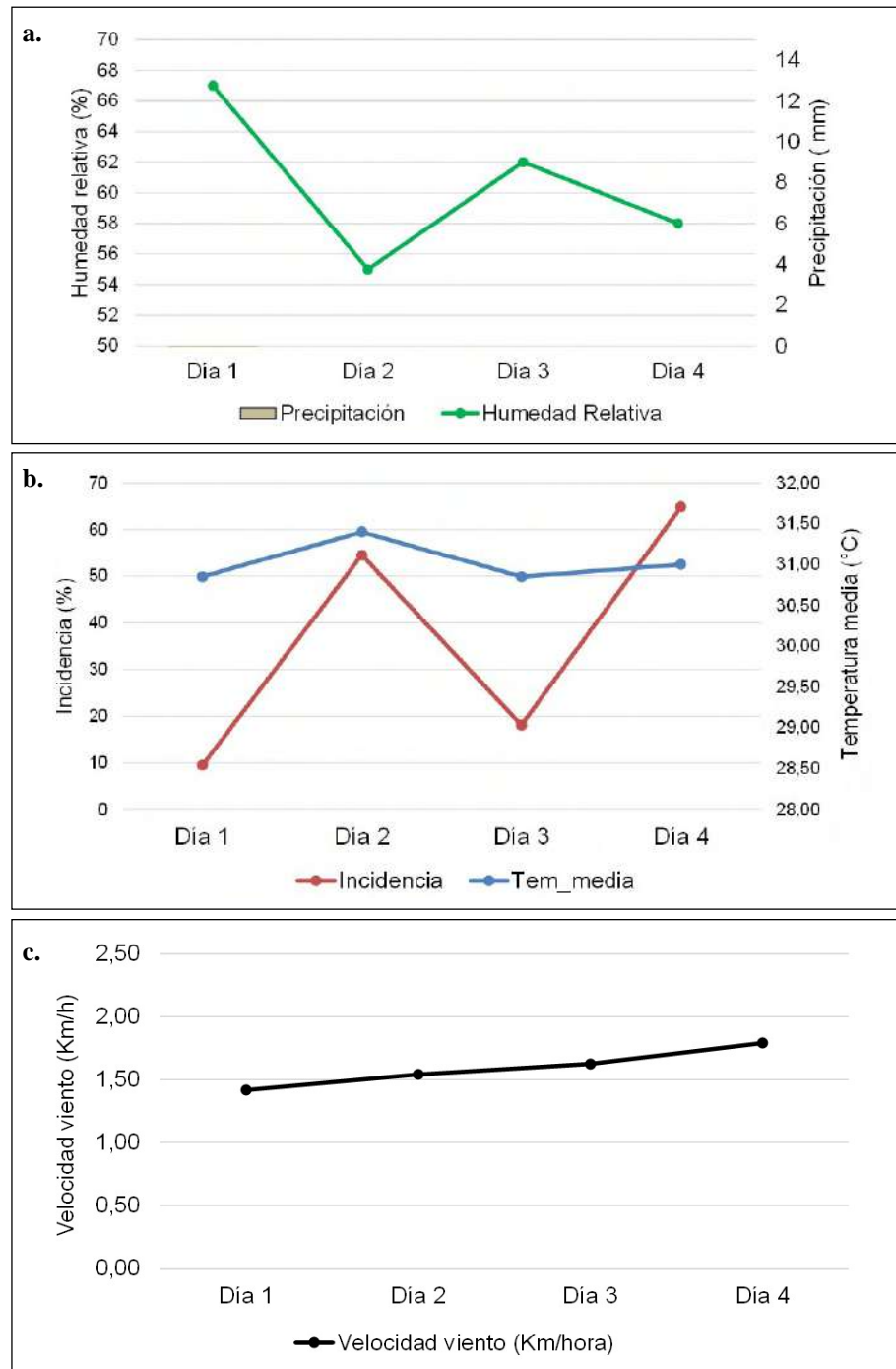


Figura 3. Progreso de la incidencia de la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) y su relación con la humedad relativa, la precipitación acumulada (**a**), la temperatura media (**b**) y la velocidad del viento (**c**) durante la floración ocurrida en marzo del 2016 en lima ácida Tahití en el piedemonte llanero

resultó en pérdidas considerables. Los cáliz persistentes son una variable que refleja el efecto del patógeno en la caída prematura de los frutos (Timmer & Zitko, 1995; Silva, *et al.*, 2014a); sin embargo, la expresión de los síntomas de la antracnosis en una flor no necesariamente da lugar a la formación de un cáliz persistente. La disminución de las precipitaciones durante las floraciones y el incremento de la temperatura ocasionan una disminución significativa en el porcentaje de cáliz persistentes (Neto, *et al.*, 2013).

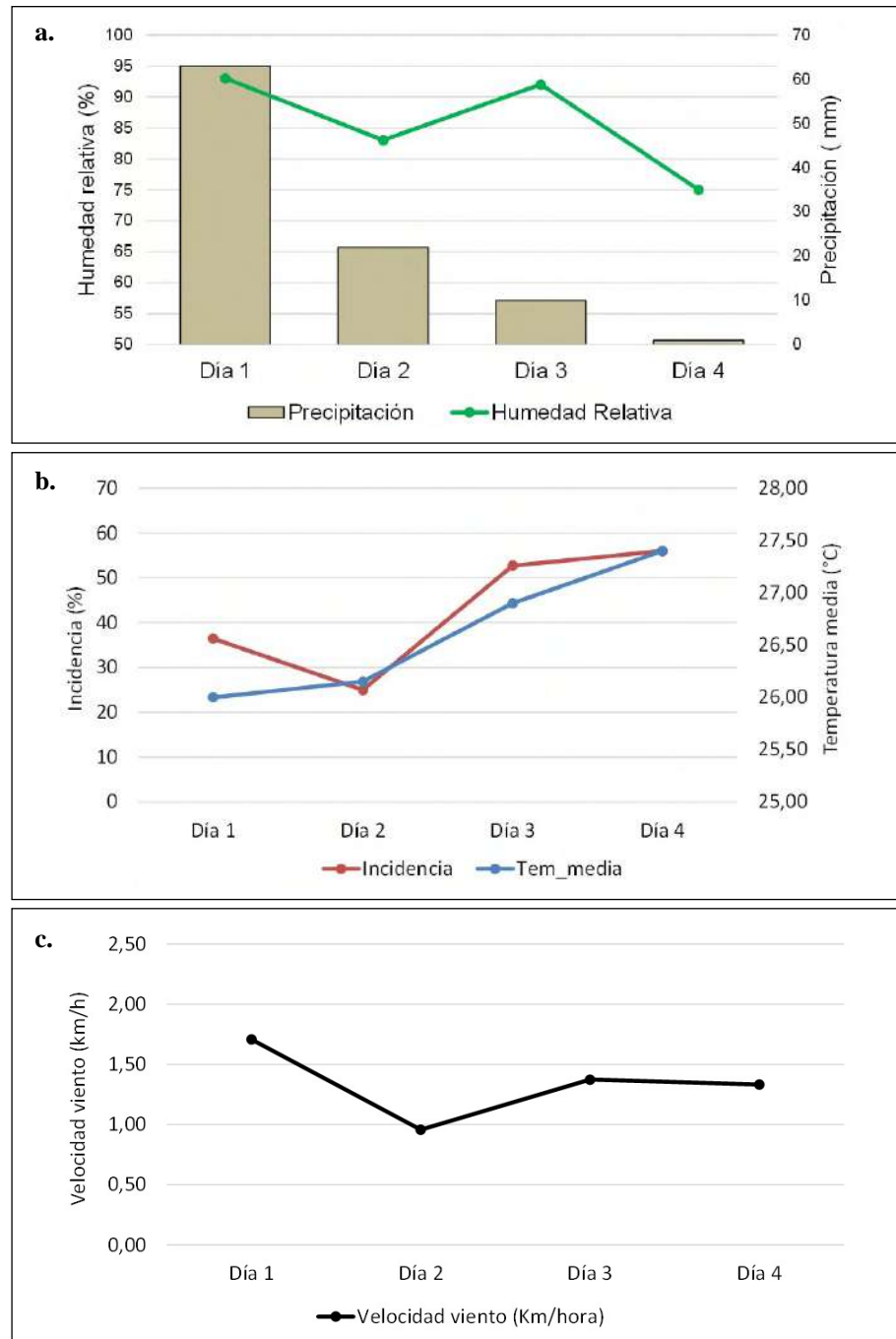


Figura 4. Progreso de la incidencia de la antracnosis (*Colletotrichum acutatum*) y su relación con la humedad relativa, la precipitación acumulada (a), la temperatura media (b), y la velocidad del viento (c) durante la floración ocurrida en abril del 2016 en lima ácida Tahití en el piedemonte llanero

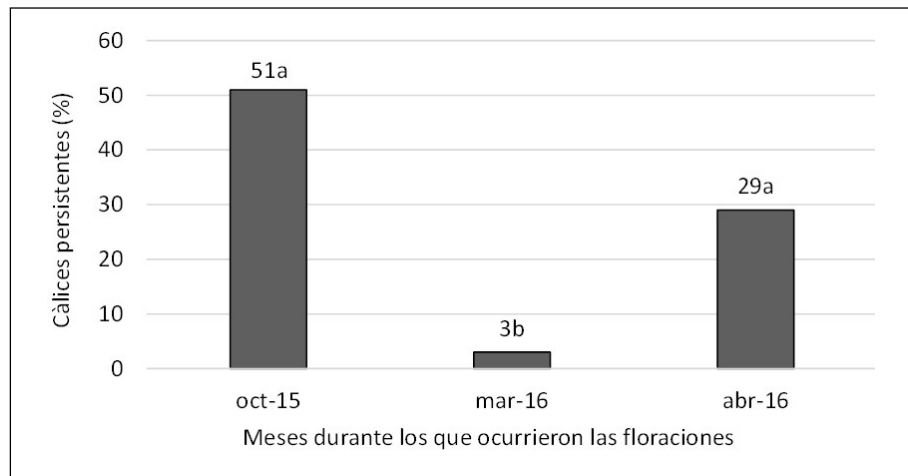


Figura 5. Porcentaje de cálices persistentes causados por *Colletotrichum acutatum* al final de las floraciones ocurridas en octubre del 2015, y marzo y abril del 2016. Datos transformados usando $\log(\text{Calices}+1)$

En resumen, en los tres periodos de floración evaluados, el aumento de la incidencia de la antracnosis coincidió con una humedad relativa promedio del 80 % o más, y temperaturas medias entre 26 y 31 °C (Figuras 2, 3 y 4). Aunque con base en los reportes de la literatura especializada inicialmente se infirió que la precipitación tenía un efecto marcado en el desarrollo de la enfermedad, el periodo de floración evaluado en marzo, que coincidió con la ausencia total de precipitación, permitió comprobar que la antracnosis en la lima Tahití en el piedemonte llanero podría alcanzar una incidencia de hasta un 65 % en ausencia de lluvias si la humedad relativa alcanza el 58 % (Figura 3 a, b). En informes previos se ha destacado la importancia de la precipitación; Silva, *et al.* (2014) y Soares, *et al.* (2015) han coincidido en que *C. acutatum* causa graves daños en la producción de cítricos cuando la floración coincide con una alta precipitación. Según Soares, *et al.* (2015) se requieren 40 mm de precipitación acumulada para alcanzar una incidencia superior al 10 %. El mismo autor señala que con 80 mm de precipitación el 60 % de las flores presentó síntomas. Teniendo en cuenta la característica explosiva de la enfermedad, una vez iniciados los síntomas, su avance es exponencial, por lo que las medidas de control deben aplicarse en el momento indicado, sin espera, incluso cuando se utilizan fungicidas que son efectivos para el control del patógeno (De Goes, *et al.*, 2008).

Teniendo en cuenta los resultados sobre la incidencia de la enfermedad durante la época seca, es importante mejorar la aireación del cultivo mediante un manejo adecuado de la malezas, las podas sanitarias y de formación antes y después del inicio de las lluvias, lo que contribuye a que la incidencia de la enfermedad no aumente en el huerto debido al incremento de la humedad relativa a nivel del dosel de las plantas. En futuros ensayos se recomienda el uso de sensores de humedad y temperatura a diferentes alturas en el dosel de las plantas, así como el registro de la duración de la película de agua sobre los órganos con antracnosis para dar mayor claridad sobre el incremento de la dinámica de la enfermedad en meses de tiempo seco comparados con los lluviosos. Nuestros resultados confirmaron que durante la floración en época seca la variable que contribuyó significativamente al aumento de la epidemia fue la dispersión del patógeno por vientos que superaron la velocidad de 1,6 km/hora (Figura 3 b, c). La variable del viento presentó una correlación positiva ($p=0,005847$) con el aumento de la incidencia de la antracnosis bajo las condiciones del ensayo (Figura 2 c, 3 c, 4 c). En todos los casos, el incremento de la incidencia de la enfermedad coincidió con velocidades del viento superiores a 1,5 km/hora. En estudios previos en cítricos se demostró que las lluvias acompañadas de vientos favorecían la diseminación de *C. gloeosporoides* a varios metros dentro del huerto de estudio (Agostini, *et al.*, 1993).

En las condiciones del presente estudio, los valores de la incidencia de la antracnosis en lima ácida Tahití no presentaron diferencias significativas entre los patrones, lo que demuestra que ninguno de ellos mostró tolerancia a *C. acutatum*. En los cítricos la tolerancia de los patrones a los patógenos está asociada con *Phytophthora* spp., *Citrus tristeza virus* (CTV) y nematodos fitoparásitos (Roose, 2014). En estudios previos sobre la sensibilidad de los clones de lima ácida Tahití “IAC 5”, “IAC 5-1”, “CNPMF/EECB”, “CNPMF 2000” y “CNPMF 2001 frente a *Colletotrichum* spp. se encontró que todos fueron sensibles al agente causal de la antracnosis de los cítricos (Neto, *et al.*, 2016).

Conclusiones

Las mayores pérdidas de frutos en formación de lima ácida Tahití por acción de *C. acutatum* en el piedemonte llanero se asociaron con precipitaciones diarias durante la floración, así como con humedades relativas de 88 % y temperaturas de 27 °C, condiciones que favorecen la infección y el desarrollo de la epidemia y resultan en mayores porcentajes de cálices persistentes, los cuales dan cuenta de las pérdidas asociadas con el patógeno. El viento también tiene un papel determinante en la dispersión del patógeno tanto en las épocas de lluvias como en las secas. Los patrones de lima ácida Tahití, Citrumelo, Sunky x English, Carrizo, Volkameriano, Kryder 15-3 y Cleopatra no previnieron el desarrollo de la antracnosis, pues las plantas evaluadas no presentaron diferencias en cuanto a la incidencia de la antracnosis ni al porcentaje de cálices persistentes.

Agradecimientos

Los autores actuando bajo los lineamientos del marco de cooperación técnica No. 18. 2012 entre la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA) y la Universidad de los Llanos, agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de la República de Colombia y a la Universidad de los Llanos por la financiación de este trabajo de investigación derivado del proyecto titulado “Recomendaciones de uso para patrones de lima ácida Tahití en diferentes zonas del país” formulado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria.

Contribución de los autores

AMMO: concepción y desarrollo de la idea de investigación, obtención de datos en campo, interpretación de los resultados, redacción y revisión de la versión final del manuscrito; NLC: desarrollo de la idea de investigación, interpretación de los resultados, redacción y revisión de la versión final del manuscrito; JOOR: concepción de la idea de investigación, redacción y revisión de la versión final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses que pudieran influir en el proceso de publicación y que el apoyo financiero recibido para la investigación se ha reconocido.

Referencias

- Agostini, J. P., Gottwald, T. R., Timmer, L. W. (1993). Temporal and spatial dynamics of postbloom fruit drop of citrus in Florida. *Phytopathology*. **83**: 485-490. https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1993Articles/Phyto83n05_485.pdf
- Agustí, M., Mesejo, C., Reig, C., Martínez-Fuentes, A. (2014). Citrus production. In *Horticulture: Plants for People and Places*, Volume 1 (p. 159-195). Springer, Dordrecht.
- Ciampi, G. M., Baldauf, C., Souza, A. P., Silva, J. G., Amorim, L. (2013). Recent introduction and recombination in *Colletotrichum acutatum* populations associated with citrus postbloom fruit drop epidemics in São Paulo, Brazil. *Phytopathology*. **104** (7): 769-778. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PHYTO-06-13-0165-R>
- De Goes, A., Garrido, R. B., Reis, R. F., Balsassari, R., Soares, M. A. (2008). Evaluation of fungicide applications to sweet orange at different flowering stages for control of postbloom fruit drop caused by *Colletotrichum acutatum*. *Crop protection*. **27** (1): 71-76. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026121940700107X>

- Garrett, K. A., Nita, M., de Wolf, E. D., Esker, P. D., Gomez, M. L., Sparks, A. H.** (2015). Plant Pathogens as Indicators of Climate Change. En: T.M. Letcher, Climate Change (p. 213-230). Amsterdam, Netherlands: Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044463524200021X>
- Hernández, J., Sharmak, T., Garrett, K.** (2014). Climate change and plant Diseases. En: N. K. Van Alfen. Encyclopedia of Agriculture and food Systems (p. 232-243). Amsterdam, Netherlands: Elsevier. <https://www.elsevier.com/books/encyclopedia-of-agriculture-and-food-systems/van-alfen/978-0-444-52512-3>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi- IGAC.** (2004). Estudio general de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Meta. Bogotá, Colombia. 538 p.
- Kupper, K. C., Correa, F. E., de Azevedo, F. A., da Silva, A. C.** (2012). *Bacillus subtilis* to biological control postbloom fruit drop caused by *Colletotrichum acutatum* under field conditions. Scientia Horticulturae. **134**: 139-143. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423811006157>
- Neto, H. B., Mourão Filho, F. D. A. A., Stuchi, E. S., Espinoza-Núñez, E., Cantuarias-Avilés, T.** (2013). The horticultural performance of five 'Tahiti' lime selections grafted onto 'Swingle' citrumelo under irrigated and non-irrigated conditions. Scientia Horticulturae. **150**: 181-186. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423812004967>
- Orduz, R. J. & Baquero J.** (2003). Aspectos básicos para el cultivo de los cítricos en el Piedemonte Llanero. Achagua. **7**: 7-20. https://repository.AGROSAVIA.co/bitstream/handle/20.500.12324/17995/42686_46781.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Orduz, R. J., León, G., Arango, W. L.** (2009). Lima ácida Tahití: opción agrícola para los Llanos Orientales de Colombia. Villavicencio, Colombia: Corpoica. https://repository.AGROSAVIA.co/bitstream/handle/20.500.12324/12889/44229_56499.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Peres, N.A., Mackenzie, S.J., Peever, T.L., Timmer, L.W.** (2008). Postbloom fruit drop of citrus and Key lime anthracnose are caused by distinct phylogenetic lineages of *Colletotrichum acutatum*. Phytopathology. **98** (3): 345-352. <https://apsjournals.apsnet.org/doi/pdf/10.1094/PHYTO-98-3-0345>
- Roose, M.L.** (2014). Rootstocks. In: L. FERGUSON, C. E. GRAFTON. Citrus production manual. (p. 95-106). Richmond, United States: University of California. Agriculture and Natural Resources. <https://anrcatalog.ucanr.edu/Details.aspx?itemNo=3539>
- Sanabria, A., Mahuku, G., Kelemu, S., Cadavid, M., García, C., Hío, J., Martínez, E., Osorio, J.** (2010). Molecular identification and characterization of *Colletotrichum* sp. isolates from Tahiti lime, tamarillo and mango. Agronomía Colombiana. **28** (3): 391-399. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-99652010000300005&lng=en&nrn=iso
- Silva, J.G., Sposito M.B., Marín D.R., Amorim, L.** (2014)a. Efficacy and timing of application of fungicides for control of citrus postbloom fruit drop. Crop Protection. **59**: 51-56. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261219414000544>
- Silva, J. G., Sposito, M. B., Marin, D. R., Ribeiro, J. P., Amorin, L.** (2014). Spatiotemporal characterization of citrus postbloom fruit drop in Brazil and its relationship to pathogen dispersal. Plant pathology. **63**: 519-529. <https://bsppjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ppa.12138>
- Soares, C. A., Alvares, C.A., Sentelhas, P. C.** (2015). An agro-climatic approach to determine citrus postbloom fruit drop risk in Southern Brazil. International Journal of Biometeorology. **60** (6): 891-905. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26493198>
- Timmer, L. W. & Zitko, S. E.** (1995). Early season indicators of postbloom fruit drop of citrus and the relationship of disease incidence and fruit production. Plant disease. **79**: 1017-1020. https://www.apsnet.org/publications/plantdisease/backissues/Documents/1995Articles/PlantDisease79n10_1017.PDF
- Valenciano, J., Giacinti, B. M., Carretero, G.A.** (2015). Mapas de competitividad internacional del limón (2002-2010) análisis y comparación del modelo español. Almeira, España: I Universidad de Almería. 127 p.
- Waller, J.** (1992). *Colletotrichum* diseases of perennial and other cash crops. In: J. Balley, and M. Jeger. *Colletotrichum*: biology, pathology and control (p. 167-185). Wallingford, United Kingdom: CAB International. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19932328417>

Artículo original

¿En peligro o no? Distribución potencial de la hepática *Pleurozia paradoxa* en Colombia

Endangered or not? Potential distribution of the liverwort *Pleurozia paradoxa* in Colombia

Brayan David Aroca-Gonzalez¹, Robbert Gradstein², Lina Marcela González-Nieves³

¹ Semillero de investigación Biogeografía y Ecología Evolutiva Neotropical BEEN, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

² Albrecht von Haller Institute, Department of Plant Systematics, University of Göttingen, Alemania; Muséum National d'Histoire Naturelle, Institut de Systématique, Evolution, Biodiversité, Paris, France

³ Grupo de Ecología y Biología Tropical - ECOBIT, Universidad Incca de Colombia, Bogotá, Colombia

Resumen

La especie *Pleurozia paradoxa* es una hepática de hábitat generalmente paramuno que se encuentra en estado vulnerable según el libro rojo de briófitas de Colombia debido a su poca presencia y su minúscula área de ocupación en el país. Mediante la aplicación de modelos de distribución de especies podemos estimar áreas de idoneidad que dan cuenta de la presencia probable de una especie. En este caso se usó un algoritmo de aprendizaje de máquinas denominado máxima entropía y el *software* Maxent, con el fin de obtener mapas de distribución potencial. Se emplearon varios registros de presencia y distintos juegos de variables climáticas para el modelamiento, además de un umbral de maximización de la especificidad y sensibilidad en el mapeo. Como resultado, la distribución potencial de *P. paradoxa* en Colombia se concentró en los departamentos del Cauca, Huila y Nariño a lo largo de la cordillera Central, extendiéndose levemente hacia el Valle del Cauca y Tolima, y en marcada relación con la altitud y el clima de dichas zonas.

Palabras clave: Briófitas; Conservación; MaxEnt; Modelamiento; Variables ambientales.

Abstract

Pleurozia paradoxa is a vulnerable liverwort from upper montane and paramo habitats in Colombia according to the Red Book of Bryophytes of Colombia due to its scarce presence and a small area of occupation in the country. Using species distribution models, it is possible to assess suitability areas accounting for the probable presence of species. We used a maximum entropy machine-learning algorithm to obtain potential distribution maps based on field records and climatic variables. The potential distribution of *P. paradoxa* in Colombia appeared to be concentrated in the Cordillera Central, departments of Cauca, Huila, and Nariño, extending slightly northwards to Valle del Cauca and Tolima, in strong correlation with altitude and climate.

Keywords: Bryophytes; Conservation; Environmental variables; Maxent; Modeling.

Introducción

Pleurozia paradoxa (J.B.Jack) Schiffn. (Schiffner, 1893) es una especie de hepática del grupo de las briófitas con distribución restringida a ciertos tipos de suelo y elevaciones por sobre los 3.000 m s.n.m. (Griffin, *et al.*, 1982) en la zona sur de los Andes colombianos. La especie está catalogada en el libro rojo de briófitas de Colombia como vulnerable debido a su escasa presencia y reducida área de ocupación (Linares & Uribe, 2002). El estado de sus poblaciones se desconoce, pero se sabe que también puede encontrarse en Guyana, Venezuela, Ecuador y Chile (Griffin, *et al.*, 1982). En Colombia los registros de *P. paradoxa* datan de 1878 en Nariño, donde se halla la localidad tipo de la especie. A *P. paradoxa*

Citación: Aroca-Gonzalez BD, Gradstein R, González-Nieves LM. ¿En peligro o no? Distribución potencial de la hepática *Pleurozia paradoxa* en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):260-271, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1343>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Brayan David Aroca Gonzalez;
bdarocag@correo.udistrital.edu.co

Recibido: 4 de noviembre de 2020

Aceptado: 16 de enero de 2021

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

también se le conoció como *Physotium paradoxum* J.B.Jack (**Jack**, 1886) y *Eopleurozia paradoxa* (J.B.Jack) R.M. Schust. (**Schuster**, 1961), pero actualmente *Pleurozia paradoxa* es el nombre aceptado (**Thiers**, 1993; **Gradstein & Uribe**, 2016c).

Pleurozia paradoxa se encuentra en la lista de especies silvestres amenazadas de Colombia contenida en la resolución número 1912 de 2007 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, una medida a favor de su conservación y la de otras briófitas que cumplen funciones de gran relevancia ecológica, como la regulación de la humedad y el control de la calidad del agua, entre otras, y que, además, son muy sensibles a los fenómenos de contaminación y deforestación (**Churchill & Linares**, 1995; **Gradstein & Sporn**, 2010).

Por tal razón, la aplicación de técnicas como los modelos de distribución de especies (MDE) es verdaderamente útil, pues con ellos es posible predecir las áreas de distribución en una unidad geográfica determinada a partir de registros y atributos ambientales empleados como variables explicativas en la implementación de los algoritmos de modelamiento. Estas predicciones posibilitan la comprensión de los patrones de distribución geográfica de cualquier especie, en este caso de *P. paradoxa*, la cual se encuentra bajo amenaza por el pequeño número de áreas de ocupación que tiene en el país. Así, los MDE tienen la capacidad de representar la realidad geográfica de una especie en un espacio cartográfico con potenciales usos (**Guisan & Zimmermann**, 2000), por ejemplo, en la detección de lugares idóneos para la conservación (**Martínez-Meyer, et al.**, 2006), futuras investigaciones (**Pearson, et al.**, 2007), y la detección de alteraciones en la distribución de la especie por cambios climáticos, entre otros. En el caso de especies en peligro, se utilizan para la delimitación de nuevas áreas de protección, el diseño de políticas de protección ambiental e, incluso, la adopción de disposiciones que limiten la entrega de licencias mineras en el contexto del creciente despliegue de la extracción minero-energética en países como Colombia (**Cárdenas & Reina**, 2008), la cual pone en riesgo la conservación de especies con densidad poblacional reducida.

No se han adoptado medidas de conservación para esta especie de briófitas u otras similares. Sin embargo, en diversos estudios sí se ha hecho el esfuerzo de conocer la riqueza, la diversidad y las amenazas contra las especies de briófitas colombianas. Algunos de estos trabajos son el catálogo de hepáticas y antocerotes de Colombia (**Gradstein & Uribe**, 2016a, 2016b), la introducción a la flora de musgos de Colombia (**Churchill & Linares**, 1995), estudios sobre la flora y la vegetación amenazadas (**Rangel**, 2000) y el libro rojo de las especies de briófitas de Colombia (**Linares & Uribe**, 2002).

Los MDE generalmente se hacen para otras unidades biológicas con gran número de registros. En las briófitas su uso ha sido innovador, en especial, por su aplicación a su conocimiento biogeográfico (**Guisan, et al.**, 2017; **Vanderpoorten & Patiño**, 2018). Diversos estudios han revelado la existencia de patrones climáticos distinguibles que pueden explicar la distribución a gran escala de distintos grupos de briófitas (**Sérgio, et al.**, 2005; **Hespanhol, et al.**, 2015; **Wierzcholska, et al.**, 2020), y en algunos se ha modelado la distribución de varios grupos de briófitas, con el fin de ubicarles en espacios geográficos donde potencialmente podrían encontrarse, o donde se han hallado nuevos registros y se desea ampliarlos (**Kruijer, et al.**, 2010; **Sandanov & Pisarenko**, 2018). En otros estudios sobre briófitas se ha comprobado que los MDE son una herramienta útil para hallar áreas especiales de conservación (**Poncet, et al.**, 2015; **Burneo & Benitez**, 2020). Los MDE en especies catalogadas como en peligro de extinción son menos comunes, pero con ellos se logran formular e indicar los puntos más relevantes que deben tenerse en cuenta para aplicarlos de manera efectiva en briófitas (**Číhal & Kaláb**, 2017) o en otros organismos (**Thapa, et al.**, 2018; **Saarimaa, et al.**, 2019).

En ese contexto, en el presente estudio se los aplicó por primera vez en las briófitas con el objetivo de generar el mapa de distribución potencial de *P. paradoxa* en Colombia. Con ello se pretende aportar información relevante para esclarecer el verdadero estado de conservación de la especie y, posiblemente, de otras con características similares, además de promover la búsqueda *in situ* y, así, incrementar el número de presencias registradas.

Materiales y métodos

Coordenadas y variables ambientales

Los datos sobre la presencia de *P. paradoxa* se obtuvieron del banco de datos sobre biodiversidad GBIF (<http://www.gbif.org/>), el catálogo de plantas y líquenes de Colombia (<http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/>), así como del proyecto *Andean Bryophytes* alojado en la página Tropicos del *Missouri Botanical Garden* (<http://legacy.tropicos.org/Project/ANBRY>). Los lugares de presencia incluyeron seis registros dentro del territorio colombiano con los límites máximos y mínimos de su distribución en dicha área geográfica (**Figura 1**). Para el modelamiento de la distribución potencial, se utilizaron 19 capas bioclimáticas en formato ráster obtenidas del repositorio de datos climáticos WorldClim (<https://www.worldclim.org/>), con una resolución espacial de 30 segundos de arco 9 (~ 1 km) (**Hijmans, et al., 2005**). Las capas climáticas comprenden tendencias anuales (temperatura media anual y precipitación), de estacionalidad (rango anual de

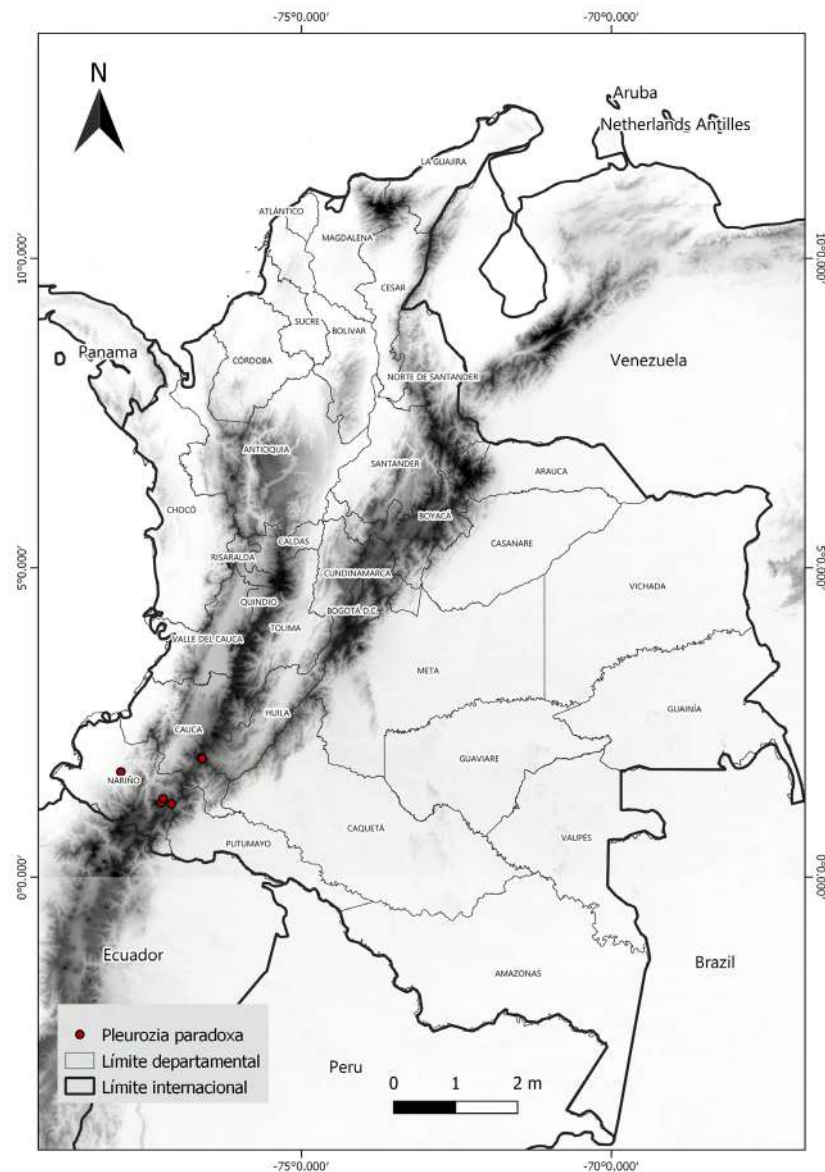


Figura 1. Registros de la presencia de *Pleurozia paradoxa* en Colombia

temperaturas y precipitación) y factores ambientales de índole limitante (temperatura y precipitación trimestral) (**Hijmans, et al., 2005**). Además, se incluyó la capa de elevación de WorldClim, con una resolución igual a las demás.

Modelo de distribución potencial

Con el fin de reducir la colinealidad entre las variables (capas) de predicción, se utilizaron dos filtros. El primero, un test de correlación de Pearson entre las capas, y el segundo, el factor de inflación de varianza (VIF), los dos aplicados mediante el lenguaje de programación R v 4.0.0 (**R Development Core Team, 2012**). Estas estrategias se han implementado en múltiples modelos de distribución (**Ranjitkar, et al., 2014a; Ranjitkar, et al., 2014b; Lauria, et al., 2015**). La elección de las variables se hizo a partir de los resultados de estos dos filtros. Para el test de correlación de Pearson se eligió una sola variable de un grupo de variables correlacionadas bajo el umbral de 0,85 %, y para el VIF aquellas con resultados menores a 10. Se ha demostrado que el mantener variables con elevada colinealidad afecta fuertemente el rendimiento de cualquier modelo (**Quinn & Keough, 2002; Feng, et al., 2009**). Finalmente, se obtuvo un juego de cuatro variables ambientales (**Tabla 1**).

Para el modelamiento se aplicó el algoritmo de máxima entropía (Maxent 3.4.1), uno de los más utilizados y especialmente eficaz para datos relativos únicamente a la presencia (**Elith, et al., 2006; Wisz, et al., 2008; Elith, et al., 2010**), con lo que se logró hallar la distribución potencial de *P. paradoxa*. Se detectaron algunas limitantes con respecto al sesgo de muestreo, el área de modelamiento, la selección de características y la manipulación de los parámetros internos del algoritmo (como el multiplicador de regularización) (**Elith, et al., 2010; Kramer-Schadt, et al., 2013; Radosavljevic & Anderson, 2014**). Para disminuir cualquier interferencia ocasionada por alguno de estos eventos, se hizo una comparación de modelos con múltiples configuraciones partiendo de una predeterminada y manipulando los valores del multiplicador de regularización desde 0,5 a 5 cada 0,5, para un total de 10 configuraciones. Además, se compararon todas las características disponibles (L: lineal, Q: cuadrática, H: bisagra, P: producto, T: umbral) en diferentes combinaciones siguiendo las recomendaciones de la literatura (**Anderson & González, 2011; Muscarella, et al., 2014; Radosavljevic & Anderson, 2014; Su, et al., 2015; Aryal, et al., 2016**). Por último, se eligió el mejor modelo de todas las configuraciones usadas para cada una de las especies con base en el criterio de información de Akaike (*Akaike information criteria*, AIC), priorizando la menor pérdida de información, es decir, los valores más bajos de AIC (**Akaike, 1974**). Asimismo, se utilizó el área bajo la curva (*area under curve*, AUC), pero desde un enfoque comparativo, como lo recomiendan **van Proosdij, et al. (2016)**, dado que la cantidad de sitios de presencia no permite un óptimo entrenamiento y prueba en los modelos. La AUC varía de 0 a 1, donde un AUC > 0,5 indica que el modelo es mejor que uno generado aleatoriamente (**Phillips, et al., 2006**).

Selección y validación del modelo

Los modelos se seleccionaron a partir del AIC, método superior a otros especialmente utilizado cuando los tamaños de muestra son pequeños (**Warren & Seifert, 2011**). Cabe resaltar que en dichos casos el enfoque debe ser comparativo, sin asegurar una validez total

Tabla 1. Variables ambientales seleccionadas y porcentaje de contribución e importancia en el modelo de distribución potencial. Variables obtenidas de WorldClim (**Hijmans, et al., 2005**).

Variable	Importancia (%)	Contribución (%)
Isotermalidad (BIO3)	42,6	55,4
Precipitación del mes más seco (BIO14)	35,4	10,2
Estacionalidad de la precipitación (BIO15)	21,8	34,3
Rango de temperatura anual (BIO7)	0,2	0

de los modelos. En la evaluación del AIC se utilizó el paquete ENMeval (Muscarella, *et al.*, 2014) y todos los modelos construidos. A partir del resultado de la evaluación, se eligió el mejor modelo con el valor de AIC más bajo y con base en él se estableció una categorización para definir los niveles de potencialidad de la presencia de la especie en cuatro categorías: nula (0 – 0,44), baja (0,44 – 0,5), moderada (0,5 – 0,8) y alta (0,8 – 1), con base en un umbral logístico del 10 % con respecto a la idoneidad de hábitat predicha. La estrategia de validación de los modelos consistió en la comparación con respecto a las distribuciones conocidas en la literatura y la opinión de expertos. A partir de este cruce, se confirmaron y discutieron los resultados que aquí se presentan.

Evaluación del estado de conservación

Se obtuvo la capa de áreas protegidas de Colombia, la cual se superpuso en el mapa resultante con su respectiva categorización de potencialidad. Se calculó el porcentaje de territorio para cada categoría de potencialidad dentro de las áreas protegidas utilizando la herramienta de cálculo vectorial de QGIS. Con ello, se identificaron las zonas con gran posibilidad de presencia de *P. paradoxa* y su respectivo estado de protección. Además, se señalaron los sitios de preferencia para la protección o conservación de esta especie que aún no se encuentran en las áreas protegidas de Colombia.

Resultados

Selección del modelo, rendimiento y variables

De los 60 modelos candidatos se eligió el mejor, es decir, el de menor valor de AIC (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1343/2971>). Las configuraciones óptimas según el modelo final correspondieron a un regulador de multiplicación de 0,5 y características L: lineal. El valor de AIC fue de 159,07 y el de la AUC en cuanto a la precisión del modelo se ubicó en 0,93, que en los casos de datos abundantes implicaría un rendimiento del modelo por encima de la aleatoriedad y con un margen de precisión muy elevado. Sin embargo, como en este caso el enfoque de validación no permitía una interpretación de este tipo, la única forma de analizarlo fue comparando el AIC con los demás modelos, siendo este el más bajo.

Las variables utilizadas se seleccionaron según los parámetros ya descritos y se señalaron los valores según su contribución e importancia. En primer lugar se ubicó la variable isothermalidad (BIO3), con una importancia del 42,6 %, seguida de la precipitación del mes más seco (BIO14), con 35,4 %, la estacionalidad de la precipitación (BIO15), con 21,8 % y el rango de temperatura anual (BIO7), con 0,2 %, las cuales representaban contribuciones relativas de 55,4, 10,2, 34,3 y 0 %, respectivamente (**Tabla 1**).

Distribución potencial y áreas protegidas

El modelo de distribución potencial predijo un área idónea total de aproximadamente 61 millones de km², lo que representa cerca del 5 % del territorio colombiano. Las áreas de idoneidad categorizadas como de alta probabilidad se encuentran en las zonas de cordillera de los departamentos de Nariño, Cauca y Huila y corresponden a unos 19 millones de km², un 1,6 % del territorio. Otros segmentos de gran probabilidad se encuentran en dirección norte en los departamentos de Tolima y Valle del Cauca. Las probabilidades medias conservaron el mismo patrón y aumentaron en rango las áreas de idoneidad esperada, cubriendo cerca de 23 millones de km², lo que significa hasta un 2 % del área total de Colombia. Las zonas de probabilidad baja presentaron una sección atípica que es notoria al sureste del país, en los departamentos de Amazonas y Vaupés, con 18 millones de km², 1,5 % del área geográfica nacional (**Tabla 2**) (**Figura 2**). Otros fragmentos de probabilidad se apreciaron incluso más al norte, pero se encontraban altamente dispersos.

De las 1.343 áreas protegidas (<https://runap.parquesnacionales.gov.co/>), solamente 500 quedaron cubiertas por las áreas de idoneidad predichas, por lo menos 18.341 km², y se distribuyeron así: como de probabilidad alta, 5.821 km², media, 6.737 km² y baja, 5.783 km², es decir, 5, 5,8 y 5 % del total de áreas protegidas en Colombia, respectivamente (**Tabla 2**) (**Figura 3**).

Tabla 2. Probabilidad de área de idoneidad predicha (km², %) y cobertura de áreas protegidas (AP) de *Pleurozia paradoxa* comparadas con el territorio colombiano (COL)

Zona	Probabilidad área idónea predicha			Territorio	
	Baja (km ² ,%)	Media (km ² ,%)	Alta (km ² ,%)	Restante (km ² ,%)	Total (km ²)
COL	19.800.000 (1,7)	23.400.000 (2)	18.100.000 (1,5)	1.081.700.000 (94,8)	1.143.000.000
AP	5783 (5,0)	6.737 (5,8)	5.821 (5,0)	97.659 (84,2)	116.000

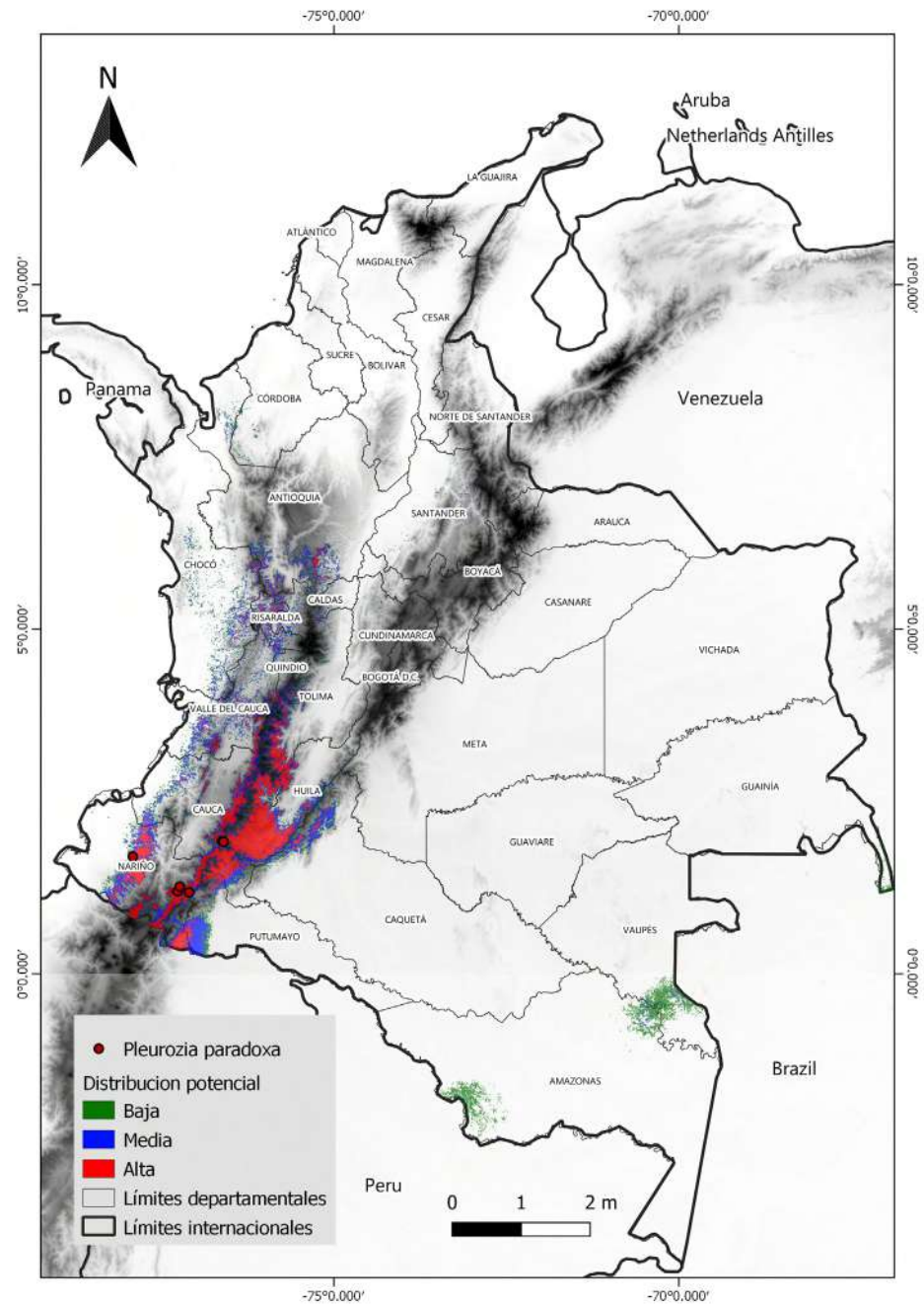


Figura 2. Mapa de distribución potencial de *Pleurozia paradoxa* bajo la categorización de potencialidad con base en el umbral logístico del 10 %

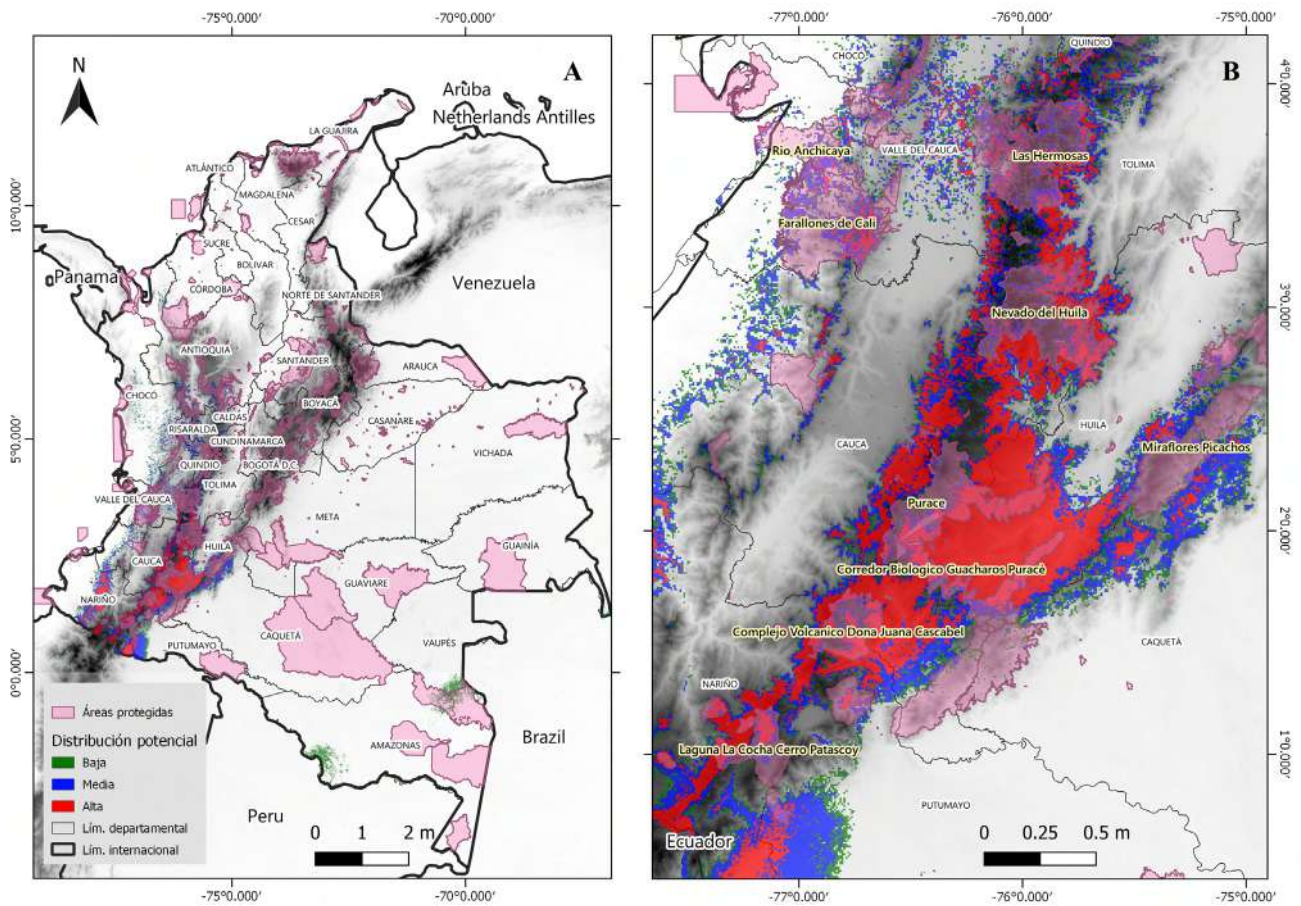


Figura 3. Mapa de distribución potencial de *Pleurozia paradoxa* y capa de áreas protegidas en Colombia. **A.** Mapa general. **B.** Ampliación del modelo de alta presencia

Discusión

El proceso de construcción de un MDE conlleva ciertos aspectos que deben tenerse en cuenta. Más allá de la elección de la especie o las variables que serán incluidas, es importante en todo momento que los resultados sean estadísticamente robustos. Para los modelos de poca presencia esto es un reto porque en sí mismos no cuentan con la información suficiente para realizar predicciones sólidas. Sin embargo, se han desarrollado técnicas que, si bien no aseguran su fiabilidad, reducen notablemente la aleatoriedad y permiten seleccionar un mejor modelo. Algunas de ellas, como el AIC, han demostrado ser criterios de selección bastante óptimos cuando el número de presencias es bajo (**Warren & Seifert, 2011**). Al comparar el resultado del modelo seleccionado con el modelo de mayor AIC, se obtuvo una diferencia de 49 puntos (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1343/2971>). El valor más alto fue bastante amplio y se vio castigado por el exceso de parámetros ajustados en demasía. Por este motivo, se seleccionaron modelos con valores de AIC bajos, que representan una menor entropía relativa y, por consiguiente, tienen menores tasas de error, algo que también se conoce como pérdida de información (**Akaike, 1974**).

Con respecto a las variables, llamó la atención la variable de isothermalidad (BIO3), una variable que representa la razón de variabilidad entre el rango de temperatura diario y el rango de temperatura anual (**O'Donnell & Ignizio, 2012**). Los valores de este factor en los puntos de presencia de *P. paradoxa* evidenciaron cómo los cambios concretos en la variabilidad de la temperatura diaria comparada con la anual afectaron directamente su

distribución. Así, la isothermalidad (BIO3) se convierte en uno de los parámetros climáticos más importantes para la distribución de *P. paradoxa* junto con la precipitación del mes más seco (BIO14) y la estacionalidad de la precipitación (BIO15), con un alto grado de relevancia para el modelo (Tabla 3) y una fuerte relación con *P. paradoxa*. En otros estudios no se ha encontrado un patrón de la contribución específica de alguna variable para el modelamiento general de las especies de briófitas.

La distribución potencial de *P. paradoxa* fue conservadora y consecuente con las distribuciones ya conocidas (Figura 2). La predicción de alta probabilidad se concentró en los departamentos donde esta especie ya es conocida (Cauca, Huila y Nariño) y donde siempre ha sido reportada (Griffin, *et al.*, 1982; Thiers, 1993; Uribe & Gradstein, 1998; Linares & Uribe, 2002; Gradstein & Uribe, 2018). Dichos reportes ubican a *P. paradoxa* como una especie usualmente presente en los Andes en ecosistemas de páramo, pero con una gran exigencia frente a parámetros ambientales concretos que la delimitan espacialmente. En trabajos de campo se ha encontrado que *P. paradoxa* crece específicamente sobre bases de troncos en bosques montanos superiores o en suelos pobres y ácidos sobre rocas areniscas o cristalinas con muy bajo contenido mineral, no en áreas volcánicas (Gradstein, 2020). Por otra parte, el mapa geológico y de unidades cronoestratigráficas de Colombia levantado por el Servicio Geológico Colombiano (<https://www.sgc.gov.co/>) ubica la presencia de *P. paradoxa* en otros tipos de suelos. Dado que las capas de suelos no poseen el nivel de detalle, escala y resolución necesarios para ser comparadas, no fue posible confirmar esa hipótesis, o incluirlas en los modelos. Como lo mencionan Furnes & Grime (1982), Convey & Lewis-Smith (2006) y Vanderpoorten & Goffinet (2009), el sustrato y microclima son algunos de los factores imprescindibles en la distribución de las briófitas, siendo incluso más importantes que los factores macroclimáticos y la clasificación de los suelos a gran escala. Surge entonces la necesidad de investigar con el fin de construir capas más detalladas y, quizá, mejor adaptadas para este tipo de organismos. Se sugiere la implementación de dichas capas en áreas geográficas de menor tamaño.

Algunas secciones de la idoneidad predicha que se presentaron fragmentadas o dispersas no deben tenerse en cuenta dada su poca continuidad. En la mayoría de ocasiones, estas representan probabilidades bajas, menores a las del criterio del umbral para la conversión de la probabilidad; un umbral que si se ubica por encima de 0,5 indica una presencia efectiva (Jiménez-Valverde & Lobo, 2007; Kumar & Stohlgren, 2009). Teniendo en cuenta esto, la distribución potencial de *P. paradoxa* se presume en áreas de alta probabilidad continuas y extensas, en tanto que las secciones dispersas deben considerarse con cautela.

Tomando como referencia el mapa de distribución potencial y superponiendo la capa de áreas protegidas (Figura 3), se establecieron tres sitios importantes de conservación para *P. paradoxa*: el Parque Nacional Natural Puracé, el Nevado del Huila y el complejo volcánico Doña Juana Cascabel. Estos sitios presentan características ecológicas de preferencia para la especie y se encuentran bajo jurisdicción de parques nacionales naturales

Tabla 3. Valores de las variables climáticas en cada punto de presencia de *Pleurozia paradoxa*

Presencias	Variables bioclimáticas			
	BIO 14 (mm)	BIO 15 (%)	BIO 3 (%)	BIO 7 (°C)
1	62	33,3	90	10,6
2	95	21,1	89	10,6
3	96	21,9	89	10,3
4	112	18,3	90	10,0
5	115	24,0	88	9,8
6	251	20,0	92	10,0

de Colombia. Otros sitios de menor trascendencia para la protección de *P. paradoxa* son el conjunto de parques naturales regionales de los departamentos de Cauca, Huila y Nariño, que poseen un territorio delimitado hasta los 3.000 m s.n.m., como lo son el corredor biológico Guarachos-Puracé, la serranía de Minas, el páramo Las Ovejas-Tauso y el páramo Paja Blanca.

Las áreas de distribución potencial de *P. paradoxa* en áreas protegidas aparentemente presentan un óptimo estado, lo que permite ver con ilusión el futuro de la especie. No obstante, se hacen necesarias más investigaciones y exploraciones en búsqueda de especímenes de *P. paradoxa* para evaluar y definir con mayor claridad su estado de conservación y así puntualizar las medidas correctas para protegerla y preservarla.

Dado que esta investigación constituye la primera aplicación de los modelos de distribución potencial en briófitas en Colombia, se recomienda seguir trabajando en la distribución potencial de *P. paradoxa* y la de otras especies de briófitas, centrándose en el microclima y el sustrato como factores explicativos.

Información suplementaria

Tabla 1S. Resultados de los valores de AUC y AIC de los modelos, con sus respectivas configuraciones. Vea la tabla 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1343/2971>

Contribución de los autores

BDAG: diseño metodológico, análisis de resultados, elaboración de figuras, redacción, escritura y envío del manuscrito a la revista; SRG: asesoría, apoyo en datos y análisis ecológico de la especie, revisión y análisis bibliográfico, corrección y aportes al manuscrito; LMGN: apoyo en el análisis, redacción, edición y escritura del manuscrito

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Akaike, H.** (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **19**: 716-723.
- Anderson, R.P. & Gonzalez, Jr. I.** (2011). Species-specific tuning increases robustness to sampling bias in models of species distributions: An implementation with Maxent, *Ecological Modelling*, **222**: 2796-2811.
- Aryal, A., Shrestha, U.B., Ji, W., Ale, S.B., Shrestha, S., Ingty, T., Maraseni, T., Cockfield, G., Raubenheimer, D.** (2016). Predicting the distributions of predator (snow leopard) and prey (blue sheep) under climate change in the Himalaya. *Ecology and Evolution*, **6**: 4065-4075.
- Bernal, R., Gradstein, S.R., Celis, M.** (eds.) (2016). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Fecha de consulta: 7 de mayo, 2018. Disponible en: <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Burneo, M. & Benítez, Á.** (2020). Distribución potencial y áreas prioritarias para la conservación de briófitas en Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, **10**: 1-13.
- Cárdenas, M. & Reina, M.** (2008). La minería en Colombia: Impacto socioeconómico y fiscal. Colombia: Fedesarrollo. p. 13-16.
- Číhal, L. & Kaláb, O.** (2017). Species distribution models for critically endangered liverworts (Bryophyta) from the Czech Republic: A guide to future survey expeditions. *Acta Musei Silesiae, Scientiae Naturales*, **66**: 101-110.
- Churchill, S.P. & Linares, E.** (1995). *Prodromus bryologiae Novo-Granatensis: introducción a la flora de musgos de Colombia*. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales – Universidad Nacional de Colombia. p. 1-924.
- Convey, P. & Lewis-Smith, R.I.** (2006). Geothermal bryophyte habitats in the South Sandwich Islands, maritime Antarctic. *Journal of Vegetation Science*, **17**: 529-538.
- Elith, J., Graham, C., Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., Hijmans, R., Huettmann, F., Leathwick, J., Lehmann, A., Li, J., Lohmann, L., Loiselle, B., Manion, G., Moritz, C.,**

- Nakamura, M., Nakazawa, Y., Overton, J., Peterson, A., Zimmermann, N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. **29**: 129-151.
- Elith, J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y.E., Yates, C. (2010). A statistical explanation of MAXENT for ecologists. *Diversity and Distributions*. **17**: 43-57.
- Feng, X., Park, D.S., Liang, Y., Pandey, R., Papeş, M. (2019). Collinearity in ecological niche modeling: Confusions and challenges. *Ecology and Evolution*. **9**: 10365-10376.
- Furness, S.B. & Grime, J. P. (1982). Growth rate and temperature responses in bryophytes. II. A comparative study of species of contrasted ecology. *Journal of Ecology*. **70**: 525-536.
- GBIF. (2018). Página de Inicio de GBIF. Fecha de consulta: 7 de mayo de 2018. Disponible en: <https://www.gbif.org>
- Gradstein, S.R. & Sporn, S.G. (2010). Diversity of epiphytic bryophytes along land use gradients in the tropics. *Nova Hedwigia Beiheft*. **138**: 311-323.
- Gradstein, S.R. & Uribe, J. (2016a). Marchantiophyta. En: Bernal, R., Gradstein, S.R., Celis M. (eds.). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia (pp. 282-352). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gradstein, S.R. & Uribe, J. (2016b). Anthocerophyta. En: Bernal, R., Gradstein, S.R., Celis M. (eds.). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia (pp. 443-445). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gradstein, S.R. & J. Uribe M. (2016c). *Pleurozia paradoxa* (J.B.Jack) Schiffn. En: Bernal, R., Gradstein, S.R., Celis, M. (eds.). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia (p. 346). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Gradstein, S.R. (2020). The Liverworts and Hornworts of Colombia and Ecuador. *Memoirs of the New York Botanical Garden*. **121** (en prensa).
- Griffin D., Gradstein, S.R., Aguirre, J. (1982). Studies on Colombian cryptogams XVII. On a new antipodal element in the neotropical páramos - *Dendrocryphaea latifolia* sp. nov. *Acta Botanica Neerlandica*. **31**: 175-184.
- Guisan A. & Zimmermann N.E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modeling*. **135**: 147-186.
- Guisan, A., Thuiller, W., Zimmermann, N. (2017). *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R (Ecology, Biodiversity and Conservation)*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 111-112.
- Hespanhol, H., Cezón, K., Felicísimo, Á.M., Muñoz, J., Mateo, R.G. (2015). How to describe species richness patterns for bryophyte conservation? *Ecology and Evolution*. **5**: 5443-5455.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces of global land areas. *International Journal of Climatology*. **25**: 1965-1978.
- Jack, J.B. (1886). Monographie der Lebermoosgattung *Physotium*. *Hedwigia*. **25**: 49-87.
- Jiménez-Valverde, A. & Lobo, J.M. (2007). Threshold criteria for conversion of probability of species presence to either or presence-absence. *Acta Oecologica*. **31**: 361-369.
- Kramer-Schadt, S., Niedballa, J., Pilgrim, J.D., Schröder, B., Lindenborn, J., Reinfelder, V., Stillfried, M., Heckmann, I., Scharf, A.K., Augeri, D.M., Cheyne, S.M., Hearn, A.J., Ross, J., Macdonald, D.W., Mathai, J., Eaton, J., Marshall, A.J., Semiadi, G., Rustam, R., Bernard, H., Alfred, R., Samejima, H., Duckworth, J.W., Breitenmoser-Wuersten, C., Belant, J.L., Hofer, H., Wilting, A. (2013). The importance of correcting for sampling bias in MaxEnt species distribution models. *Diversity and Distributions*. **19**: 1366-1379.
- Kruijer, H.J., Raes, N., Stech, M. (2010). Modelling the distribution of the moss species *Hypopterygium tamarisci* (Hypopterygiaceae, Bryophyta) in Central and South America. *Nova Hedwigia*. **91**: 399-420.
- Kumar, S. & Stohlgren, T. (2009). Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree *Canacomyrca monticola* in New Caledonia. *Journal of Ecology and Natural Environment*. **1**: 94-98.
- Lauria, V., Gristina, M., Attrill, M., Fiorentino, F. Garofalo, G. (2015). Predictive habitat suitability models to aid conservation of elasmobranch diversity in the central Mediterranean Sea. *Scientific Reports*. **5** (13245).
- Linares, E.L. & Uribe, J. (2002). Libro rojo de briófitas de Colombia. *Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia*. Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales – Universidad Nacional de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente.
- Martínez-Meyer, E., Peterson, A., Servín, J., & Kiff, L. (2006). Ecological niche modelling and prioritizing areas for species reintroductions. *Oryx*. **40**: 411-418.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.** (2007). Resolución No. 1912 del 15 de septiembre de 2007, Bogotá D.C., Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/75-res%201912%20de%202017.pdf>
- Muscarella, R., Galante, P.J., Soley-Guardia, M., Boria, R.A., Kass, J.M., Uriarte, M., Anderson, R.P.** (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution*. **5**: 1198-1205.
- O'Donnell, M.S. & Ignizio, D.A.** (2012). Bioclimatic predictors for supporting ecological applications in the conterminous United States. *US Geological Survey Data Series*. **691** (10).
- Patiño, J. & Vanderpoorten, A.** (2018). Bryophyte biogeography. *Critical Reviews in Plant Sciences*. **37**: 175-209.
- Pearson, R., Raxworthy, C., Nakamura, M., Peterson, A.** (2007). Predicting species distributions from small numbers of occurrence records: A test case using cryptic geckos in Madagascar. *Journal of Biogeography*. **34**: 102-117.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E.** (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. **190**: 231-259.
- Phillips, S.J., Dudík, M., Schapire, R.E.** (2018). Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Fecha de consulta: 7 de mayo 7, 2018. Disponible en: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/
- Poncet, R., Hugonnot, V., Vergne, T.** (2015). Modelling the distribution of the epiphytic moss *Orthotrichum rogeri* to assess target areas for protected status. *Cryptogamie, Bryologie*. **36**: 3-17.
- QGIS.** (2018). QGIS Sistema de Información Geográfica, Proyecto de Fundación Geoespacial de Código Abierto. Fecha de consulta: 7 de mayo, 2018. Disponible en: <http://qgis.org>
- Quinn, G. & Keough, M.** (2002). *Experimental Design and Data Analysis for Biologists*. New York: Cambridge University Press. p. 127-130.
- R Core Team.** (2019). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Fecha de consulta: agosto de 2019. Disponible en: <https://www.R-project.org/>
- Radosavljevic, A. & Anderson, R.P.** (2014). Making better Maxent models of species distributions: Complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*. **41**: 629-643.
- Rangel, O.J.** (2000). Flora y vegetación amenazada. En Rangel, O.J. (ed.), *Colombia diversidad biótica III: La región de vida paramuna* (pp. 785-713). Bogotá: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Ranjitkar, S., Kindt, R., Sujakhu, N., Hart, R., Guo, W., Yang, X., Shrestha, K., Xu, J., Luedeling, E.** (2014a). Separation of the bioclimatic spaces of Himalayan tree rhododendron species predicted by ensemble suitability models. *Global Ecology and Conservation*. **1**: 2-12.
- Ranjitkar, S., Xu, J., Shrestha, K., Kindt, R.** (2014b). Ensemble forecast of climate suitability for the Trans-Himalayan Nyctaginaceae species. *Ecological Modelling*. **282**: 18-24.
- RUNAP.** (2020). Registro Único de Áreas protegidas. Parques Nacionales Naturales de Colombia. Fecha de consulta: 10 de octubre, 2020. Disponible en: <https://runap.parquesnacionales.gov.co/>
- Saarimaa, M., Aapala, K., Tuominen, S., Karhu, J., Parkkari, M., Tolvanen, A.** (2019). Predicting hotspots for threatened plant species in boreal peatlands. *Biodiversity and Conservation*. **28**: 1173-1204
- Sandanov, D.V. & Pisarenko, O.Y.** (2018). Bioclimatic modeling of *Crossidium squamiferum* (Viv.) Jur. (Pottiaceae, Bryophyta) distribution. *Arctoa*. **27**: 29-33.
- Schiffner, V.** (1893). Hepaticae. En: Engler, A. & Prantl, K. (eds.). *Die Natürlichen Pflanzenfamilien* 1, 3 (p. 97-144). Leipzig: Engelmann.
- Sérgio, C., Figueira, R., Draper, D., Menezes, R., Sousa, A.J.** (2007). Modelling bryophyte distribution based on ecological information for extent of occurrence assessment. *Biological Conservation*. **135**: 341-351.
- Schuster, R.M.** (1961). Studies in Hepaticae. III-VI. *The Bryologist*. **64**: 199-1961.
- SGC.** (2019). Página de Inicio del Servicio Geológico Colombiano. Fecha de consulta: 22 de abril, 2019. Disponible en: <https://www.sgc.gov.co/>
- Su, J., Aryal, A., Nan, Z., Ji, W.** (2015). Climate change-induced range expansion of a subterranean rodent: Implications for rangeland management in Qinghai-Tibetan Plateau. *PLoS One*. **10** (9).
- Thapa, A., Wu, R., Hu, Y., Nie, Y., Singh, P., Khatiwada, J., Yan, L., Gu, X., Wei, F.** (2018). Predicting the potential distribution of the endangered red panda across its entire range using MaxEnt modeling. *Ecology and Evolution*. **8**: 10542-10554.

-
- Thiers, B.** (1993). A monograph of *Pleurozia* (Hepaticae; Pleuroziaceae). *The Bryologist*. **96**: 517-554.
- Tropicos.** (2018). Missouri Botanical Garden, St. Louis, MO, USA. Fecha de consulta: 7 de mayo, 2018. Disponible en <http://www.tropicos.org>
- Vanderpoorten, A. & Goffinet, B.** (2009). *Introduction to Bryophytes*. Cambridge: Cambridge University Press. p. 211-213.
- van Proosdij, A.S., Sosef, M.S., Wieringa, J.J., Raes, N.** (2016). Minimum required number of specimen records to develop accurate species distribution models. *Ecography*. **39**: 542-552
- Warren, D.L. & Seifert, S.N.** (2011). Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecological Applications*. **21**: 335-342.
- Wierzcholska, S., Dyderski, M.K., Jagodziński, A.M.** (2020). Potential distribution of an epiphytic bryophyte depends on climate and forest continuity. *Global and Planetary Change*. **193**: 103270.
- Wisn, M., Tamstorf, M., Madsen, J., Jespersen, M.** (2007). Where might the western Svalbard tundra be vulnerable to Pink-footed Goose (*Anser brachyrhynchus*) population expansion? Clues from species distribution models. *Diversity and Distributions*. **14**: 26-37.
- WorldClim.org.** (2018). Global climate and weather data - WorldClim. Fecha de consulta: 7 de mayo, 2018. Disponible en <https://www.worldclim.org/>

Original article

Regiospecific synthesis and electrochemical study of two water-soluble C₆₀ carboxylic derivatives

Síntesis regioespecífica y estudio electroquímico de dos derivados carboxílicos C₆₀ solubles en agua

Juan D. Villada¹, Álvaro Duarte-Ruiz², Manuel N. Chaur^{1,3,*}

¹ Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

² Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³ Centro de Excelencia en Nuevos Materiales, CENM, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Abstract

We report a new methodology for the synthesis of two highly symmetric equatorial malonate hexaadducts of C₆₀ fullerene. The synthetic methodology is based on a series of protection and deprotection steps that allow the preparation of a fullerene [60] functionalized with six symmetrical positioned malonate addends without using complicated and expensive separation techniques (high-performance liquid chromatography, HPLC) or long reaction times. This methodology allowed us to prepare the carboxylic adducts 6 (equatorial octacarboxylic tetraadduct of C₆₀) and 8 (equatorial dodecarboxylic hexakisadduct of C₆₀). As far as we know, compound 6 has not yet been reported. We also studied the electronic properties of the main compounds by UV-Vis spectroscopy and cyclic voltammetry (CV). The reported fullerene adducts exhibited several reversible reduction processes whose electron transfers are controlled by diffusion.

Keywords: Fullerenes; Symmetric adducts; Bingel reaction; Cyclic voltammetry.

Resumen

En este trabajo reportamos una nueva metodología para la síntesis de hexaaductos ecuatoriales de malonato altamente simétricos de fullereno C₆₀. Esta metodología sintética se basa en una serie de reacciones de protección y desprotección que permiten la obtención de un fullereno [60] funcionalizado con seis grupos malonato simétricamente posicionados. lo que permitió reducir los tiempos de síntesis y evitó el uso de métodos de separación costosos y complejos, como es el caso de la cromatografía líquida de alta eficiencia (*high-performance liquid chromatography*, HPLC). Mediante esta metodología se obtuvieron los aductos carboxílicos de fullereno 6 (tetraducto ecuatorial octacarboxílico de C₆₀), del cual no se encontró reporte en la literatura, y 8 (aducto hexakis ecuatorial dodecarboxílico de C₆₀). Además del trabajo sintético, las propiedades electrónicas de los compuestos principales fueron caracterizadas por UV-Vis y estudios de voltamperometría cíclica. Los aductos de fullereno reportados muestran varios procesos redox reversibles cuyas transferencias electrónicas son controladas por difusión.

Palabras clave: Fullerenos; Aductos simétricos; Reacción de Bingel; Voltamperometría cíclica.

Introduction

Since the discovery of fullerenes in 1985 (Kroto, *et al.*, 1985) and their subsequent mass production by graphite resistive heating (Krätschmer, *et al.*, 1990), these compounds have been tested for several applications. The uses cover a vast range of fields, from nanotechnology (Ya. Vul, 2002) to human health (Castro, *et al.*, 2017; Martínez, *et al.*, 2016; Sandoval, *et al.*, 2019), materials science (Teprovich, *et al.*, 2019), and photovoltaics (Castro, *et al.*, 2018; Collavini & Delgado, 2018), among others. A quick search of the word *fullerene* in the Scopus database resulted in more than 32,000 papers (Elsevier B.V., 2019) with an average of almost 1,000 documents per year since 1985.

Citation: Villada JD, Duarte-Ruiz Á, Chaur MN. Regiospecific synthesis and electrochemical study of two water-soluble C₆₀ carboxylic derivatives. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):272-285, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1187>

Editor: Fernando Martínez

***Corresponding autor:**

Manuel N. Chaur;
manuel.chaur@correounivalle.edu.co

Received: April 2, 2020

Accepted: November 18, 2020

Published: March 29, 2021



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

C₆₀ fullerene has become very popular thanks to its physical properties, among them, the ability to reversibly accept up to six electrons (Ohsawa & Saji, 1992; Xie, *et al.*, 1992), its non-linear optical properties (Ma, *et al.*, 2019; Wang, *et al.*, 2018), and its superconductivity under specific conditions (Buntar & Weber, 1996). To exploit these properties, exohedral functionalization of C₆₀ has become the “*go-to*” method to make the processing of these structures into more complex materials easier, partly because fullerene adducts are more soluble in common organic solvents than their pristine counterparts. Synthetic modifications have also been used to modulate the physical properties of the fullerene framework to insert it in several materials such as polymers (Giacalone & Martín, 2006), metal complexes (Romero, *et al.*, 2017a; Zhou, *et al.*, 2006), coordination polymers (Chen, *et al.*, 2015; Peng, *et al.*, 2013, 2014), metal-organic frameworks (MOFs) (Minar, *et al.*, 2015) and dendrimers (Nierengarten, *et al.*, 2003), just to name a few.

Among the vast number of fullerene derivatives, the search for symmetrical and highly soluble-in-water adducts, as well as polar solvents, have attracted attention given their potential applications (Hirsch, *et al.*, 1994; Lamparth & Hirsch, 1994; Richardson, *et al.*, 2000). In particular, the octahedral addition of malonate addends creates a unique platform with a special arrangement and icosahedral symmetry suitable for the construction of different supramolecular frameworks. To obtain these specific patterns, many protocols have been reported: in 1997 Kräutler proposed a methodology based on the toposelectivity addition of bulky aromatic groups (orthogonal transposition) (Schwenninger, *et al.*, 1997). With this methodology, C₆₀ is protected, functionalized, and deprotected allowing the controlled addition on the equatorial fullerene region. This strategy has allowed the preparation of symmetrical hexakis adducts. Furthermore, variations in the Bingel reaction by Hirsch & Vostrowsky (2001) and Li, *et al.* (2006) have also allowed the one-pot synthesis of hexakis malonate addends.

Fullerenes hexakis adducts are ideal building blocks for the construction of 2D or 3D MOFs (Kraft, *et al.*, 2014, 2017; Kraft & Beuerle, 2016) and the remarkable water solubility of carboxylic derivatives has given way to a handful of applications in medicine (Dugan, *et al.*, 1997). However, reports on the synthesis of these compounds lack a proper characterization of their electronic properties, which seems necessary to construct better and accurate systems. In this sense, here we report the preparation of an equatorial tetrakis dicarboxylic [60] fullerene and hexakis [60] fullerene derivatives, both soluble in water, using the Kräutler methodology. We also conducted a full electrochemical and UV-Vis characterization of these compounds to study the effect of the substituents and the symmetry of the fullerene adducts versus pristine C₆₀.

Experimental section

General methods

Reagents for synthesis were purchased from Sigma Aldrich and were used without additional purification. FT-IR, NMR, and UV-Vis studies were recorded on a Shimadzu FTIR-8400 spectrophotometer, an NMR 400 MHz Bruker UltraShield™, and a Pharma Spec Shimadzu JASCO V-730 UV-VIS spectrophotometer, respectively.

Electrochemical measurements. All electrochemical measurements were recorded in an autolab PGSTAT302N potentiostat. We used a three-electrode system with a glassy carbon electrode (3 mm diameter) as a working electrode, a platinum wire as a counter electrode, and a silver wire as pseudo-reference. The samples were solubilized in tetrahydrofuran (THF) degassed with nitrogen using 0.1M of (n-Bu₄)NPF₆ as supporting electrolyte and ferrocene as an internal standard at the end of the experiments.

Synthesis of the *trans*-1-bis(anthracene) adduct (3)

Compound **3** was obtained using a solid-state reaction methodology (Duarte-Ruiz, *et al.*, 2001) mixing 100 mg (0.138 mmol) of C₆₀ and 49.5 mg (0.278 mmol) of anthracene later sealed under vacuum in an ampoule. The solid was heated at 240 °C in an oven for 1 hour.

After cooling down, the product was treated with diethyl ether and ultrasound and centrifuged to remove the unreacted anthracene. The solid was treated three times with 20 mL of CS₂ and centrifuged to extract the unreacted C₆₀. A light brown fine powder was obtained with a 60 % yield and its characterization matched the reported data (Duarte-Ruiz, *et al.*, 2001).

Synthesis of the [2:4] hexakisadduct (4)

We functionalized 100 mg (0.093 mmol) of compound **3** through the Bingel reaction using diethyl bromomalonate (1.86 mmol) and 1,8-diazabicyclo[5.4.0]undec-7-ene (DBU) (1.86 mmol) in 20 mL CH₂Cl₂ under inert atmosphere. The reaction mixture was stirred for 24 hours, after which the same amounts of DBU and diethyl bromomalonate were added again and stirred for another 24 hours. The product was purified using column chromatography (silica-CH₂Cl₂). Compound **4** was obtained as a yellow solid in 95 % yield and its characterization matched the reported data (Schwenninger, *et al.*, 1997).

Synthesis of the equatorial tetraadduct ester (5)

We obtained compound **5** using the Kraeutler procedure. Briefly, the retro-Diels-Alder reaction was accomplished by introducing compound **4** (100 mg) into a vacuum-sealed vial which was then heated at 195°C for 5 min. Afterward, the product was purified by column chromatography using CH₂Cl₂ as solvent resulting in the olive green tetraadduct **5** with a yield of 88% (69 mg) whose characterization matched the reported data (Cardullo, *et al.*, 1996, 1997; Schwenninger, *et al.*, 1997).

Synthesis of equatorial octacarboxylic tetraadduct (6)

Compound **6** was obtained using the Hirsch methodology (Lamparth, *et al.*, 1995). For the hydrolysis of the ester group, compound **5** (60 mg) was treated with a twentyfold molar excess of NaH in 50 ml toluene for 3 hours at 60° C, the product was precipitated with methanol, washed with 2 M H₂SO₄ water, and then dried under vacuum at 60 °C for 12 hours to obtain the octacarboxylic acid [C₆₀(C(COOH)₂)₄] **6** with a 95% yield.

Synthesis of equatorial dodecarboxylic hexakisadduct (8)

Under similar conditions, we mixed 100 mg (0.074 mmol) of compound **5** with 38 µL (0.22 mmol) of diethyl bromomalonate and 33 µL of DBU in CH₂Cl₂. After 2 hours of reaction at room temperature, the equatorial hexaadduct **7** was purified using column chromatography (CH₂Cl₂) and obtained as a yellow powder with a yield of 90%. The ester was then hydrolyzed with NaH/toluene and methanol to produce compound **8** with a 90% yield using the methodology reported by Hirsch, *et al.* Compounds **7** and **8** were originally reported by Lamparth and Hirsch but the ester **7** was obtained by template activation using 9, 10-dimethylanthracene with a yield of 37% and HPLC. The synthesis was confirmed by comparing it with the literature data (Lamparth, *et al.*, 1995).

Representative spectroscopic data for adducts

5: FT-IR (ATR, cm⁻¹): 2976 (CH-stretch), 1739 (C=O carbonyl stretch), 1459 (C-O carbonyl asymmetric stretch), 1240 (C-C-O stretch), 1022 (O-C-C stretch). UV-Vis: λ_{max} (nm): 289, 325, 350, 450, 540, 645. ¹H-NMR (500.2 MHz, CDCl₃): δ = 1.44 (t, J=7.1, 12 H), 1.46 (t, J= 7.1 Hz, 12 H), 4.5 (q, J=7.1, (H), 4.52 (q, J=7.1, 8H). ¹³C-NMR (125 MHz, CDCl₃): δ = 164.15, 163.86, 145.44, 144.35, 144.24, 142.64, 142.45, 142.20, 140.87, 71.17, 69.98, 63.17, 63.12, 46.83, 44.28, 14.16, 14.14.

6: FT-IR (ATR, cm⁻¹): 2969 (OH stretch), 1729 (C=O carbonyl stretch), 1466(C-O carbonyl asymmetric stretch), 1379 (OH stretch), 1240 (C-O stretch), 1036, 826 (flexion OH) . UV-Vis: λ_{max} (nm): 261, 292, 501. ¹H-NMR (500.2 MHz, d-MeOH): δ = 4.89 (s, 8 H); ¹³C-NMR (150.9 MHz, d-MeOH): δ = 167.27, 166.68, 146.75, 145.74, 145.41, 144.72, 144.30, 144.13, 142.30, 73.41, 72.40.

7: FT-IR (ATR, cm⁻¹): 2962 (CH-stretch), 1715, 1474, 1255, 1029, 817. UV-Vis: λ_{max} (nm): 280, 317, 334, 387, 626. ¹H-NMR (600.2 MHz, CDCl₃): δ = 4.31 (q, J=7.1, 24 H; CH₂), 1.31 (t, J= 7.1 Hz, 36 H; CH₃). ¹³C-NMR (150.9 MHz, CDCl₃): δ = 163.87, 145.85 (24 C), 141.20 (24 C), 69.16 (12 C), 62.89, 45.46, 14.11

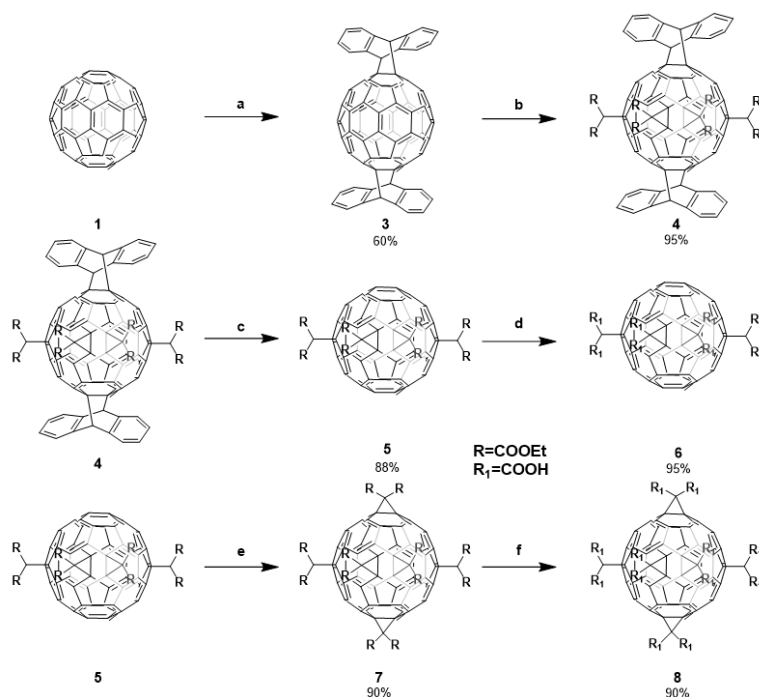
8: FT-IR (ATR, cm⁻¹): 1737, 1409, 1138, 715 UV-Vis: λ_{\max} (nm): 278, 315, 333.
¹³C-NMR (100.13 MHz, D₂O): δ =169.91 (12 C), 141.49 (24 C), 141.25 (24 C), 72.70 (12C), 47.30 (6C).

FT-IR (ATR, cm⁻¹): 2971 (OH-stretch), 1730 (C=O carbonyl stretch), 1460 (C-O carbonyl asymmetric stretch), 1372 (stretching OH), 1243 (stretching C-O), 1036, 826 (flexion OH).

Results and discussion

The synthesis of the [60] fullerene derivatives was achieved following a protocol of protection-deprotection previously reported (Duarte-Ruiz, *et al.*, 2009; Duarte-Ruiz, *et al.*, 2001; Kräutler, *et al.*, 2001; Ortiz, *et al.*, 2009). The protocol can be divided into four steps: The first consisted of a Diels Alder coupling reaction between C₆₀ fullerene and anthracene that was done in the solid-state at 240°C (Duarte-Ruiz, *et al.*, 2008). Product **3** is formed by the regiospecific addition of two anthracene moieties in a *trans*-1 position. Thereafter, compound **3** was functionalized by cyclopropanation (Bingel reaction) with diethyl bromomalonate in CH₂Cl₂ (Schwenninger, *et al.*, 1997). This reaction resulted in the highly regiospecific addition of four malonate groups in the equatorial positions of the fullerene (Scheme) to yield compound **4** in a 95% yield. The characterization matched the reported data (Schwenninger, *et al.*, 1997).

The anthracene addition to the fullerene cage was thermolabile and could be detached from the fullerene adduct **4** with a retro Diels-Alder reaction to obtain the green-brownish compound **5**. The tetrakisadduct **5** was hydrolyzed using NaH/methanol base as reported by Hirsch to produce compound **6** (Lamparth, *et al.*, 1995). Dodecacarboxylic hexakisadduct **8** was prepared by a Bingel reaction of compound **5** using the same conditions used above. The result was the addition of two malonate esters at the *trans*-1 position that were later hydrolyzed using NaH/methanol to obtain compound **8** (Scheme). The synthesis was confirmed by comparing it with the literature data (Lamparth, *et al.*, 1995).



Scheme. Synthesis of tetrahexakis Bingel adducts using a protection-deprotection protocol. **a.** Anthracene/240° C²³ **b.** Diethylbromomalonate/DBU, CH₂Cl₂, 2 days.¹⁷ **c.** 195° C/5 min²³ **d.** NaH/Toluene-Methanol. **e.** Diethylbromomalonate/DBU, CH₂Cl₂, 2 hours. **f.** NaH/Toluene-Methanol.

Compound **7** has already been reported by Hirsch and coworkers via the successive addition of malonate addends (Hirsch, Lamparth, & Karfunkel, 1994; Hirsch, *et al.*, 1994). However, the reported yields were in the range of 0.2 to 0.5 %, and the reaction times went as far as seven or more days. Furthermore, the reported process included the separation by HPLC, which is expensive and time-consuming. Later on, Hirsch, *et al.*, reported a one-pot synthesis to obtain compound **7** using 9,10 DMA and a reversible template-directed activation with a 37 % yield (Lamparth, *et al.*, 1995). Remarkably, our methodology allowed us to obtain compound **7** with an 86% yield starting from compound **5** as a unique product thus increasing the efficiency of the process and a yield of 38% considering the global synthesis. The preparation of these carboxylic fullerenes in high yields opens the way for their use in the construction of highly symmetric structures (MOFs and supramolecular and other structures related) and on different biological applications thanks to their increased solubility in aqueous media (Ugan, *et al.*, 1997).

Figure 1 shows the IR spectra for compounds **5** to **8**, i.e., the equatorial tetraadduct, the hexadduct with malonyl groups, the equatorial tetraadduct, and the hexadduct with carboxyl groups. Observe the change given the hydrolysis suffered by the ester group and the subsequent appearance of a broad and pronounced band of around 2969 cm^{-1} due to the -OH stretching, and of 1466 cm^{-1} due to the C = O stretching. In the case of the esters, the three characteristic peaks of these functional groups of 1700 , 1200 , and 1100 cm^{-1} approximately are observed. The three vibrations involved are the C = O, the C-C-O, and the O-C-C stretching.

The thermogravimetric analysis of compounds **5** to **8** can be observed in figure 2. In general, the adducts with the ester groups (compounds **5** and **7**) exhibited thermal stability up to around $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ while we observed that the adducts with carboxylic groups

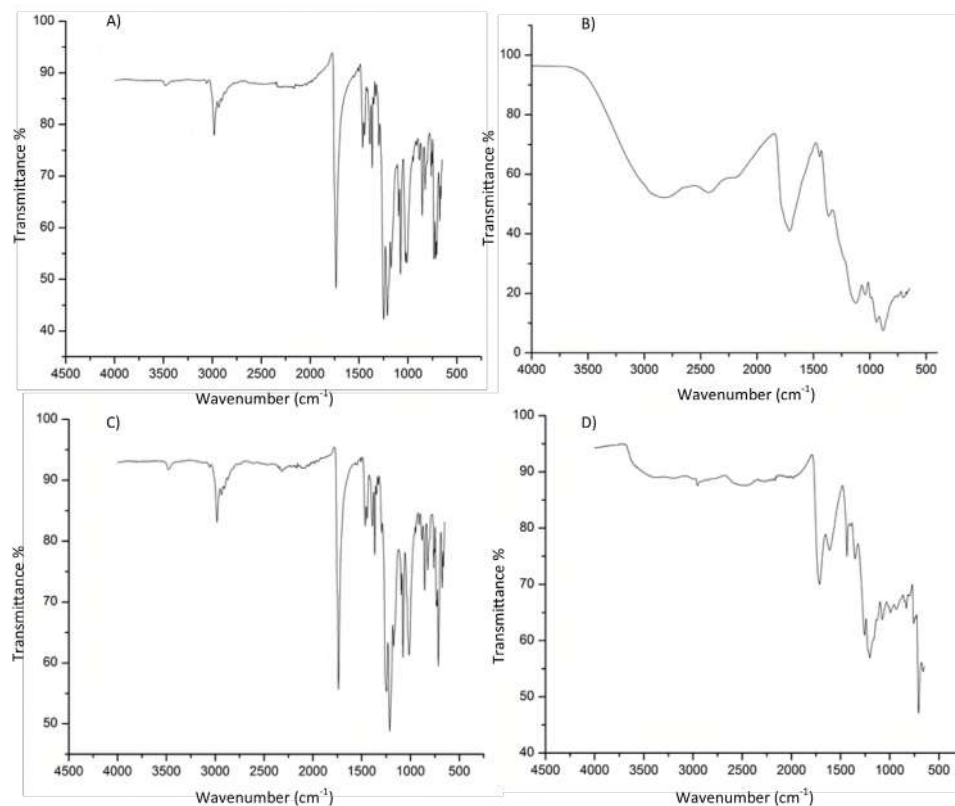


Figure 1. FT-IR spectra of compounds **5** (A), **6** (B), **7** (C), and compound **8** (D).

(compounds **6** and **8**) had a loss of weight starting at around 100 °C probably due to the presence of water molecules associated with the carboxylic groups of the tetraadduct with 8 carboxylic groups and of the hexadduct with 12 carboxylic groups.

Given that compound **6** is reported here for the first time, **figure 3** shows the ¹³C-NMR spectrum in methanol for the equatorial tetraadduct with the carboxylic groups (compound **6**). At around 166 ppm, signals due to the carbons of the carbonyl group are observed; at around 144 ppm, those due to the cage of fullerene, and near 72 ppm, those due to the carbons of fullerene that make up the cyclopropane rings.

Electronic characterization

The spherical π system present in the fullerene cages makes UV-Vis spectroscopy a versatile tool for characterization. It has been reported that changes in the UV-Vis spectrum of different fullerene derivatives depend on the number of substituents present in the cage, the type of addition, and the geometry of the adduct (Djojo, *et al.*, 1996; Kop, *et al.*, 2015; Lu, *et al.*, 1996). Moreover, some specific absorption can be used as a fingerprint for the identification of specific substitutions in the fullerene, although the nature of the specific transitions is still unknown.

Adduct **3** exhibited two anthracene moieties, the D_{2h} -symmetric bisadduct presented a fingerprint weak maximum at 465 nm (Figure 4), and broader bands in the visible region at 500 nm as previously reported by Duarte-Ruiz, *et al.* (2001) and Kräutler, *et al.* (2001). The change in the UV-Vis spectra compared to pristine C₆₀ responds to the combination of two phenomena: first, the loss of the double bond conjugation that leads to isolated benzenoid rings, and second, the change of the symmetry group.

Adducts 4, 5, 7, and 8 (Figure 5, Table 1) presented an absorption band in the UV region at the range between 270 and 293 nm related to π - π^* transitions whose different wavelength changes depend on structural features like the number of addends or even the type of substituent. For example, compound **4** exhibited a maximum band at 293 nm

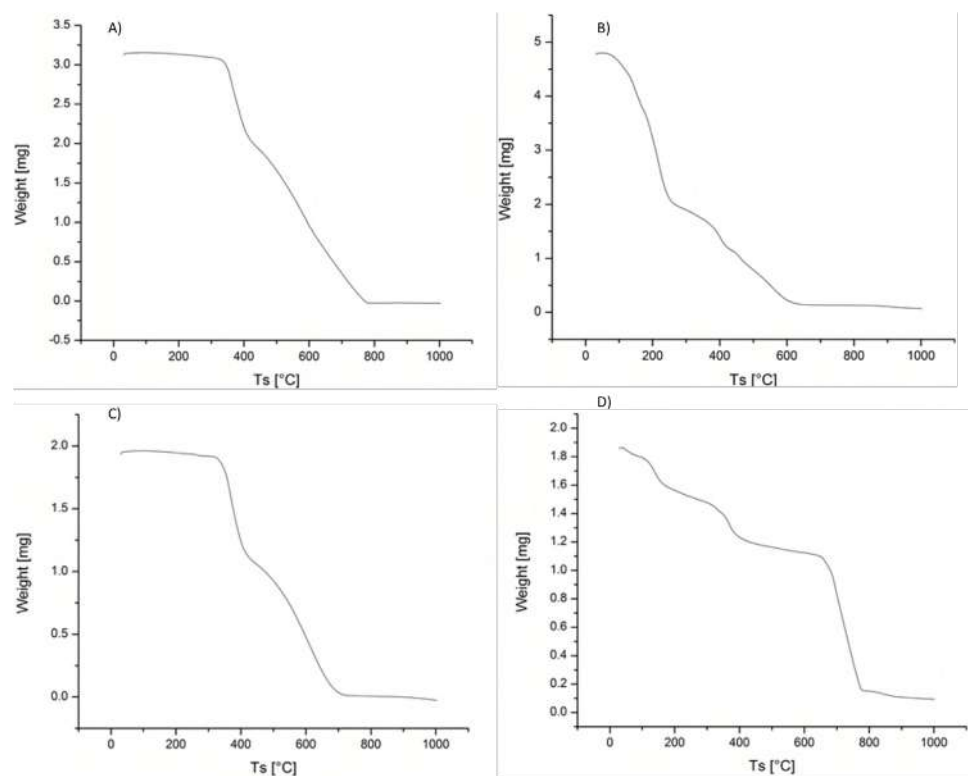


Figure 2. Thermogravimetric analysis of compounds 5 (A), 6 (B), 7 (C), and 8 (D)

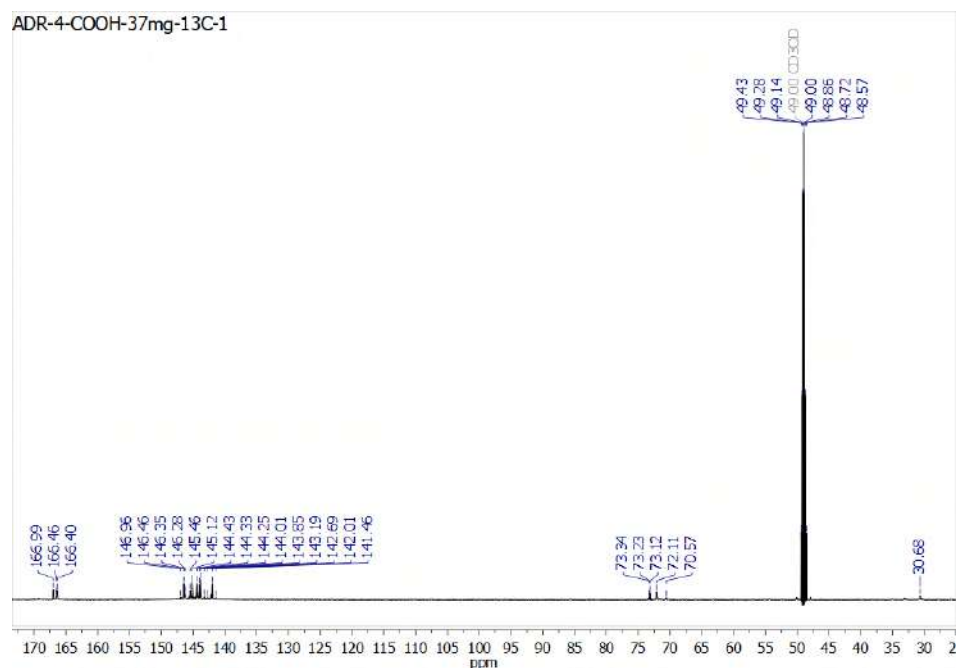


Figure 3. ^{13}C -NMR (d_5 -methanol-150 MHz) spectrum of compound **6**

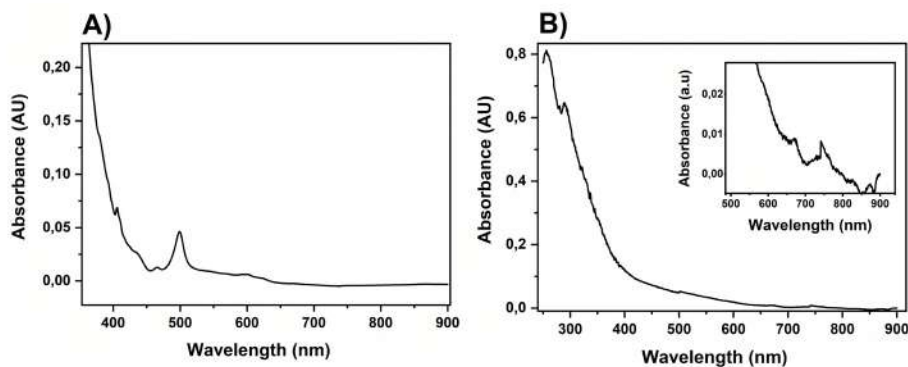


Figure 4. UV-Vis spectrum of compound **3** (A) in CS_2 and compound **6** in MeOH (B)

that hypsochromically shifted with the cleavage of the anthracene moiety (**5**-287 nm, **7**-281 nm, **8**-278 nm). A hypothesis on the loss of the anthracene π -system to explain this phenomenon is possible, but more experiments are needed.

The fingerprint region, which consists of the late UV and the visible region, can be used as stated above to identify different substitution patterns on a fullerene. Tetrakis adduct **5** exhibited a broad band going from 440 nm to 550 nm, which may be explained by the specific functionalization resulting in two benzenoid rings with localized electronic sextets (Cardullo, *et al.*, 1997). Hexakis adducts **4**, **7**, and **8** displayed a lighter yellow color in solution while their UV-Vis spectrum in CH_2Cl_2 showed little absorption at the visible region and ended at 450 nm. The octahedral addition to the fullerene cage generated four isolated benzenoid rings in a cyclophane structure resulting in a large decrease in the chromophore π system conjugation.

Table 1 shows the effects previously explained. The optical band gap is a hint of the HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital)-LUMO (Lowest Occupied Molecular Orbital) band gap. From these data, it is clear that the loss of sp^2 carbons was the largest

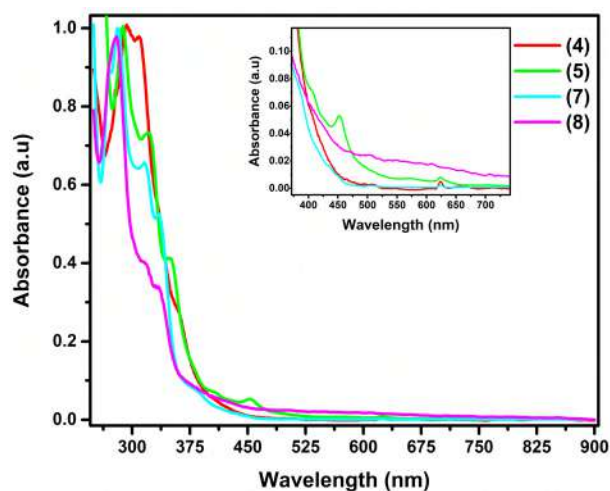


Figure 5. UV-Vis spectrum of compounds **4**, **5**, **7** and **8** in CH_2Cl_2

Table 1. UV-Vis data collected from the UV-Vis spectra of the different prepared fullerene adducts

Compound	Absorbance bands (nm)	Fingerprint of absorbance bands (nm)	ϵ ($\text{cm}^{-1} \text{M}^{-1}$) *	ΔE (eV)***
3	407,	465, 500**,		1.99
4	291, 310**, 355,	625	20150.38	2.88
5	289**, 322, 348, 454,	623	20071.70	2.35
6	258, 289**	623	20259.51	2.62
7	279**, 319, 338, 383,	480	19978.45	2.91
8	283**, 312, 335	480	19558.05	2.92

* Calculated from the highest absorbance band; ** Band with the highest absorbance; *** Calculated as first oxidation potential-first reduction potential

phenomenon affecting the absorption of the fullerene compounds and that there was not much difference between the esters and the carboxylic acids in terms of the bandgap. Finally, it is apparent that the addition of anthracene moieties increased the energy between the HOMO and the LUMO, although the increase was less than in fullerenes bearing just malonate substituents. These phenomena could be attributed to the benzenoid rings resulting from the Diels Alder addition, as it could help to stabilize the excited state.

Electrochemical characterization

Cyclic voltammetry experiments were conducted in THF with NBu_4PF_6 as supporting electrolyte using a 3 mm diameter glassy carbon disk as the working electrode, a silver wire as the pseudo-reference electrode, and a platinum wire as the counter electrode. At the end of each measurement, a small amount of ferrocene was added as an internal standard to report the potentials.

Considering the electronic effects shown in the absorption spectra, we expected that the number of substituents and the geometry of the fullerene adduct would affect the electrochemical properties of the C_{60} cage (Boudon, *et al.*, 1995). To analyze such effects, we recorded the cyclic voltammetry of the different derivatives in THF (Figure 6 and table 2). In this sense, it is important to emphasize that there are few reports of electrochemical studies of fullerene addends in polar solvents (Paolucci, *et al.*, 1999; Romero, *et al.*, 2017b) and that the addition of the different malonates to the fullerene cage structure is a good methodology to increase the solubility of these compounds.

Fullerene has been considered for several electronic applications thanks to its remarkable ability to accept electrons. Different studies have shown that pristine fullerene can reversibly accept from three up to six electrons under certain experimental conditions, for instance, low temperatures (Xie, *et al.*, 1992). **Figure 6** shows the effect of the malonate addition on the electron affinity of the prepared compounds. Hexakis compound **4** showed two reversible reduction peaks at -1.43 V and -1.85 V, which were cathodically shifted when compared with the first two reductions of pristine C₆₀. This decrease of the electron affinity of the fullerene cage was attributed to the loss of the conjugated π -system, which is necessary for stabilizing reduced species.

The reversibility of the reduction processes for compound **4** was also affected. As mentioned before, pristine fullerene reductions are reversible, however, the reduction peaks in **4** exhibited a peak current ratio different from one (higher cathodic current than the anodic current), and the peaks were separated from each other when the voltammograms were recorded at higher scan rates. The modification of the conjugated π -system affects not only the electron affinity of the cage but also the reversibility of these reduction processes, probably because, after reduction, a chemical process that affects the reverse current intensity occurs.

The number of additions to the fullerene cage had a direct effect on the electron affinity. Compared to compound **4**, the tetrakis adducts **5** and **6** exhibited larger electron affinities, and their peak current ratios were closer to one. It has been proved that the addition of substituents to the fullerene cage increases the LUMO energy (Zhang, *et al.*, 2006), an effect that is closely related to the extra energy necessary to transfer an electron from the working electrode to the fullerene compound.

The difference in the reduction potentials could be the result of the nature of the substituents. In the case of the hexakis compounds **4** and **8**, the latter exhibited cathodically-shifted reduction potentials. It is possible that the presence of the benzenoid rings in **4** (anthracene addition) helped to stabilize the negative charge in the fullerene cage. Furthermore, carboxylic acids, present in **8**, are far more reactive and tend to form dimers based on hydrogen bonds, which could explain why these compounds presented more reduction processes than their former esters in solution and why they exhibited two non-reversible processes.

Oxidation events are also related to the fullerene cage. It has been proposed that the electrons transferred from the fullerene cage to the electrode are part of the benzenoid rings generated with the addition of substituents to the fullerene (Cardullo, *et al.*, 1997;

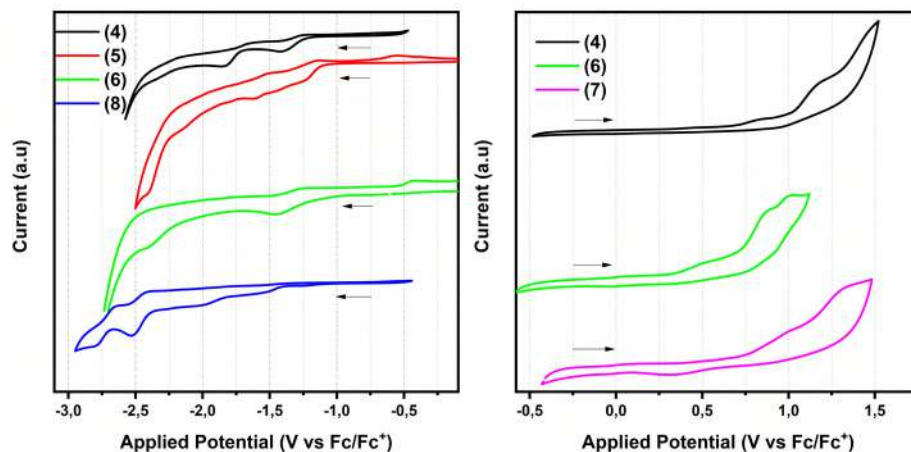


Figure 6. Cyclic voltammograms of adducts **4**, **5**, **6**, **7**, **8** in THF. Supporting electrolyte: 0.1M (n-Bu₄N)PF₆ (arrows indicate the direction and the start point of the sweep). The graph on the left shows the reduction events of compounds **4**, **5**, **6**, and **8**. On the right, the oxidation processes of compounds **4**, **6**, and **7** are plotted.

Francesca Cardullo et al., 1996), a behavior that explains the little or non-difference in the oxidation potentials of the prepared compounds. These results (**Table 2**) are also consistent with those reported by **Boudon, et al** (1995) regarding the presence of an oxidation peak between 0.80 to 0.99 V in adducts with 1 to 6 addends.

For a better understanding of the electrochemical behavior of these compounds, cyclic voltammetry was recorded at different scan rates and, then, using the Randles-Sevcik equation (Equation 1), we graphed the relation between the peak current and the square root of the scan rate. From the results shown in **figure 7**, it is clear that the relation between the sweeping rate and the current was linear (**Table 3**), which means that the current was limited by the diffusion of species from the solution to the electrode and their speed towards the electrode (diffusion coefficient). The Nernst equation demonstrates that the increase in potential will also increase the movement of the species and the diffusion to the electrode thus increasing the current, which means that these electrochemical events are diffusion-controlled.

Equation 1. Randles-Sevcik equation

$$i_p = 0,4463nFAC \left(\frac{nFvD}{RT} \right)^{1/2}$$

Table 2. Peak potentials for the cathodic and anodic events

Compound	E _{p, Red (1)}	E _{p, Red (2)}	E _{p, Red (3)}	E _{p, Red (4)}	E _{p, Ox (1)}	E _{p, Ox (2)}	E _{p, Ox 3}
4	-1.43	-1.85	-	-	0.84	1.14	1.33
5	-1.18*	-1.55*	-2.15	-2.40	-	-	-
6	-1.34*	-2.39	-	-	0.84	1.00	-
7	-	-	-	-	0.97	1.26	-
8	-1.59	-1.98	-0.46*	-0.71*	-	-	-

Reversible events are shown as E_{1/2}

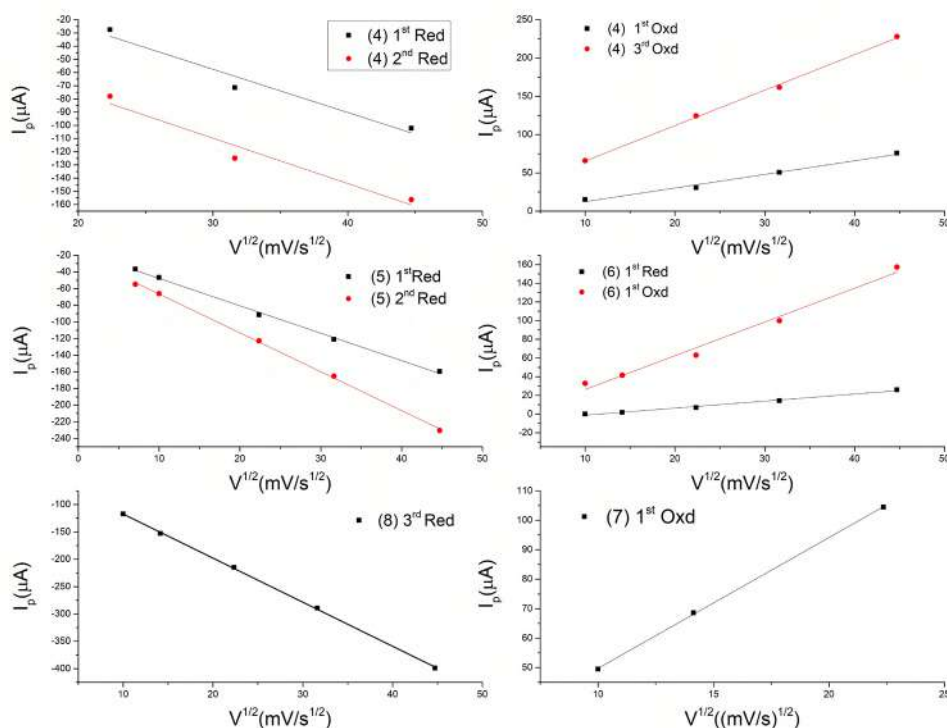


Figure 7. Randles-Sevcik linearization of the redox events of compounds 4-8

Table 3. Results from the linearization of graphics I_p Vs $(V)^{1/2}$ ($T=25^\circ$ C)

	Fullerene adducts									
	4		5		6		7		8	
Redox event	1 st Red	2 nd Red	1 st Oxd	3 rd Oxd	1 st Red	2 nd Red	1 st Red	1 st Oxd	1 st Oxd	3 rd Red
Intercept	40.59 ± 22.63	-6.91 ± 25.11	-5.47 ± 4.08	19.18 ± 3.82	-4.89 ± 2.42	-19.88 ± 1.97	-8.83 ± 1.16	-9.86 ± 7.15	5.33 ± 1.08	-36.78 ± 2.36
Slope	-3.27 ± 0.66	-3.42 ± 0.73	1.77 ± 0.13	4.62 ± 0.12	-3.29 ± 0.08	-4.66 ± 0.07	0.75 ± 0.04	3.61 ± 0.25	4.44 ± 0.06	-8.05 ± 0.08

Conclusions

Anthracene can be used as a template to control the stereospecific addition of malonates in the equatorial region of the fullerene cage. Furthermore, the methodology we describe is an easy and controlled method for the synthesis of the highly symmetric and water-soluble carboxylic fullerene adducts (**6** and **8**) without using expensive and complicated techniques such as the HPLC. Cyclic voltammograms of the different adducts showed that the first reduction potential cathodically shifted with the increase of the number of addends attached to the fullerene cage in agreement with several reports of different fullerene compounds in the literature. Besides, the effect of addends was also related to the chemical nature of the substituents present in the fullerene. As we have shown here, there is a marked difference between the cyclic voltammograms of hexakis compounds **4**, **7**, and **8**.

Acknowledgments

We manifest our profound gratitude for the economic support from the *Vicerrectoría de Investigaciones* and the *Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM)* at *Universidad del Valle*. M.N.C. is deeply grateful to *Universidad del Valle* for his sabbatical leave.

Funding

The funds for this research were provided by *Universidad del Valle* (C.I. 71155) and *Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias* (grant No. 45627 to A. Duarte-Ruiz), as well as by the *Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación-COLCIENCIAS* (grant No. 110171249591 to A. Duarte-Ruiz).

Author contributions

Conceptualization, ADR and MNC; methodology, JDV and ADR; writing and original draft preparation, JDV; writing review and editing, JDV, ADR, and MNC; funding acquisition, MNC and ADR. All authors read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Boudon, C., Gisselbrecht, J.-P., Gross, M., Isaacs, L., Anderson, H. L., Faust, R., & Diederich, F. (1995). Electrochemistry of Mono- through Hexakis-adducts of C₆₀. *Helvetica Chimica Acta*. **78** (5): 1334-1344. Doi: 10.1002/hlca.19950780523
- Buntar, V. & Weber, H. W. (1996). Magnetic properties of fullerene superconductors. *Superconductor Science and Technology*. **9** (8): 599-615. Doi: 10.1088/0953-2048/9/8/001
- Cardullo, F, Seiler, P., Isaacs, L., Nierengarten, J. F., Haldimann, R. F., Diederich, F., MordasiniDenti, T., Thiel, W., Boudon, C., Gisselbrecht, J. P., Gross, M. (1997). Bis-through tetrakis-adducts of C-60 by reversible tether-directed remote functionalization and systematic investigation of the changes in fullerene properties as a function of degree, pattern, and nature of functionalization. *Helvetica Chimica Acta*. **80** (2): 343-371. Doi: 10.1002/hlca.19970800203

- Cardullo, Francesca, Isaacs, L., Diederich, F., Gisselbrecht, J.-P., Boudon, C., Gross, M.** (1996). Regiospecific templated synthesis of D 2h-symmetrical tetrakis-adduct C64(COOEt)8 by reversible tether-directed remote functionalization of C60. *Chemical Communications*. **12** (6): 797. Doi: 10.1039/cc9960000797
- Castro, E., García, A. H., Zavala, G., Echegoyen, L.** (2017). Fullerenes in biology and medicine. *Journal of Materials Chemistry B*. **5** (32): 6523-6535. Doi: 10.1039/c7tb00855d
- Castro, E., Murillo, J., Fernandez-Delgado, O., Echegoyen, L.** (2018). Progress in fullerene-based hybrid perovskite solar cells. *Journal of Materials Chemistry C*. **6** (11): 2635-2651. Doi: 10.1039/c7tc04302c
- Chen, C.-H., Aghabali, A., Metta-Magana, A. J., Olmstead, M. M., Balch, A. L., Echegoyen, L.** (2015). Synthesis and characterization of a trans-1 hexakis-fullerene linker that forms crystalline polymers with silver salts. *Dalton Transactions*. **44** (42): 18487-18491. Doi: 10.1039/C5DT03054D
- Collavini, S. & Delgado, J. L.** (2018). Fullerenes: The stars of photovoltaics. *Sustainable Energy and Fuels*. **2** (11): 2480-2493. Doi: 10.1039/c8se00254a
- Djojo, F., Herzog, A., Lamparth, I., Hampel, F., Hirsch, A.** (1996). Regiochemistry of twofold additions to [6,6] bonds in C60: Influence of the addend-independent cage distortion in 1,2-monoadducts. *Chemistry- A European Journal*. **2** (12): 1537-1547. Doi: 10.1002/chem.19960021211
- Duarte-Ruiz, Á., Echegoyen, L., Aya, A., Gómez-Baquero, F.** (2009). A New Method to prepare an e , e , e Trisadduct of C 60 Using a Protection- Deprotection Sequence. *J. Mex. Chem. Soc.* **53** (3): 169-173.
- Duarte-Ruiz, A., Wurst, K., Kräutler, B.** (2001). Regioselective “one-pot” synthesis of antipodal bis-adducts by heating of solid [5,6]fullerene-C60-Ih and anthracenes. *Helvetica Chimica Acta*. **84** (8): 2167-2177. Doi: 10.1002/1522-2675(20010815)84:8<2167::AID-HLCA2167>3.0.CO;2-V
- Duarte-Ruiz, A., Wurst, K., Kräutler, B.** (2008). The Orthogonal (e, e, e)-Tris-Adduct of 9,10-Dimethylanthracene with C 60 -Fullerene: A Hidden Cornerstone of Fullerene Chemistry. Preliminary Communication. *Helvetica Chimica Acta*. **91** (8): 1401-1408. Doi: 10.1002/hlca.200890152
- Dugan, L. L., Turetsky, D. M., Du, C., Lobner, D., Wheeler, M., Almlı, C. R., Shen, C. K.-F., Luh, T.-Y., Choi, D. W., Lin, T.-S.** (1997). Carboxyfullerenes as neuroprotective agents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **94** (17): 9434-9439. Doi: 10.1073/pnas.94.17.9434
- Elsevier B.V.** (2019). Scopus - Analyze search results key word: fullerene. Analyze Search Results. Key Word: Fullerene. <https://usc.elogim.com:2092/term/analyzer.uri?sid=f85731bec23ed1fe941672a4746a9b3b&origin=resultslist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28fullerene%29&sort=plf-f&sdt=b&sot=b&sl=24&count=40245&analyzeResults=Analyze+results&txGid=77bc34c7a17bf5c7e8abdedbc0902929> Accessed: 2019-03-25
- Giacalone, F. & Martín, N.** (2006). Fullerene polymers: Synthesis and properties. In *Chemical Reviews*, American Chemical Society. **106** (12): 5136-5190. Doi: 10.1021/cr068389h
- Hirsch, A., Lamparth, I., Grösser, T., Karfunkel, H. R.** (1994). Regiochemistry of Multiple Additions to the Fullerene Core: Synthesis of a Tb-Symmetric Hexakisadduct of C60with Bis(ethoxycarbonyl)methylene. *Journal of the American Chemical Society*. **116** (20): 9385-9386. Doi: 10.1021/ja00099a088
- Hirsch, A., Lamparth, I., Karfunkel, H. R.** (1994). Fullerene Chemistry in Three Dimensions: Isolation of Seven Regioisomeric Bisadducts and Chiral Trisadducts of C60 and Di(ethoxycarbonyl)methylene. *Angewandte Chemie International Edition in English*. **33** (4): 437-438. Doi: 10.1002/anie.199404371
- Hirsch, A. & Vostrowsky, O.** (2001). C60 Hexakisadducts with an Octahedral Addition Pattern – A New Structure Motif in Organic Chemistry. *European Journal of Organic Chemistry*. **2001** (5): 829-848. Doi: 10.1002/1099-0690(200103)2001:5<829::AID-EJOC829>3.0.CO;2-V
- Kop, T., Bjelaković, M., Milić, D.** (2015). Synthesis and properties of bis(pyrrolidino)fullerenes bridged by a flexible alkyl-tether. *Tetrahedron*. **71** (29): 4801-4809. Doi: 10.1016/j.tet.2015.05.038
- Kraft, A. & Beuerle, F.** (2016). Metal-organic hybrid architectures built from functionalized fullerenes and metal ions or clusters. *Tetrahedron Letters*. **57** (42): 4651-4663. Doi: 10.1016/J.TETLET.2016.08.082
- Kraft, A., Gsänger, M., Beuerle, F.** (2014). Arranging Fullerenes through Hydrogen Bonding. *European Journal of Organic Chemistry*. **2014** (3): 523-528. Doi: 10.1002/ejoc.201301298

- Kraft, A., Stangl, J., Krause, A., Müller-buschbaum, K., Beuerle, F.** (2017). Supramolecular frameworks based on [60] fullerene hexakisadducts. *Beilstein J. Org. Chem.* **13** (1): 1-9. Doi: 10.3762/bjoc.13.1
- Krätschmer, W., Lamb, L. D., Fostiropoulos, K., Huffman, D. R.** (1990). Solid C60: a new form of carbon. *Nature.* **347** (6291): 354-358. Doi: 10.1038/347354a0
- Kräutler, B., Müller, T., Duarte-Ruiz, A.** (2001). Efficient preparation of monoadducts of [60] fullerene and anthracenes by solution chemistry and their thermolytic decomposition in the solid state. *Chemistry - A European Journal.* **7** (15): 3223-3235. Doi: 10.1002/1521-3765(20010803)7:15<3223::AID-CHEM3223>3.0.CO;2-B
- Kroto, H. W., Heath, J. R., O'Brien, S. C., Curl, R. F., Smalley, R. E.** (1985). C60: Buckminsterfullerene. *Nature.* **318** (6042): 162-163. Doi: 10.1038/318162a0
- Lamparth, I. & Hirsch, A.** (1994). Water-soluble Malonic Acid Derivatives of. *J. Chem. Soc., Chem. Commun.* **7**: 1727-1728.
- Lamparth, I., Maichle-Mössmer, C., Hirsch, A.** (1995). Reversible Template-Directed Activation of Equatorial Double Bonds of the Fullerene Framework: Regioselective Direct Synthesis, Crystal Structure, and Aromatic Properties of Th-C66(COOEt)12. *Angewandte Chemie International Edition in English.* **34** (15): 1607-1609. Doi: 10.1002/anie.199516071
- Li, H., Haque, S. A., Kitaygorodskiy, A., Meziani, M. J., Torres-Castillo, M., Sun, Y.-P.** (2006). Alternatively Modified Bingel Reaction for Efficient Syntheses of C 60 Hexakis- Adducts. *Organic Letters.* **8** (24): 5641-5643. Doi: 10.1021/ol062391d
- Lu, Q., Schuster, D. I., Wilson, S. R.** (1996). Preparation and Characterization of Six Bis(N -methylpyrrolidine)-C 60 Isomers: Magnetic Deshielding in Isomeric Bisadducts of C 60. *The Journal of Organic Chemistry.* **61** (14): 4764-4768. Doi: 10.1021/jo960466t
- Ma, N., Lv, M., Liu, T., Song, M., Liu, Y., Zhang, G.** (2019). Second-order nonlinear optical properties of [60]fullerene-fused dihydrocarboline derivatives: A theoretical study on switch effect. *Journal of Materials Chemistry C.* **7** (42): 13052-13058. Doi: 10.1039/c9tc04126e
- Martínez, Z. S., Castro, E., Seong, C.-S., Cerón, M. R., Echegoyen, L., Llano, M.** (2016). Fullerene Derivatives Strongly Inhibit HIV-1 Replication by Affecting Virus Maturation without Impairing Protease Activity. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy.* **60** (10): 5731-5741. Doi: 10.1128/AAC.00341-16
- Minar, N. K., Hou, K., Westermeier, C., Döblinger, M., Schuster, J., Hanusch, F. C., Nickel, B., Ozin, G. A., Bein, T.** (2015). A Highly-Ordered 3D Covalent Fullerene Framework. *Angewandte Chemie.* **127** (26): 7687-7691. Doi: 10.1002/ange.201411344
- Nierengarten, J. F., Armaroli, N., Accorsi, G., Rio, Y., Eckert, J. F.** (2003). [60] Fullerene: A versatile photoactive core for dendrimer chemistry. *Chemistry - A European Journal.* **9** (1): 36-41. Doi: 10.1002/chem.200390001
- Ohsawa, Y. & Saji, T.** (1992). Electrochemical detection of C60⁻⁶- at low temperature. *Journal of the Chemical Society, Chemical Communications.* **0** (10): 781. Doi: 10.1039/c39920000781
- Ortiz, A. L., Rivera, D. M., Athans, A. J., Echegoyen, L.** (2009). Regioselective addition of N-(4-Thiocyanatophenyl)pyrrolidine addends to fullerenes. *European Journal of Organic Chemistry.* **20**: 3396-3403. Doi: 10.1002/ejoc.200900228
- Paolucci, F., Carano, M., Ceroni, P., Mottier, L., Sergio, R.** (1999). Electrochemical Detection of C[sub 60] in Solution: Is Tetrahydrofuran a Suitable Solvent for Fullerene Studies? *Journal of The Electrochemical Society.* **146** (9): 3357-3360. Doi: 10.1149/1.1392477
- Peng, P., Li, F.-F., Neti, V. S. P. K., Metta-Magana, A. J., Echegoyen, L.** (2014). Design, Synthesis, and X-Ray Crystal Structure of a Fullerene-Linked Metal-Organic Framework. *Angewandte Chemie International Edition.* **53** (1): 160-163. Doi: 10.1002/anie.201306761
- Peng, P., Li, F. F., Bowles, F. L., Neti, V. S. P. K., J. Metta-Magana, A., Olmstead, M. M., Balch, A. L., Echegoyen, L.** (2013). High yield synthesis of a new fullerene linker and its use in the formation of a linear coordination polymer by silver complexation. *Chemical Communications.* **49** (31): 3209-3211. Doi: 10.1039/c3cc40697k
- Richardson, C. F., Schuster, D. I., Wilson, S. R.** (2000). Synthesis and characterization of water-soluble amino fullerene derivatives. *Organic Letters.* **2** (8): 1011-1014. Doi: 10.1021/ol990312a
- Romero, E. L., Cabrera-Espinoza, A., Ortiz-Peña, N., Soto-Monsalve, M., Zuluaga, F., D'Vries, R. F., Chaur, M. N.** (2017a). New pyrazolino and pyrrolidino[60]fullerenes: the introduction of the hydrazone moiety for the formation of metal complexes. *Journal of Physical Organic Chemistry.* **30** (2): e3601. Doi: 10.1002/poc.3601

- Romero, E. L., Cabrera-Espinoza, A., Ortiz-Peña, N., Soto-Monsalve, M., Zuluaga, F., D'Vries, R. F., Chaur, M. N.** (2017b). New pyrazolino and pyrrolidino[60]fullerenes: the introduction of the hydrazone moiety for the formation of metal complexes. *Journal of Physical Organic Chemistry*. **30** (2): 3601-3608. Doi: 10.1002/poc.3601
- Sandoval, J., Ventura-Sobrevilla, J., Boone-Villa, D., Ramos-González, R., Velázquez, M., Silva-Belmares, Y., Cobos-Puc, L., Aguilar, C.** (2019). Carbon nanomaterials as pharmaceutical forms for sustained and controlled delivery systems. In *Nanomaterials for Drug Delivery and Therapy*. Chapter 14. Editor: Alexandru Mihai Grumezescu. William Andrew Publishing, p. 403-434. ISBN 9780128165058. Doi: 10.1016/b978-0-12-816505-8.00003-5
- Schwenninger, R., Muller, T., Krautler, B.** (1997). Concise route to symmetric multiadducts of [60]fullerene: Preparation of an equatorial tetraadduct by orthogonal transposition. *Journal of the American Chemical Society*. **119** (39): 9317-9318. Doi: 10.1021/ja971875p
- Teprovich, J. A., Weeks, J. A., Ward, P. A., Tinkey, S. C., Huang, C., Zhou, J., Zidan, R., Jena, P.** (2019). Hydrogenated C60 as High-Capacity Stable Anode Materials for Li Ion Batteries [Research-article]. *ACS Applied Energy Materials*. **2** (9): 6453-6460. Doi: 10.1021/acsaem.9b01040
- Ugan, L. A. L. D., Uretsky, D. O. M. T., Heng, C. D. U., Obner, D. O. U. G. L., Heeler, M. A. R. K. W.** (1997). Carboxyfullerenes as neuroprotective agents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **94** (August): 9434-9439. Doi: 10.1073/pnas.94.17.9434
- Wang, L., Ye, J.-T., Wang, H.-Q., Xie, H.-M., Qiu, Y.-Q.** (2018). Third-Order Nonlinear Optical Properties of Endohedral Fullerene (H 2) 2 @C 70 and (H 2 O) 2 @C 70 Accompanied by the Prospective of Novel (HF) 2 @C 70. *The Journal of Physical Chemistry C*. **122** (12): 6835-6845. Doi: 10.1021/acs.jpcc.8b00623
- Xie, Q., Pérez-Cordero, E., Echegoyen, L.** (1992). Electrochemical Detection of C606-and C706:- Enhanced Stability of Fullerides in Solution. *Journal of the American Chemical Society*. **114** (10): 3978-3980. Doi: 10.1021/ja00036a056
- Ya. Vul, A.** (2002). Perspectives of Fullerene Nanotechnology. In E. Ōsawa (Ed.), *Perspectives of Fullerene Nanotechnology*. Springer Netherlands. Doi: 10.1007/978-94-010-9598-3
- Zhang, S., Lukoyanova, O., Echegoyen, L.** (2006). Synthesis of fullerene adducts with terpyridyl- or pyridylpyrrolidine groups in trans-1 positions. *Chemistry - A European Journal*. **12** (10): 2846-2853. Doi: 10.1002/chem.200501333
- Zhou, Z., Sarova, G. H., Zhang, S., Ou, Z., Tat, F. T., Kadish, K. M., Echegoyen, L., Guldi, D. M., Schuster, D. I., Wilson, S. R.** (2006). Fullerene polypyridine ligands: Synthesis, ruthenium complexes, and electrochemical and photophysical properties. *Chemistry - A European Journal*. **12** (16): 4241-4248. Doi: 10.1002/chem.200600021

Artículo original

Extracción de plaguicidas en el aguacate Hass (*Persea americana* Mill. cv.) mediante el uso de C₁₈ y arcillas funcionales como fase adsorbente en la metodología QuEChERS

Extraction of pesticides in Hass avocado (*Persea americana* Mill. cv.) using C₁₈ and functional clays as adsorbent phases in the QuEChERS methodology

✉ Juan Pablo Betancourt-Arango*, ✉ Cesar Augusto Ossa-Jaramillo,
✉ Gonzalo Taborda-Ocampo

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Resumen

La agenda interna de competitividad del departamento de Caldas incluye el aguacate Hass como uno de los productos hortofrutícolas de mayor importancia y proyección en la región. Dadas las condiciones favorables del trópico y la gran biodiversidad de plagas, es necesario el uso de plaguicidas para su control, lo que conlleva un potencial peligro para la salud de los consumidores por los residuos de estos químicos tóxicos en el producto final. El interés del presente estudio es la inocuidad alimentaria del aguacate Hass, para lo cual es necesario implementar y validar metodologías de análisis de plaguicidas organoclorados y organofosforados. Se hicieron análisis en las cáscaras y la pulpa de aguacates Hass con la metodología QuEChERS comparando el uso de dos fases adsorbentes, el C₁₈ y las arcillas funcionales, con el fin de obtener una mezcla de analitos que luego fueron separados e identificados por cromatografía de gases con un detector de microcaptura de electrones (GC - μ ECD) para los compuestos organoclorados, y por cromatografía de gases con detección de nitrógeno y fósforo (GC - NPD) para los compuestos organofosforados. La metodología QuEChERS asociada con arcillas funcionales resultó más eficiente que la extracción con fase C₁₈ según los valores de resolución promedio de 3,44 en cáscara y de 2,12 en pulpa. El uso de esta nueva fase adsorbente facilitó la separación, generó una mayor resolución y extrajo de una mejor manera los plaguicidas presentes en la matriz.

Palabras clave: Aguacate; Arcillas funcionales; Cromatografía de gases; QuEChERS; Plaguicidas.

Abstract

The competitiveness agenda of the department of Caldas, Colombia, defines Hass avocado as one of the most important and promising fruit and vegetable products in the region. Given the favorable conditions of the tropics for pests, the use of pesticides is necessary for their control leading to potential danger for consumers' health due to the residues of these toxic chemicals in the final product. Our study focused on the safety of Hass avocado for consumption implementing and validating methodologies for the analysis of organochlorinated and organophosphate pesticides. We analyzed shells and pulp using the QuEChERS methodology and compared two adsorbent phases, C₁₈ and functional clays, to obtain a mixture of analytes later separated and identified by gas chromatography with electron microcapture detector (GC - ECD) for organochlorine compounds and by gas chromatography with nitrogen and phosphorus detection (GC - NPD) for organophosphorus compounds. QuEChERS' methodology associated with functional clays was more efficient than C₁₈ phase extraction according to the average resolution values obtained: 3.44 for shells and 2.12 for pulp. The use of this new adsorbent phase also facilitated separation, generated a higher resolution, and extracted the pesticides present in the matrix more efficiently.

Keywords: Avocado; Functional clays; Gas chromatography; QuEChERS; Pesticides.

Citación: Betancourt-Arango JP, Ossa-Jaramillo CA, Taborda-Ocampo G. Extracción de plaguicidas en el aguacate Hass (*Persea americana* Mill. cv.) mediante el uso de C₁₈ y arcillas funcionales como fase adsorbente en la metodología QuEChERS. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):286-299, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1235>

Editor: Sonia Moreno

***Correspondencia:**

Juan Pablo Betancourt-Arango;
chemquantum@outlook.com

Recibido: 8 de junio de 2020

Aceptado: 19 de diciembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Desde hace mucho tiempo los cultivos han sido protegidos para garantizar su conservación durante el transporte y la manipulación (**Karam, et al.**, 2004) mediante plaguicidas para el control de las diferentes plagas que pueden afectar los cultivos (**Cossio, et al.**, 2008). Estos plaguicidas se clasifican según las plagas que ayudan a combatir como insecticidas, fungicidas, herbicidas y raticidas, y según la familia química, como naturales o sintéticos (**Ferrer**, 2003). El cultivo de aguacate no es ajeno al efecto de las plagas, por lo que los agricultores se han visto en la necesidad de aplicar diferentes plaguicidas para preservar sus cosechas.

El aguacate es originario de México y América Central (**Cowan & Wolstenholme**, 2016). En términos botánicos y taxonómicos el aguacate Hass se conoce con el nombre científico de *Persea americana* Mill (**Serpa, et al.**, 2014). La demanda de este tipo de aguacate a nivel mundial ha crecido en los últimos años, lo que ha sido positivo para la economía de Colombia (**Cruz, et al.**, 2019). El departamento de Caldas, por ejemplo, pasó de producir 36.741 toneladas en el 2014 a 59.870 toneladas en el 2018 (**Cruz, et al.**, 2019). En ese contexto surgió la necesidad de controles rigurosos de la cantidad de residuos de plaguicidas en el producto dadas las exigencias de los mercados internacionales en cuanto a los niveles permitidos (**Tovar**, 2003). En este sentido, dado su alto contenido graso, el aguacate constituye un reto a la hora de su análisis por el posible efecto matriz (**Benavides & Echeverri**, 2014).

La extracción en fase sólida se ha consolidado como un método eficiente en la recuperación de plaguicidas en diferentes matrices analíticas. Entre las metodologías empleadas se destaca el método QuEChERS por ser rápido, fácil, barato, efectivo, sólido y seguro, por lo que se ha convertido en el más ampliamente utilizado para la extracción de los residuos de plaguicidas; en matrices como el aguacate, con un alto contenido graso, exige fases sólidas como la C_{18} para una extracción óptima (**Anastassiades, et al.**, 2003).

La metodología QuEChERS se caracteriza por ser un sistema de extracción en fase sólida dispersiva (dSPE) en dos etapas: en la primera se hace una extracción simple con un disolvente orgánico en presencia de sales como el sulfato de magnesio (el cual facilita la recuperación del analito) o el cloruro de sodio (que ayuda a controlar la polaridad entre el contenido de agua y el solvente orgánico añadido), y en la segunda etapa se hace un proceso de limpieza mediante la extracción en fase sólida dispersiva para facilitar la eliminación de agua residual y de los diferentes tipos de compuestos que pueden estar presentes en la matriz de análisis (**López, et al.**, 2010; **Benavides & Echeverri**, 2014). En esta segunda etapa se utilizan sales y sorbentes como el sulfato de magnesio (que elimina el exceso de agua residual), o las aminas primarias o secundarias (PSA) (que retienen los diferentes ácidos orgánicos y grasos, los azúcares y otros pigmentos presentes en la muestra), y el C_{18} como fase adsorbente (el cual ayuda a la eliminación de grasas, esteroides y otro tipo de interferencias no polares presentes en la matriz) (**López, et al.**, 2010). Así, la selección de las sales para el análisis de plaguicidas con QuEChERS en una determinada matriz depende del tipo de método de análisis escogido (**López, et al.**, 2010; **Fenik, et al.**, 2011).

La importancia de este tipo de análisis radica en la constante vigilancia de los residuos de plaguicidas en las matrices biológicas para dar cumplimiento a la normativa de seguridad alimentaria que rige a nivel mundial (**Mandal, et al.**, 2020). Por ello es importante establecer metodologías de análisis residual que permitan determinar simultáneamente un gran número de plaguicidas. Hasta ahora se han utilizado diferentes procedimientos de extracción para separar eficientemente los diferentes analitos (**Melo, et al.**, 2020).

Esta metodología ha sido validada para un gran número de muestras de frutas y vegetales con resultados favorables en el análisis rutinario de plaguicidas en los laboratorios (**Páez & Martínez**, 2015). Se ha propuesto una alternativa del método para minimizar la cantidad de reactivos empleados durante el procedimiento que consiste en cambiar el C_{18} como fase adsorbente por el uso de arcillas del tipo de la montmorillonita (MMT), materiales laminares denominados filosilicatos que hacen parte de la familia de las esmectitas que

estructuralmente están conformadas por silicio y oxígeno principalmente (Obando, *et al.*, 2016). Asimismo, estas arcillas poseen cationes metálicos en su interlamina octaédrica que compensan la carga parcialmente negativa de los grupos silicato, por lo que pueden ser intercambiados por otros, generando así procesos de intercambio iónico que facilitan la extracción de diferentes tipos de analitos (Obando, *et al.*, 2016). En este estudio se hicieron ensayos previos de extracción de plaguicidas organoclorados y organofosforados en el aguacate Hass (*Persea americana* Mill. cv.) con la metodología QuEChERS utilizando la cromatografía de gases con detección de microcaptura de electrones (GC - μ ECD) para el análisis de plaguicidas organoclorados y la cromatografía de gases con detección de nitrógeno y fósforo (GC - NPD) para el análisis de compuestos organofosforados.

Metodología

Muestras

Las muestras de aguacate Hass se obtuvieron de diferentes fuentes comerciales para hacer los ensayos previos con la metodología QuEChERS modificada.

Extracción en fase sólida. Para la extracción de los plaguicidas se utilizó la técnica de extracción en fase sólida dispersiva también conocida como método QuEChERS (Anastassiades, *et al.*, 2003), en sus dos etapas: la extracción de los plaguicidas y la limpieza. En dicho proceso la fase estacionaria convencional es el C₁₈, pero en este caso se quiso comparar esta fase sólida con una fase a base de arcillas funcionales, por lo que se trabajó con una versión modificada de la metodología AOAC 2007.1 (Association of Official Analytical Chemists-AOAC, 2007) adaptada a las condiciones del laboratorio y al tipo de muestra según se describe en la información suplementaria.

Condiciones cromatográficas

Cromatografía de gases con detector de microcaptura de electrones (GC - μ ECD): se utilizó un cromatógrafo de gases Hewlett-Packard (HP 6890 Serie II) equipado con un detector de microcaptura de electrones. La columna usada fue de HP-5 (5 % fenilmetilsilicona), de 30 m \times 0,25 mm ID \times 0,25 μ m; la rampa de temperatura del horno fue la siguiente: una temperatura inicial de 150 °C durante un minuto y aumento a una velocidad de 5 °C/min hasta llegar a los 300 °C/5 min de calentamiento en la temperatura final y un tiempo de ejecución de 36 minutos. La temperatura del inyector fue de 250 °C en modo de inyección sin división (*splitless*) y un volumen de inyección de 1 μ L. El gas de arrastre fue el nitrógeno (99,999 % de pureza), la temperatura del detector fue de 290 °C y el flujo de columna, de 1,0 mL/min.

Cromatografía de gases con detector de nitrógeno y fósforo (GC - NPD): se utilizó un cromatógrafo de gases Thermo Scientific™ TRACE™ 1310 equipado con un detector de nitrógeno y fósforo. La columna usada fue de HP-5 (5% fenilmetilsilicona), de 30 m \times 0,25 mm I.D \times 0,25 μ m; la rampa de temperatura del horno fue la siguiente: una temperatura inicial de 150 °C/1 minuto, después un aumento a una velocidad de 5 °C/min hasta llegar a los 300 °C/5 min de temperatura final, con un tiempo de ejecución de 36 minutos. La temperatura del inyector fue de 250 °C y se usó el modo de inyección sin división (*splitless*); el volumen de inyección fue de 1 μ L. El gas de arrastre fue el nitrógeno (99,999% de pureza). La temperatura del detector fue de 290 °C y el flujo de la columna de 1,0 mL/min.

Resultados

En primer lugar, se hizo una prueba con la metodología de extracción QuEChERS para valorar el efecto de preconcentración de los analitos en muestras de *Persea americana* Mill. cv. analizadas por GC - μ ECD. Las muestras de plaguicidas presentes en la cáscara de aguacates Hass obtenidas con esta metodología se compararon con aquellas que presentaban un efecto significativo de preconcentración (Figura 1). Por otro lado, dicho efecto se analizó con base en los valores obtenidos en su relación con el porcentaje de área para cada uno de los plaguicidas como se observa en la tabla 1 por el aumento

de los porcentajes de área frente a la presencia de un proceso de preconcentración en la muestra, lo que tuvo un efecto significativo en el aumento de la señal de los analitos y, por consiguiente, en su concentración. A partir de ese resultado se hizo indispensable incorporar la preconcentración en la metodología de trabajo descrita. En consecuencia, al final de la fase de limpieza se tomaron 2 mL del contenido y se sometió a evaporación todo el solvente para luego reconstituir el analito en 1 mL de este (o, idealmente, menos cantidad), para luego hacer un análisis cromatográfico de la muestra y comprobar el aumento en la correlación entre señal y concentración.

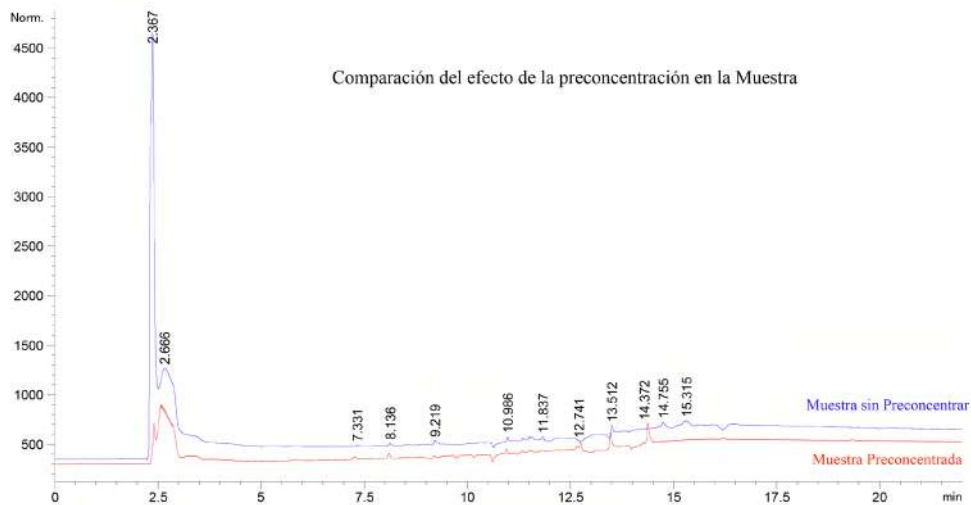


Figura 1. Cromatogramas de las pruebas preliminares de extracción con QuEChERS y valoración del efecto de preconcentración de los analitos en muestras de *Persea americana* Mill. cv. analizadas por GC- μ ECD

Tabla 1. Comparación del efecto de preconcentración de la muestra en cáscara de aguacate Hass con base en el porcentaje de área

Número de pico	Muestra de cáscara sin preconcentrar		Número de pico	Muestra de cáscara preconcentrada	
	Tiempo de retención	Porcentaje de área		Tiempo de retención	Porcentaje de área
1	7,331	0,10437	1	7,262	0,62896
2	8,136	0,14368	2	8,092	0,96048
3	9,219	0,34833	3	9,187	0,46810
4	10,986	1,23074	4	10,946	7,71288
5	11,371	0,12327	5	11,330	2,10244
6	11,524	0,17936	6	11,482	0,96746
7	11,586	0,14994	7	11,549	1,11016
8	11,837	0,21713	8	11,805	1,17625
9	12,231	0,59943	9	12,660	0,69457
10	13,512	0,84763	10	12,741	1,29712
11	14,755	0,72036	11	13,464	2,73842
12	15,315	1,46237	12	14,372	4,02574

Por otro lado, para evaluar la presencia de plaguicidas y las señales propias de la matriz obtenidas al final del proceso de extracción, se compararon muestras de cáscara dopadas y sin dopar (**Figura 2**) y de pulpa (**Figura 3**) utilizando una mezcla de compuestos organoclorados a una concentración de 10 ppm con C₁₈ como fase adsorbente. Así se pudo corroborar la presencia de plaguicidas en cáscaras y pulpa, cuya comparación se presenta en las **tablas 2**.

En la metodología QuEChERS es común el uso de C₁₈ como fase adsorbente en la etapa de limpieza de interferentes en la muestra, por ello se hizo un análisis comparativo entre su uso como fase adsorbente convencional y el de arcillas funcionales (MMT-Br) para establecer con cuál de dichas fases se obtenían mejores resultados en la extracción de los plaguicidas presentes en la matriz. Cabe resaltar que para dicha comparación se incorporó la etapa de preconcentración en la metodología QuEChERS para luego reemplazar los 300

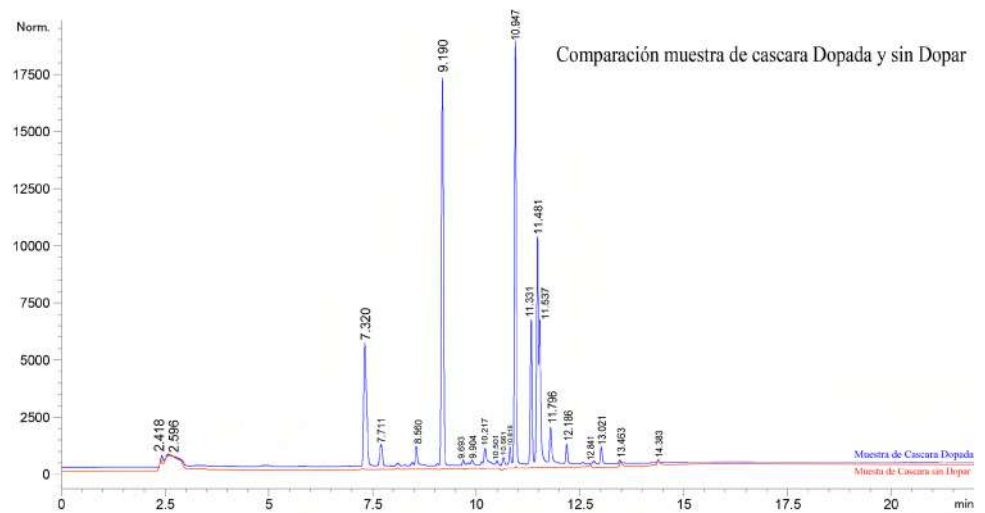


Figura 2. Comparación de las muestras de cáscara dopada y sin dopar de aguacate Hass (*Persea americana* Mill. cv.) analizadas por GC-μECD

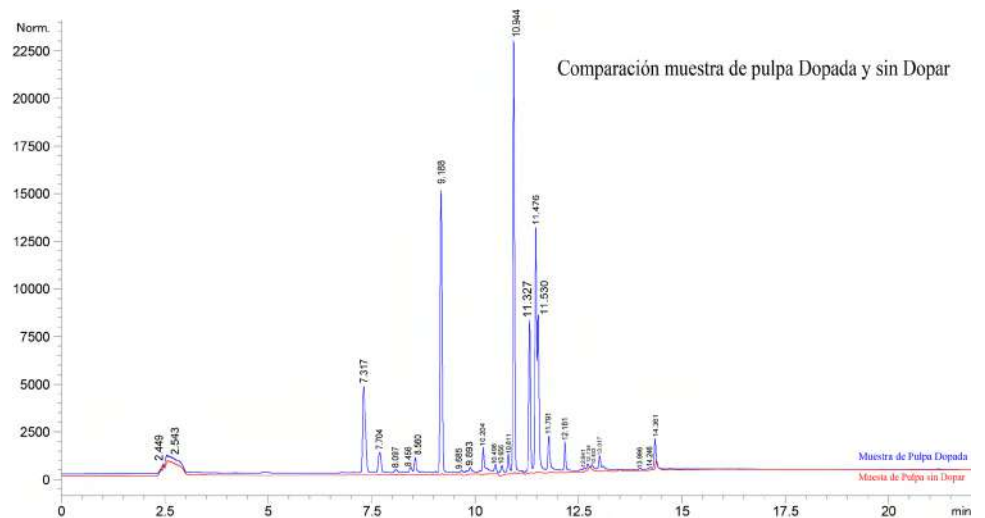


Figura 3. Comparación de las muestras de pulpa dopada y sin dopar en aguacate Hass (*Persea americana* Mill. cv.) analizadas por GC-μECD

mg de C₁₈ por 300 mg de arcillas funcionales (MMT-Br). La extracción de plaguicidas se hizo tanto en cáscara como en pulpa de aguacate Hass y luego se analizaron las diferencias entre los resultados obtenidos con cada fase adsorbente (**Figuras 4 y 5**).

En la **figura 4** se puede observar que hubo una mejor extracción de los residuos de plaguicidas organoclorados en la cáscara al utilizar las arcillas funcionales; también se notó un aumento en la relación entre señal y concentración de cada uno de los analitos y se evidenció que estos aparecían mucho más pronunciados cuando se utilizaron las arcillas como fase adsorbente que al emplear el C₁₈. Otra característica observada fue la aparición de muchos más picos en el cromatograma que reportó el uso de arcillas funcionales como adsorbente, lo que indica una mayor eficacia en la extracción de los diferentes plaguicidas presentes en la matriz.

Para saber cuál de las dos fases adsorbentes generó una mejor resolución en los compuestos obtenidos, se elaboró una tabla con los picos obtenidos con cada fase reflejados en los cromatogramas, así como su respectivo tiempo de retención y su ancho de pico, para determinar la resolución promedio y establecer la fase adsorbente con la que se obtuvo una mejor separación de los compuestos. Para ello se determinaron los picos del cromatograma más cercanos, lo que refleja, a su vez, su resolución; estos picos se presentan en negrilla en la **tabla 2**, y en la columna siguiente se presenta su resolución. Una vez determinados los picos cercanos y haber calculado su resolución, se procedió a determinar la resolución promedio para indicar con cuál de las dos fases se logró una mejor separación en los picos de compuestos muy cercanos.

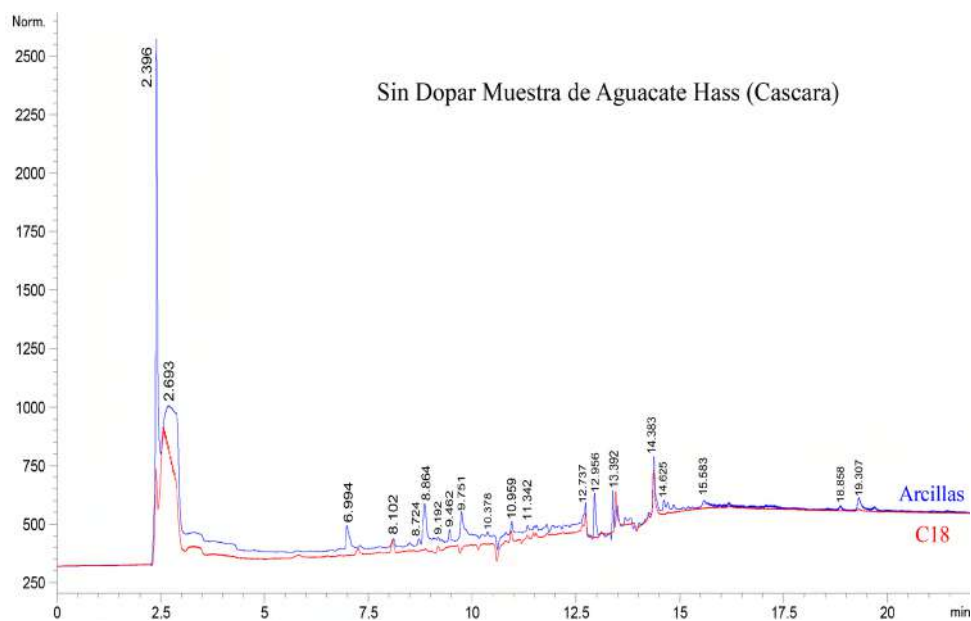
La resolución promedio con fase adsorbente C₁₈ fue de 1,83 y con arcillas funcionales de 3,44, lo que indica que el reemplazo del C₁₈ por dichas arcillas permitió una mejor resolución y, además, se obtuvieron muchos más picos en el cromatograma. Para comparar

Tabla 2. Determinación de la resolución promedio de los picos obtenidos en el cromatograma de la figura 4 al utilizar C₁₈ y arcillas funcionales como fase adsorbente en cáscara de aguacate Hass

Número de pico	Metodología QuEChERS con C ₁₈ como fase adsorbente			Número de pico	Metodología QuEChERS con arcillas funcionales como fase adsorbente		
	Tiempo de retención	Ancho de pico	Resolución		Tiempo de retención	Ancho de pico	Resolución
1	7,262	0,0786		1	6,994	0,0900	
2	8,092	0,0651		2	8,102	0,0864	
3	9,187	0,0650		3	8,724	0,0489	
4	10,946	0,2299		4	8,864	0,0876	2,05
5	11,330	0,1238	2,17	5	9,192	0,0570	
6	12,660	0,0602		6	9,462	0,0457	5,26
7	12,741	0,0496	1,48	7	9,751	0,0824	4,51
8	13,464	0,0569		8	10,378	0,0883	
9	14,372	0,0668		9	10,959	0,0748	
				10	11,342	0,0805	
				11	12,737	0,1510	
				12	12,956	0,0498	2,18
				13	13,392	0,0399	
				14	14,383	0,0825	
				15	14,625	0,0689	3,20
				16	15,583	0,1327	
	Resolución promedio usando C ₁₈		1,83	Resolución promedio usando arcillas funcionales			3,44

Tabla 3. Pruebas estadísticas aplicadas para la comparación de la efectividad de las fases adsorbentes en la extracción de plaguicidas en cáscara

Número de pico	Metodología QuEChERS con C ₁₈ como fase adsorbente para cáscara		Número de pico	Metodología QuEChERS con arcillas funcionales como fase adsorbente para cáscara	
	Tiempo de retención	Porcentaje de área		Tiempo de retención	Porcentaje de área
1	7,262	0,62896	1	6,994	1,56589
2	8,092	0,96048	2	8,102	0,44709
3	9,187	0,46810	3	8,724	0,23262
4	10,946	7,71288	4	8,864	2,51179
5	11,330	2,10244	5	9,192	0,22548
6	12,660	0,69457	6	9,462	0,35484
7	12,741	1,29712	7	9,751	1,54859
8	13,464	2,73842	8	10,378	0,80827
9	14,372	4,02574	9	10,959	0,89141
			10	11,342	0,44104
			11	12,737	4,32258
			12	12,956	1,57224
			13	13,392	1,19558
			14	14,383	4,09639
			15	14,625	1,05990
			16	15,583	0,91803
Promedio		2,29208	Promedio		1,47468
Desviación estándar		2,34611	Desviación estándar		1,18578
Varianza		5,50423	Varianza		1,40608

**Figura 4.** Cromatogramas de las pruebas preliminares de extracción con QuEChERS y análisis mediante GC – μ ECD para el estudio de plaguicidas organoclorados en la cáscara de *Persea americana* Mill. cv.

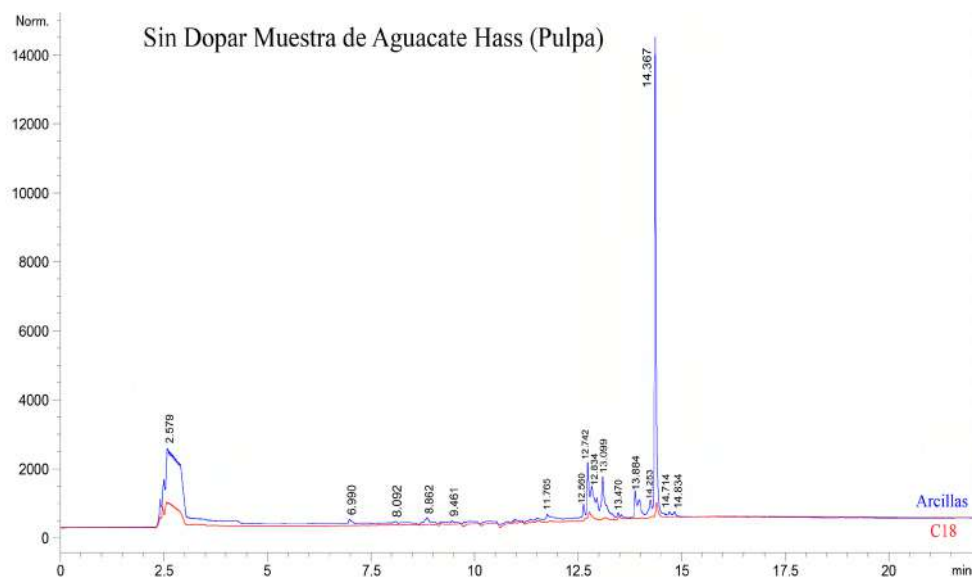


Figura 5. Cromatogramas de las pruebas preliminares de extracción con QuEChERS mediante análisis GC – μ ECD para el estudio de plaguicidas organoclorados en la pulpa de *Persea americana* Mill. cv.

la eficacia de ambas fases adsorbentes, también se analizaron los porcentajes de área reportados para cada uno de los picos obtenidos en el cromatograma de las muestras de cáscara (**Tabla 3**) aplicando la prueba estadística F para determinar la igualdad en las varianzas y el estadístico T de Student para comparar ambas fases.

Prueba F

$$F_{\text{experimental}} = 3,91457 > F_{\text{teórico}} = 2,44706$$

Prueba t

$$t_{\text{experimental}} = 0,99230 < t_{\text{teórico}} = 2,22813$$

Con la prueba estadística F de comparación de las varianzas de ambos datos frente a los porcentajes de áreas obtenidos con las dos fases adsorbentes, se registraron diferencias significativas, por lo que se aplicó la prueba estadística t de Student para muestras con varianzas desiguales y se concluyó que no había diferencias significativas entre las fases adsorbentes en cuanto a los porcentajes de área obtenidos para los picos. Dada esta ausencia de diferencias en el porcentaje de área obtenido, se determinó cualitativamente que la fase adsorbente a base de arcillas funcionales permitía una mejor extracción de los residuos de plaguicidas en la cáscara del aguacate Hass, pues presentó una mayor cantidad de picos en el cromatograma (**Figura 4**).

En la pulpa también se determinó si la membrana fue permeable a los residuos de plaguicidas. Como se sabe, esta se caracteriza por ser muy lipofílica por su alto contenido de ácidos grasos. En este análisis se utilizó el mismo procedimiento; en la **figura 5** se observa una mejor extracción de los residuos de plaguicidas organoclorados presentes en la pulpa con las arcillas funcionales, así como un aumento en la relación entre señal y concentración de cada uno de los analitos, los cuales fueron mucho más pronunciados al utilizar las arcillas comparadas con el C_{18} . Otra característica evidente fue la aparición de muchos más picos en el cromatograma que reportó el uso de arcillas funcionales como adsorbente, lo que indica una mayor eficacia en la extracción de los diferentes plaguicidas en la matriz. Se comparó, asimismo, cuál de las dos fases era mejor para la resolución en los compuestos obtenidos enumerando en una tabla los picos obtenidos con cada fase en los cromatogramas y estableciendo su respectivo tiempo de retención y su ancho de pico para determinar la resolución promedio. Con base en estos datos se determinó cuáles picos

eran muy cercanos para así calcular su resolución; estos picos aparecen en la **tabla 4** en negrilla, y en la columna siguiente se presenta su resolución. Una vez determinados los picos cercanos, y calculada su resolución, se estableció la resolución promedio con lo cual se determinó cuál de las dos fases permitía una mejor separación en los picos cercanos.

En los cromatogramas de las **figuras 4 y 5** se evidencia la presencia de varios plaguicidas organoclorados. Se observó un aumento de la concentración del compuesto con un tiempo de retención de 14,367 minutos a partir de su extracción utilizando las arcillas funcionales como fase adsorbente y después del proceso de preconcentración, como se ve en el cromatograma de la **figura 5**. Debe anotarse que aún se desconoce la identidad de dicho compuesto y, por ello, no se hizo la curva de calibración para determinar su concentración.

Se obtuvo una resolución promedio de 1,36 con la fase adsorbente C_{18} y de 2,12 con arcillas funcionales, lo que indica que el reemplazo de C_{18} por estas permitió una mejor resolución y muchos más picos en el cromatograma. En la **tabla 5** se presenta la comparación de la eficacia de las dos fases adsorbentes con base en los porcentajes de área reportados para cada uno de los picos obtenidos en el cromatograma de la pulpa con el uso de C_{18} y de las arcillas funcionales. Se aplicó la prueba estadística F para determinar la igualdad en las varianzas y el estadístico t de Student para comparar ambas fases adsorbentes y así determinar con cuál de las dos se obtenía un mejor porcentaje de área de los analitos presentes.

$$\begin{aligned} & \text{Prueba F} \\ & F \text{ experimental} = 16,92308 > F \text{ teórico} = 3,14037 \\ & \text{Prueba t} \\ & t \text{ experimental} = 1,33776 < t \text{ teórico} = 2,05553 \end{aligned}$$

Tabla 4. Determinación de la resolución promedio de los picos obtenidos en el cromatograma de la Figura 5 al utilizar C_{18} y arcillas funcionales como fase adsorbente en pulpa de aguacate Hass

Número de pico	Metodología QuEChERS con C_{18} como fase adsorbente			Número de pico	Metodología QuEChERS con arcillas funcionales como fase adsorbente		
	Tiempo de retención	Ancho de pico	Resolución		Tiempo de retención	Ancho de pico	Resolución
1	8,096	0,0519		1	6,990	0,0733	
2	9,192	0,0693		2	8,092	0,1299	
3	11,809	0,1573		3	8,862	0,1042	
4	12,664	0,0619		4	9,461	0,0497	
5	12,748	0,0993	1,04	5	11,765	0,1856	
6	13,131	0,1164		6	12,560	0,0697	
7	13,465	0,0616		7	12,742	0,0457	3,15
8	14,260	0,0665		8	12,834	0,0846	1,41
9	14,371	0,0660	1,67	9	12,955	0,0556	1,73
				10	13,099	0,0984	1,87
				11	13,470	0,0568	
				12	13,884	0,0506	
				13	13,981	0,0906	1,37
				14	14,253	0,0720	3,35
				15	14,367	0,0410	2,02
				16	14,714	0,0496	
				17	14,834	0,0653	2,09
	Resolución promedio usando C_{18}		1,36	Resolución promedio usando Arcillas funcionales			2,12

Tabla 5. Pruebas estadísticas aplicadas para la comparación de la efectividad de las fases adsorbentes en la extracción de plaguicidas en la pulpa

Número de pico	Metodología QuEChERS con C ₁₈ como fase adsorbente para pulpa		Número de pico	Metodología QuEChERS con arcillas funcionales como fase adsorbente para pulpa	
	Tiempo de retención	Porcentaje de área		Tiempo de retención	Porcentaje de área
1	8,096	0,14945	1	6,990	0,39042
2	9,192	0,80091	2	8,092	0,44504
3	11,809	1,93503	3	8,862	0,85408
4	12,664	1,16017	4	9,461	0,14523
5	12,748	5,20994	5	11,765	2,29119
6	13,131	1,79919	6	12,560	0,39456
7	13,465	1,07276	7	12,742	3,35398
8	14,260	0,73504	8	12,834	3,84641
9	14,371	5,70537	9	12,955	1,66267
			10	13,099	5,66831
			11	13,470	0,46765
			12	13,884	1,73656
			13	13,981	2,04817
			14	14,253	1,73118
			15	14,367	24,47938
			16	14,714	0,18908
			17	14,834	0,30991
	Promedio	2,06310		Promedio	4,57618
	Desviación estándar	2,00217		Desviación estándar	8,649
	Varianza	4,00868		Varianza	67,83993

La prueba estadística F de comparación de las varianzas en los porcentajes de áreas obtenidos con las dos fases adsorbentes evidenció diferencias significativas, por lo que se procedió a aplicar la prueba estadística t de Student para muestras con varianzas desiguales y se concluyó que no había diferencias significativas en cuanto a los porcentajes de área obtenidos para los picos con el uso de las dos fases adsorbentes. Dado que estadísticamente no hubo diferencias en el porcentaje de área obtenido, se determinó cualitativamente que la fase adsorbente a base de arcillas funcionales permitió una mejor extracción de los residuos de plaguicidas en la pulpa del aguacate Hass por presentar una mayor cantidad de picos en dicho cromatograma (**Figura 5**).

Por otro lado, se intentó determinar la presencia de picos en la matriz tanto de cáscara como de pulpa mediante la inyección individual de estándares externos de compuestos organoclorados (dieldrín, aldrín, hexaclorobenceno (HCB), heptacloro epóxido y betaendosulfán) para constatar su presencia en el cromatograma obtenido a partir de dichas matrices mediante la comparación de los tiempos de retención. En la **figura 6** se evidencia la presencia de un pico con un tiempo de retención parecido al del estándar externo HCB, así como otro con un tiempo de retención cercano al del estándar de heptacloro epóxido.

Se presentan, además, otras señales a partir de los 12,5 minutos que no se sabe aún a qué corresponden, lo que evidencia la necesidad de hacer un proceso de caracterización por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC - MS), con el fin de establecer la identidad estructural de estos compuestos y verificar la existencia de los compuestos con un tiempo de retención cercano a los estándares inyectados.

En la **figura 7** se aprecia un pico con un tiempo de retención parecido al del estándar externo HCB, así como señales a partir de los 12,5 minutos que aún se desconocen, por lo que es necesario caracterizarlas mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC - MS) para establecer su identidad estructural y verificar la existencia de los compuestos con un tiempo de retención cercano al estándar HCB.

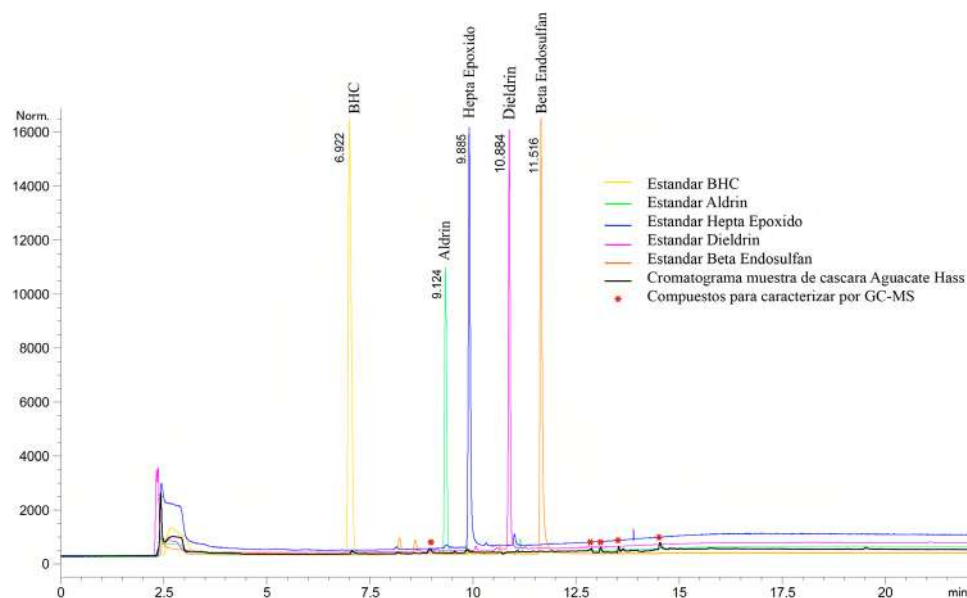


Figura 6. Comparación de los tiempos de retención de cinco estándares externos y el perfil cromatográfico obtenido para la extracción de plaguicidas presentes en cáscara de aguacate Hass usando arcillas funcionales como fase adsorbente

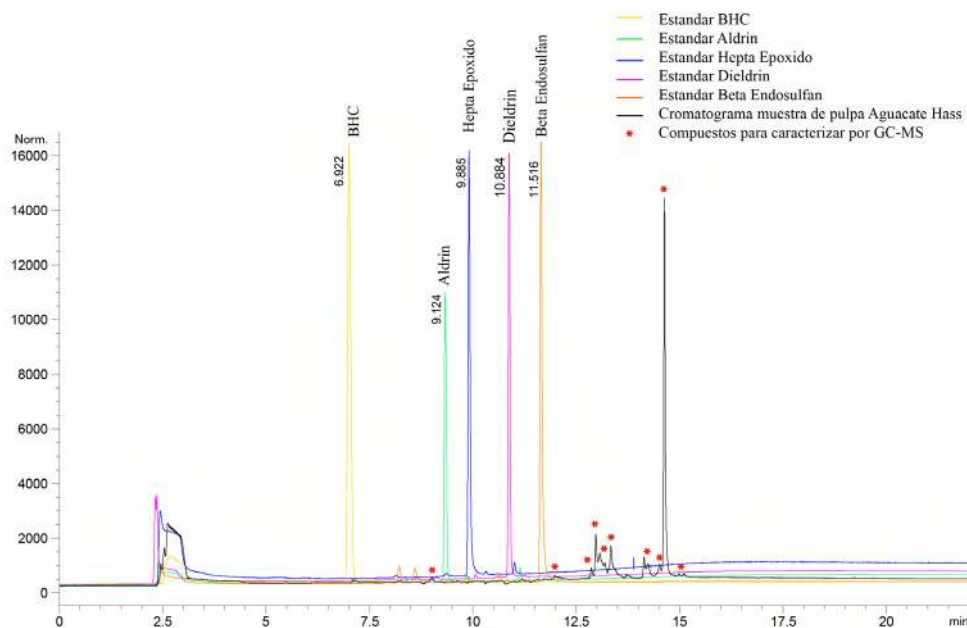


Figura 7. Comparación de los tiempos de retención de cinco estándares externos y el perfil cromatográfico obtenido para la extracción de plaguicidas presentes en pulpa de aguacate Hass usando arcillas funcionales como fase adsorbente

En el caso del análisis de los plaguicidas organofosforados, este se hizo de forma cualitativa mediante cromatografía de gases con detector de nitrógeno y fósforo. De esta manera se pudo analizar la presencia de algunos plaguicidas organofosforados en las muestras, pero aún deben compararse las muestras dopada y sin dopar para analizar las señales propias de la matriz. Los cromatogramas obtenidos de este análisis preliminar en la cáscara y la pulpa de aguacates Hass se presentan en la **figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1235/2982>. Se observa que es poca la cantidad de plaguicidas organofosforados detectada en la cáscara, pero que hubo un aumento en la señal de los plaguicidas y en el número de picos al utilizar las arcillas en lugar del C_{18} , lo que confirma una mejor extracción con el adsorbente a base de arcillas funcionales. Asimismo, se evidenció que la extracción de los plaguicidas que permearon la membrana fue mayor con las arcillas, y que aparecieron nuevos picos.

Discusión

Los resultados arrojados por el GC – μ ECD en muestras de cáscara y pulpa evidenciaron que hubo una mayor presencia de analitos en la pulpa que en la cáscara. Desde el punto de vista de la fase estacionaria, se notó claramente la capacidad que tiene la arcilla en comparación con el C_{18} . Además, el análisis mediante el uso de arcilla mostró picos con gran resolución y mayor cantidad de analitos que con el C_{18} .

En el análisis de la pulpa y la cáscara con GC – μ ECD y GC – NPD se demostró que la extracción con arcillas permitió una buena eliminación de las interferencias y, por ende, la resolución de sus picos. Además, la mayor presencia de analitos en la pulpa que en la cáscara se debe a que la pulpa se caracteriza por ser muy lipofílica debido a su alto contenido de ácidos grasos, por lo que los analitos se difunden desde la cáscara hacia el interior del fruto. En cuanto a la cáscara, la presencia de analitos fue menor, muy posiblemente por la lixiviación de la cáscara durante el proceso de cosecha y de transporte, o porque parte de ellos puede ingresar al interior del fruto.

Uno de los compuestos organoclorados detectó por GC – μ ECD en ambas fases (arcilla y C_{18}) registró un tiempo de retención de 14,367 minutos en pulpa y en la pulpa su extracción con una fase adsorbente de arcillas funcionales fue mucho más intensa, lo que responde a la presencia de compuestos organoclorados en ambas partes de la matriz de aguacate Hass.

Este estudio hace parte de una investigación en curso y restan muchos más ensayos con muestras comerciales y con las proporcionadas directamente por pequeños y grandes productores. Por ello es necesario elaborar una curva de calibración que permita análisis cuantitativos de los analitos determinados en esta matriz. Asimismo, es necesario hacer análisis mediante GC – MS para identificar los diferentes compuestos y luego utilizar estándares externos en las respectivas curvas de calibración.

Conclusiones

Se puede concluir que: la metodología QuEChERS modificada fue efectiva para la extracción de los plaguicidas y garantizó una buena resolución y la eliminación de interferencias que pueden presentarse en dicha matriz biológica; la aplicación de arcillas funcionales como fase adsorbente en esta metodología tuvo resultados muy prometedores como método para la extracción de compuestos organoclorados y organofosforados en matrices complejas; la presencia de plaguicidas tanto en cáscara como en pulpa, pero con mayor prevalencia en pulpa, se evidenció cualitativamente, aunque se requieren más análisis para confirmar la presencia de estos compuestos. Próximamente se espera determinar cuantitativamente mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC - MS) la concentración de los analitos de interés, así como identificar el tipo de los que están presentes en ambas partes de la matriz.

Información suplementaria

Figura 1S. Cromatogramas pruebas preliminares de extracción con QuEChERS y análisis por GC – NPD usando C18 y arcillas funcionales como fase adsorbente, para la separación y detección de plaguicidas Organofosforados. A es el cromatograma del análisis en cáscara y B es el cromatograma en la pulpa de *Persea americana Mill. cv.* Vea la figura 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1235/2982>

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Vicerrectoría de Investigaciones y Posgrados de la Universidad de Caldas por la financiación del proyecto.

Contribución de los autores

GT: director del proyecto, gestionó la obtención de los recursos para la compra de los insumos necesarios para la elaboración del proyecto e hizo la corrección del análisis y del manuscrito. CAO y JPBA: analistas, aplicaron la metodología QuEChERS comparando el C₁₈ con las arcillas funcionales para la extracción de plaguicidas en aguacates Hass; hicieron el análisis de los datos, y redactaron y corrigieron el documento.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflictos de intereses con respecto al contenido de este artículo.

Referencias

- Anastassiades, M., Lehotay, S., Stajnbaher, D., Schenck, F.** (2003). Fast and easy multiresidue method employing acetonitrile extraction/partitioning and “dispersive solid-phase extraction” for the determination of pesticide residues in produce. *Journal of AOAC International*. **86** (2): 412-431.
- AOAC.** (2007). Official Method 2007.01: Pesticide Residues in Foods by Acetonitrile Extraction and Partitioning with Magnesium Sulfate. *Journal of AOAC International*. **90** (2): 17-26. http://lib3.dss.go.th/fulltext/E_content/1060-3271/2007v90n2.pdf
- Benavides, S. & Echeverri, J.** (2014). Validación de un método para el análisis de residualidad de plaguicidas en Aguacate Hass. *Revista de La Facultad de Ciencias*. **5** (1): 170-183. Doi: 10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.56185
- Cowan, A.K. & Wolstenholme, B. N.** (2016). Avocado. *Encyclopedia of food and health*, pp.294-300. Doi: 10.1016/B978-0-12-384947-2.00049-0
- Cossio-Vargas, L. E., Salazar-García, S., González-Durán, I. J. L., Medina-Torres, R.** (2008). Fenología del Aguacate Hass en el clima semicálido de Nayarit, México. *Revista Chapingo. Serie horticultura*. **14** (3): 319-324.
- Cruz, P.A., Ortiz, E., Dubiana, A., Gómez Vargas, J.A.** (2019). Impacto de la exportación del Aguacate Hass a países bajos y mercado chino. (Tesis de pregrado). Universidad Cooperativa de Colombia. Bogotá. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12494/16694>
- Ferrer, A.** (2003). Intoxicación por plaguicidas. En *Anales del sistema sanitario de Navarra* (Vol. 26, pp. 155-171). Gobierno de Navarra. Departamento de Salud.
- Fenik, J., Tankiewicz, M., Biziuk, M.** (2011). Properties and determination of pesticides in fruits and vegetables. *Trends Anal. Chem.* **30**: 814-826.
- Karam, M.Á., Ramírez, G., Montes, L.P.B., Galvan, J.M.** (2004). Plaguicidas y salud de la población. *CIENCIA ergo-sum, Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*. **11** (3): 246-254.
- López, F. A., García, M. E., Fernández, S. I.** (2010). Procedimiento de extracción en fase sólida dispersiva QuEChERS para el análisis de plaguicidas. Universidad Politécnica de Valencia, p. 8.
- Mandal, S., Poi, R., Bhattacharyya, S., Ansary, I., Roy, S. D., Hazra, D. K., Karmakar, R.** (2020). Multiclass Multipesticide Residue Analysis in Fish Matrix by a Modified QuEChERS Method Using Gas Chromatography with Mass Spectrometric Determination. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*. **103** (1): 62-67. Doi: 10.5740/jaoacint.19-0205

-
- Melo, M. G., Carqueijo, A., Freitas, A., Barbosa, J., Silva, A. S.** (2020). Modified QuEChERS extraction and HPLC-MS/MS for simultaneous determination of 155 pesticide residues in rice (*Oryza sativa* L.). *Foods*. **9** (1): 18. Doi: 10.3390/foods9010018
- Obando, M., Cárdenas, V., Casanova, H., Montaña, D., Giraldo, L. F., Cardona, W., Rosero-Moreano, M.** (2016). Arcillas naturales funcionalizadas con líquidos iónicos para micro-extracción de ocratoxina A por membrana hueca empacada. *Scientia Chromatographica*. **8** (2): 129-136. Doi: 10.4322/sc.2016.024
- Páez, M. & Martínez, J.** (2015). Implementación de la metodología QuEChERS en el análisis de residuos de plaguicidas en maíz blanco (*Zea mays*). *Temas Agrarios*. **20**: 30-42. Doi: 10.21897/rta.v20i2.756
- Serpa, A. M., Echeverri, A., Lezcano, M. P., Vélez, L. M., Ríos, A. F., Hincapié, G. A.** (2014). Extracción de aceite de aguacate variedad "Hass" (*Persea americana* Mill) liofilizado por prensado en frío. *Revista Investigaciones Aplicadas*. **8** (2): 113-123.
- Tovar, M. Á. O.** (2003). Valor nutricional de la pulpa fresca de aguacate Hass. In *Proceedings V World Avocado Congress (Actas V Congreso Mundial del Aguacate)* (pp. 741-748).

Artículo original

Fotocatálisis heterogénea para la degradación de la orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina

Heterogeneous photocatalysis for ortho- and meta-nitroaniline degradation

✉ Sandra Marcela Gómez-González¹, ✉ Jonhy Roberto Rodríguez-Pérez²,
✉ Nahury Yamile Castellanos-Blanco², ✉ Héctor Fabio Cortes-Hernández^{2,*}

¹ Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales-INCIAM, Química, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

² GIEPRONAL, Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería, UNAD, Sede Nacional José Celestino Mutis, Bogotá, Colombia

Resumen

Las nitroanilinas son compuestos utilizados en pesticidas químicos, derivados de colorantes de tipo azoico, productos farmacéuticos y aditivos de combustibles, entre otros productos. El estudio del alcance de las aplicaciones de las nitroanilinas es un tema de importancia comercial e industrial, a pesar de que se ha encontrado que sus derivados, incluso en bajas concentraciones, generan una gran contaminación en los cuerpos de agua. En este sentido, el estudio de procesos y técnicas alternativas para la degradación de estos nitroderivados es un tema de interés, por lo que en este estudio se propone un proceso de degradación para los derivados de la orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina mediante fotocatalisis heterogénea con dióxido de titanio (TiO₂). Se diseñó y construyó un reactor prototipo a escala de laboratorio y se evaluó la cantidad de TiO₂, el valor del pH y la concentración de oxidante (H₂O₂) para ambas nitroanilinas, lo que permitió determinar la cinética de la degradación, analizar la recuperación del catalizador, y encontrar las condiciones de degradación óptimas; se observó que la cantidad de peróxido y el valor de pH predominaron en el porcentaje de degradación. Por último, se obtuvo una mineralización del 93,5 y el 97,6 % de los isómeros de la orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina, respectivamente, con un pseudo-orden cero para la degradación de ambos compuestos con base en el mecanismo de Langmuir-Hinshelwood.

Palabras clave: 2-nitroanilina; 3-nitroanilina; Fotodegradación; TiO₂; Pseudo-orden cero.

Abstract

Nitroanilines are compounds widely used in chemical pesticides, derived from azo dyes, pharmaceutical products, and fuel additives, among others. The study and application of nitroanilines have been important from a commercial and industrial perspective; however, it has been found that the elimination of nitroaniline derivatives in water bodies at low concentrations generates high contamination. In this sense, the study of alternative techniques and processes for their degradation is important. In the present study, we proposed a process for the degradation of ortho- and meta-nitroaniline derivatives using heterogeneous catalysis with TiO₂. We created a laboratory-scale prototype reactor and evaluated the amount of TiO₂, the pH value, and the concentration of oxidant (H₂O₂) for both nitroanilines and we were able to determine the degradation kinetics, analyze the catalyst recovery, and establish the optimal degradation conditions. We found that the amount of peroxide and pH value account for the highest percentage of degradation. Finally, we obtained the mineralization of 93.5% and 97.6% for the ortho- and meta-nitroaniline isomers, respectively, with a pseudo-zero-order reaction for the degradation of both compounds based on the Langmuir-Hinshelwood mechanism.

Keywords: 2-nitroaniline; 3-nitroaniline; Photodegradation; TiO₂; Pseudo-zero-order.

Citación: Gómez-González SM, Rodríguez-Pérez JR, Castellanos-Blanco NY, *et al.* Fotocatálisis heterogénea para la degradación de la orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):300-312, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1315>

Editor: Elizabeth Castañeda

***Correspondencia:**

Héctor Cortés;
hector.cortes@unad.edu.co

Recibido: 30 de septiembre de 2020

Aceptado: 20 de enero de 2021

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Introducción

Las nitroanilinas son un importante grupo de compuestos orgánicos que se utilizan como materia prima en la industria, principalmente como intermediarios de colorantes azoicos e inhibidores de la corrosión, así como en productos farmacéuticos y agroquímicos. Debido a la solubilidad en agua y toxicidad se han incluido como contaminantes prioritarios en diversos países (**Hasani, et al.**, 2008; **Wang, et al.**, 2014). La presencia en el agua de la 2-nitroanilina u orto-nitroanilina (2-NA) y de la 3-nitroanilina o meta-nitroanilina (3-NA), incluso en bajos niveles, es peligrosa para la vida acuática y humana debido a sus efectos carcinogénicos y mutagénicos (**Blakey, et al.**, 1994; **Saupe**, 1999; **Naseem, et al.**, 2017), por lo que han sido declaradas como contaminantes tóxicos y residuos peligrosos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (**Naseem, et al.**, 2017; **Dong, et al.**, 2014; **Wang, et al.**, 2015).

En dicho contexto, diversos estudios se han centrado en los procesos de absorción con bajos porcentajes de remoción de los sistemas (**Al-bayati, et al.**, 2013; **Al-bayati**, 2014), en tanto que los procesos de fotodegradación han logrado mejores resultados en la eliminación de los derivados de las nitroanilinas, como en el estudio de **Habibi, et al.** (2004), quienes utilizaron un reactor fotocatalítico con lámpara de Hg en presencia de óxido de zinc (ZnO) o de TiO₂ y oxígeno molecular, y obtuvieron una mejor degradación con el ZnO, con porcentajes de 86 y 90 % para la 2-NA y la 3-NA, respectivamente. Por su parte, **Mirkhani, et al.** (2009) utilizaron las mismas condiciones que **Habibi, et al.** (2004) pero cambiaron el catalizador por Ag-TiO₂, logrando así mejorar el porcentaje de degradación de la 2-NA (por encima del 90 %) y disminuyendo el de la 3-NA (por debajo del 85 %), con efectos negativos en el flujo de O₂ y un pH ácido. En el estudio de **Díaz, et al.** (2017) se evaluó la degradación de la 2-NA y la 3-NA por fotocatálisis con TiO₂ y radiación solar y se lograron porcentajes de degradación de 77 y 82 %, respectivamente; los autores indicaron que la calidad del agua resultante de la degradación era apropiada para las poblaciones de organismos acuáticos. No se han reportados otros estudios de fotodegradación con semiconductores para estos isómeros. Cabe resaltar que se han reportado otras metodologías de degradación de la 2-NA y la 3-NA, como los procesos de oxidación en agua supercrítica, con eficiencias mayores al 90 % en la eliminación de los derivados de nitroanilinas a temperaturas de 350 a 550 °C, presiones de 22 a 24 MPa y una proporción de 300 % en el exceso del flujo de O₂, aunque debe señalarse que este proceso requiere agua supercrítica y condiciones de alta demanda energética (**Yang, et al.**, 2018). En su estudio del mismo año **Amritha & Manu** (2018) utilizaron el proceso de oxidación por Fenton con extracción de hierro (lixiviación con ácidos inorgánicos) del suelo de la laterita, obteniendo degradaciones de 85,3, 84,3 y 98,7 % para la 2-NA, la 3-NA y la 4-nitroanilina, respectivamente. En este estudio, el efecto del pH y las concentraciones del oxidante y del hierro afectaron el porcentaje de degradación de los isómeros de las nitroanilinas. Más recientemente, **Mei, et al.** (2020 a) y **Mei, et al.** (2020b) propusieron la utilización de un biofiltro aireado por membrana (MABF) para tratar aguas residuales que contenían 4-nitroanilina y 2-NA y alcanzaron degradaciones del 100 y el 86,6 %, respectivamente. El proceso es de gran interés, pero la construcción del biofiltro de membrana es compleja. A diferencia de los isómeros 2 y 3 de las nitroanilinas, son diversos los estudios de fotocatálisis para la degradación de la 4-nitroanilina o para-anilina (**Gautam, et al.**, 2005; **Sun, et al.**, 2007; **Li, et al.**, 2009; **Ma, et al.**, 2009; **Surolia, et al.**, 2010; **Huang, et al.**, 2011; **Wang, et al.**, 2013; **Silambarasan, et al.**, 2015; **Zheng, et al.**, 2015; **Sharma, et al.**, 2020).

En este marco, en el presente estudio se utilizó la fotocatálisis heterogénea, uno de los procesos avanzados de oxidación, los cuales implican la generación suficiente de radicales hidroxilos (HO•) para la purificación del agua (**Deng, et al.**, 2015), para lo cual se diseñó un reactor prototipo de bajo costo a escala de laboratorio que aprovecha la mayor radiación posible para la formación de radicales hidroxilos en la degradación de los contaminantes 2-NA y 3-NA en medio acuoso. En el proceso se evaluaron las variables de pH y cantidad

de catalizador (TiO_2) y oxidante (H_2O_2) para generar las condiciones óptimas que permitieran obtener el mejor porcentaje de degradación de los derivados de nitroanilina y que superaran los obtenidos en estudios similares con otras metodologías. También se determinó la cinética de degradación utilizando el método gráfico para obtener la ecuación y predecir el orden de la reacción, aspectos que no han sido reportados en estudios previos de estos sistemas. Las ecuaciones cinéticas ayudarán a estimar los tiempos de degradación que dependen del porcentaje de mineralización a escala de laboratorio.

Materiales y métodos

Construcción del reactor fotocatalítico

El reactor fotocatalítico se construyó utilizando fibras de densidad media (*Medium Density Fibreboard*, MDF) de largo y ancho ajustados a las dimensiones de la plancha de agitación magnética (Corning™, modelo PC-420) ubicada en la parte inferior del reactor. La altura del reactor se ajustó a las dimensiones de un vaso de 500 mL como recipiente de mayor volumen en la parte interna (**Figura 1**). Para el reactor se usaron cuatro lámparas de luz ultravioleta modelo F8T5 de 30 cm de longitud con un consumo de potencia de 8 watts y una longitud de onda de 365 nm. Las lámparas se ubicaron en cada esquina del reactor, con el fin de obtener una distribución de radiación uniforme en la muestra al interior del sistema (**Figura 1**). Las paredes internas del reactor fueron recubiertas con pintura metalizada y papel aluminio, lo cual permitió una mayor concentración de radiación UV dentro de la cámara (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>). Para el control de las lámparas se utilizó un circuito en paralelo conectado a una fuente de corriente alterna de 120V ubicado en la parte superior interna del reactor. Además, se acopló un interruptor en la puerta (abierto/cerrado) para controlar la activación y desactivación del circuito, es decir, el flujo de corriente entre la fuente de 120V y las lámparas UV. Este sistema evita que el usuario se exponga a la radiación UV al abrir la puerta de acceso. Las dimensiones del reactor se muestran en la **figura 1** (vista en tercera dimensión, frontal y lateral, con sus respectivas medidas).

Degradación fotocatalítica

Se prepararon disoluciones de 50 ppm de 2-NA (98 %, Sigma-Aldrich) y 3-NA (98 %, Sigma-Aldrich). Las concentraciones iniciales, intermedias y finales se cuantificaron en un espectrofotómetro UV-VIS Lambda 17 (Perkin-Elmer®) a 350 nm sobre curvas de calibración previamente realizadas ($r=0,99982$ hasta 35 ppm y $r=0,99970$ hasta 10 ppm para la orto-nitroanilina y la meta-nitroanilina, respectivamente).

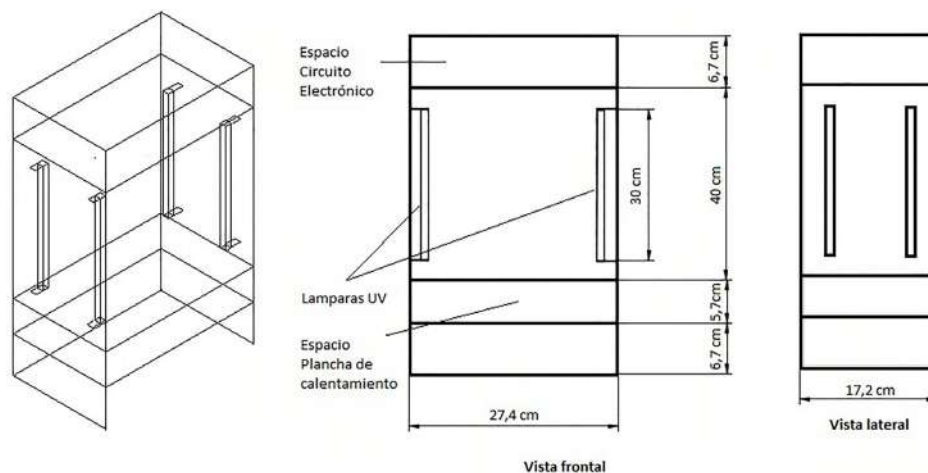


Figura 1. Esquema del prototipo del reactor fotocatalítico. Se observan los diferentes planos en las dimensiones utilizadas.

Las disoluciones de 50 ppm de 2-NA y 3-NA (la concentración de los contaminantes se propuso previo estudio de saturación del catalizador), se expusieron a radiación UV en el prototipo de reactor fotocatalítico en presencia de dióxido de titanio fase anatasa (99,8 %, Sigma-Aldrich), peróxido de hidrógeno (30 %, P.E. 1.11, Merck), ácido sulfúrico (96 %, P.E. 1,84, Merck), una proporción de 1:5 de agua destilada grado uno o 1.0 M de hidróxido de sodio (98 %, Merck) para controlar el pH. Las variables de cantidad de catalizador (0,3, 0,5, 0,7 y 0,9 g/L), de oxidante (0, 300, 500 y 700 ppm) y las condiciones del pH (2, 4, 6 y 7) se analizaron por triplicado en el proceso de degradación.

El proceso de fotodegradación se hizo a una velocidad de agitación de 700 rpm y un volumen de muestra de 50 mL. Para el muestreo se extrajeron 2 mL de solución a intervalos de 15 minutos utilizando un filtro de membrana Fisherbrand con un tamaño de poro de 0,22 μm (filtro empleado para remover las partículas de TiO_2 presentes en la muestra).

Cinética de fotodegradación

La cinética de reacción se determinó con el método gráfico utilizando el experimento que presentó los mejores porcentajes de fotodegradación con las variables de estudio (cantidad de catalizador, concentración del oxidante y valor de pH). El experimento se hizo por triplicado con extracción de muestras cada 15 minutos hasta completar 225 minutos.

Recuperación del catalizador

La recuperación del catalizador (TiO_2) se efectuó por sedimentación, lavado y posterior secado en una mufla (Thermo Scientific™, modelo F48010-33) a 500 °C. Además, se analizó la fase cristalina antes y después del proceso de fotodegradación y calentamiento en un difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance .

Análisis estadístico

La evaluación estadística se hizo mediante un ANOVA simple, uno multifactorial y pruebas de comparaciones múltiples de Duncan utilizando el programa Statgraphics® Centurion XVI. La prueba de hipótesis en la evaluación del ANOVA se hizo comparando la prueba de significación (factor F) del valor calculado y el valor teórico en las tablas, con un límite de confianza del 95 % ($p=0,05$) y una prueba de dos colas.

Resultados y discusión

Reactor fotocatalítico

El reactor fotocatalítico construido, de bajo costo y portátil, tuvo las dimensiones y especificaciones indicadas en la **figura 1**. El recubrimiento con pintura metalizada y papel aluminio generó un aumento en la degradación del 50 % (ensayo previo de fotodegradación con la 2-NA). El circuito eléctrico (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) se optimizó para reducir su complejidad, de tal manera que el mantenimiento y el control del reactor no requiriera un conocimiento especializado.

Después de construir el reactor se determinó la evolución y se evaluó el proceso fotocatalítico calculando el porcentaje de degradación (ecuación 1), donde C_i es la concentración inicial y C_t es la concentración en cada tiempo de las condiciones de degradación.

$$\% \text{ Degradación} = \left(\frac{C_i - C_t}{C_i} \right) * 100 \quad (1).$$

Para un mejor análisis se presenta primero el estudio de la 2-NA y después el de la 3-NA.

Degradación de la 2-nitroanilina

Los promedios de los ensayos de degradación de la 2-NA en diferentes concentraciones del catalizador (TiO_2) se muestran en la **figura 2**, donde se observa que las barras de error reflejaron la cercanía entre las medidas de los experimentos. Además, se evidenció una tendencia relativamente constante para las concentraciones de 0,3 g/L y 0,5 g/L. Sin embargo, en las concentraciones más altas del semiconductor, de 0,7 g/L y 0,9 g/L, se observó un aumento de la degradación, que pasó de 32 a 37 % sin adición de oxidante, con un valor

de pH de 5,7. La diferencia del 20 % en la degradación (**Figura 1**) entre las cantidades de 0,3 g/L y 0,5 g/L comparadas con las de 0,7 g/L y 0,9 g/L en un tiempo de 225 minutos, se debió al aumento de los sitios activos en la superficie del fotocatalizador (cantidad de catalizador), lo que favorece la quimisorción, es decir que la dosificación elevada del semiconductor mejoró la degradación de las nitroanilinas. Este resultado es similar al reportado por diversos autores para colorantes azoicos (**Hernández, et al., 2012; Zhang, et al., 2012; Lan, et al., 2014**).

Para verificar la validez de las diferencias en el porcentaje de degradación con relación a la cantidad de catalizador se hizo un ANOVA simple (**Tabla 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) bajo la hipótesis nula H_0 (no hay diferencia significativa entre las concentraciones de TiO_2) y la hipótesis alterna H_1 (hay diferencia significativa entre las concentraciones de TiO_2). El resultado de la prueba de significación rechazó la hipótesis nula ($p=0,0457$) y confirmó la diferencia en la dosificación del catalizador, aunque el resultado tan próximo de p en el límite estadístico reflejó la homogeneidad de los valores en algunos resultados, como se muestra en el diagrama de medias de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher en la **figura 3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>. En las **tablas 2S**, y **3S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972> (prueba de rangos múltiples para homogeneidad entre grupos y contrastes entre cada par de medias), se presenta el análisis estadístico adicional para la evaluación de la degradación de la 2-NA.

A partir de las concentraciones del semiconductor con el mejor porcentaje de degradación (0,7 g/L y 0,9 g/L), se analizó la variación del pH (2, 4 y 6) como se observa en la **figura 2** (las barras de error reflejan cercanía entre las medidas de los experimentos).

El pH en valores ácidos (pH=2, contribuyó al aumento de la degradación de la 2-NA hasta el doble de su porcentaje comparado con el sistema sin cambio de pH (**Figura 2**). Asimismo, en la **figura 3** se evidencia que con un pH de 6 la degradación de la 2-NA disminuyó y con uno de 4 mejoró levemente el rendimiento. No obstante, el pH=2 en la concentración de 0,7 g/L proporcionó la mejor degradación para la 2-NA como se evidencia en el hecho de que el pH de 2 se registró por debajo del pH del punto de carga cero del dióxido de titanio (pH=6,3), en el que aparecen las especies $Ti-OH$ o $Ti-OH_2^+$, las cuales generan atracciones intermoleculares para favorecer la absorción de moléculas orgánicas en la superficie del semiconductor, según los reportado en diversas investigaciones (**Ashua, et al., 2010; Ayoub, et al., 2017; Alalm, et al., 2014**).

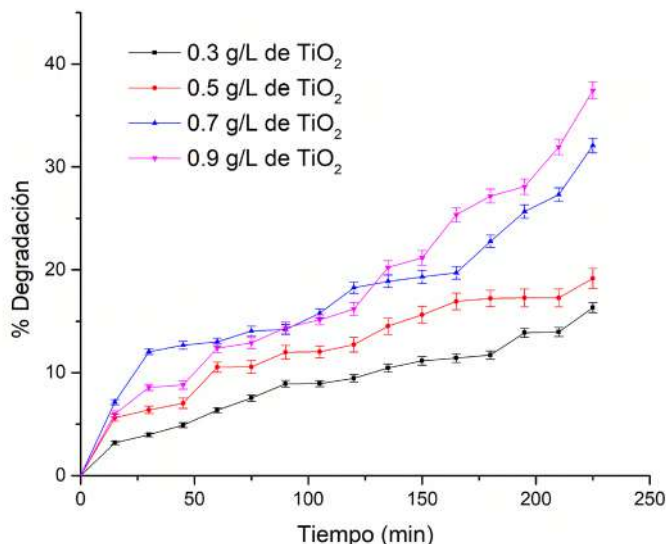


Figura 2. Porcentaje de degradación con barras de error de la 2-NA para 0,3 g/L, 0,5 g/L, 0,7 g/L y 0,9 g/L de TiO_2 , con 0 ppm de H_2O_2 y pH de 5,7

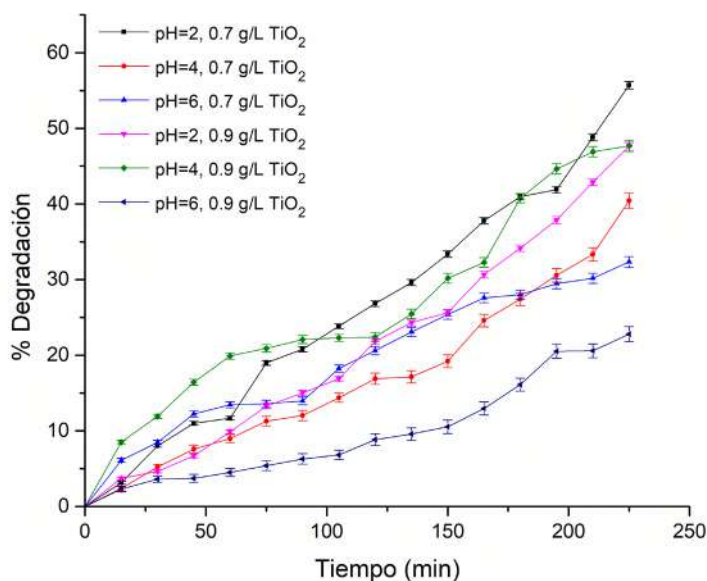


Figura 3. Porcentaje de degradación con barras de error de la 2-NA para 0,7 g/L y 0,9 g/L de TiO₂ con un pH de 2, 4 y 6 y 0 ppm de H₂O₂

Al igual que la concentración del semiconductor, se verificó la validez de las diferencias en el porcentaje de degradación con relación a la variación del pH mediante un ANOVA multifactorial (**Tabla 4S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) con la hipótesis nula H₀ (no existe diferencia significativa al variar el pH para las concentraciones de 0,7 y 0,9 g/L de TiO₂), y la hipótesis alterna H₁ (existe diferencia significativa al variar el pH para las concentraciones de 0,7 y 0,9 g/L de TiO₂). El resultado de la prueba de significación desechó la hipótesis nula (p=0,0028), lo que confirmó la diferencia entre los diferentes valores de pH. Por su lado, la interacción entre el pH y la cantidad de TiO₂ (p=0,3078) no presentó una diferencia significativa entre estos dos factores. En el diagrama de medias de Fisher (**Figura 4S, tablas 5S - 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>), se apreció una diferencia entre las medias del pH de 2 y el de 4 con respecto al de 6, dándose la mejor degradación con el pH más ácido. Esto se evidencia en el diagrama de interacción entre el pH y la cantidad de TiO₂ (**Figura 5S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>), donde las líneas se superponen e indican un comportamiento similar entre la concentración del TiO₂ con respecto a cada medida de pH con los mejores resultados para el pH de 2 y la concentración de 0,7 g/L.

La evaluación de la concentración del oxidante se hizo con 300, 500 y 700 ppm de H₂O₂, y las concentraciones del semiconductor de 0,7 g/L y 0,9 g/L y un pH de 2 y de 4 dieron el mejor porcentaje de degradación (**Figura 4**).

El aumento de la concentración del oxidante (700 ppm) favoreció la degradación de la 2-NA hasta el doble o triple del porcentaje comparada con los sistemas sin peróxido (**Figuras 2 y 3**). Asimismo, en la **figura 4** se observa cómo la degradación disminuyó o permaneció igual cuando las concentraciones de peróxido eran bajas, el pH de 4 y la cantidad de catalizador de 0,9 g/L. De hecho, para el sistema de la 2-NA la mejor degradación se registró con pH de 2, 700 ppm de H₂O₂ y 0,7 g/L de TiO₂ (93,5 %) (**Figura 4**). Es por ello que el aumento de la concentración del oxidante disminuyó la recombinación del electrón-hueco en el fotocatalizador y resultó en una degradación más rápida de las moléculas orgánicas (**Sapawe, et al., 2013; Gnanaprakasam, et al., 2015**).

La verificación de las diferencias en el efecto de la concentración del peróxido en relación con el porcentaje de degradación se validó con un ANOVA multifactorial (**Tabla 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) con una hipótesis

nula H_0 (no existe diferencia significativa al variar la concentración del oxidante para las dosificaciones de 0,7 y 0,9 g/L de TiO_2 y pH de 2 y 4) y una hipótesis alterna H_1 (existe diferencia significativa al variar la concentración del oxidante para las dosificaciones de 0,7 y 0,9 g/L de TiO_2 y pH de 2 y 4). El resultado de la prueba de significación desechó la hipótesis nula ($p=0,0000$) confirmando la diferencia entre los valores de concentración del oxidante. Sin embargo, en el promedio de los datos de degradación reflejados en el diagrama de medias de Fisher (**Figura 6S, tablas 9S – 11S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) se observa la similitud de los resultados entre las concentraciones de peróxido de 300 y 500 ppm en contraste con la concentración de 700 ppm, que, en promedio, aumentó 25 %.

En los gráficos de interacciones (**Figuras 7S y 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>), se observa que el promedio de la degradación fue mayor cuando la concentración de oxidante fue alta. Con el pH de 4 la degradación promedio fue prácticamente constante al aumentar el H_2O_2 , a diferencia del pH de 2, que incrementó con la concentración del oxidante (**Figura 7S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>). Asimismo sucedió con la dosificación del semiconductor (**Figura 8S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>). La disminución en el porcentaje de degradación debido al aumento de la concentración del fotocatalizador podría deberse al incremento de la opacidad en la suspensión, lo que ocasiona dispersión de la luz y reduce la profundidad de infiltración de los fotones que pueden activar los semiconductores (Gnanaprakasam, et al., 2015; Seshadri, et al., 2007).

Degradación de la 3-nitroanilina

Para la degradación de la 3-NA se utilizó la dosificación de 0,7 g/L de TiO_2 con la que se habían conseguido los mejores resultados para la 2-NA. El valor de pH se fijó entre 2 y 4, y la concentración de peróxido fue de 500 y 700 ppm (**Figura 5**).

En la degradación de la 3-NA no se observó una tendencia frente al pH (curvas con similar crecimiento en la **figura 5**). Lo contrario sucedió con la concentración del oxidante, que produjo un aumento en el porcentaje de degradación en concentraciones de

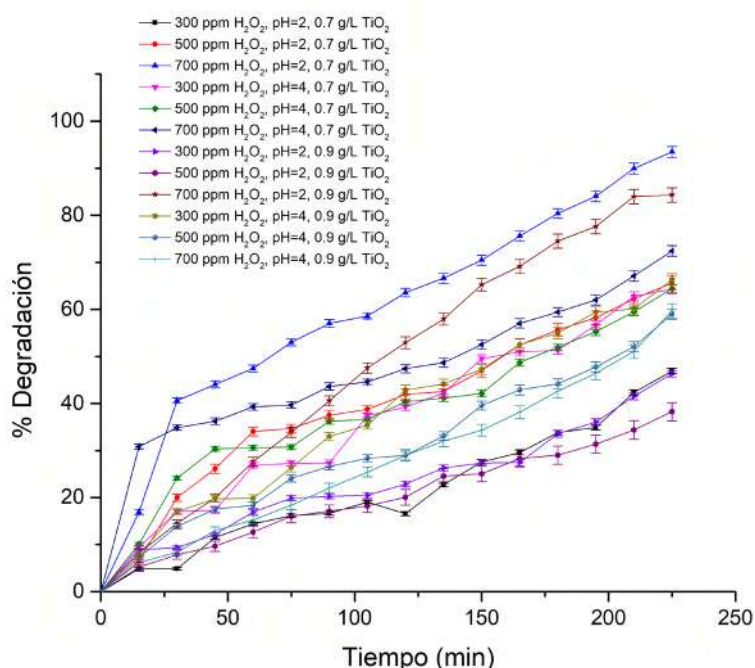


Figura 4. Porcentaje de degradación con barras de error de la 2-NA para 0,7 g/L y 0,9 g/L de TiO_2 , pH de 2 y 4, y 300, 500 y 700 de H_2O_2

peróxido de 500 ppm. Igualmente, con los pH de 2 y 4 y concentraciones bajas del oxidante se consiguió una mayor eficiencia para alcanzar altos valores de degradación. La diferencia en la concentración del oxidante para la degradación de la 2-NA y 3-NA se debe a que: i) la concentración de peróxido más allá del nivel óptimo genera radicales HO• que actúan como eliminadores de huecos y esto disminuye la eficiencia (Gnanaprakasam, *et al.*, 2015; Sobana, *et al.*, 2007), y ii) los fenómenos de interacción intramolecular debidos a la disposición de los grupos amino y nitro que favorecen la formación de un enlace de hidrógeno en la 2-NA (Panunto, *et al.*, 2015). La interacción adicional en la estructura generó rigidez, lo que conlleva condiciones más energéticas para el inicio de la degradación.

Así como con la 2-NA, en el ANOVA multifactorial se registraron diferencias en el efecto de la concentración del peróxido y el cambio de pH en cuanto al porcentaje de degradación de la 3-NA (Tabla 12S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) con la hipótesis nula H_0 (no existe diferencia significativa al variar la concentración del oxidante de 500 ppm a 700 ppm con un pH de 2 y 4 para las dosificaciones de 0,7 g/L de TiO_2), y la hipótesis alterna H_1 (existe diferencia significativa al variar la concentración del oxidante de 500 ppm a 700 ppm con pH de 2 y 4 para las dosificaciones de 0,7 g/L de TiO_2). En la prueba de significación se validó la hipótesis nula ($p > 0,05$), lo que confirmó que no existían diferencias significativas entre los valores de la concentración del oxidante y el pH. Ello se corroboró en el promedio de los datos de degradación finales expresados en el diagrama de medias de Fisher (Figuras 9S, y 10S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>), en que las diferencias entre las medias de los niveles de pH (Figura 9S; Tablas 13S y 14S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>), al igual que las medias en la concentración del H_2O_2 (Figura 10S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) fueron bajas, con lo que se comprobó la homogeneidad dentro de cada factor.

En el diagrama de interacción del pH y la concentración del H_2O_2 no se aprecia ninguna interacción entre los niveles de uno y otro (líneas paralelas) para la 3-NA, y en ambos casos el pH de 4 obtuvo los mejores resultados (degradación del 97,6 %) con una concentración de 500 ppm del oxidante (Figura 11S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>).

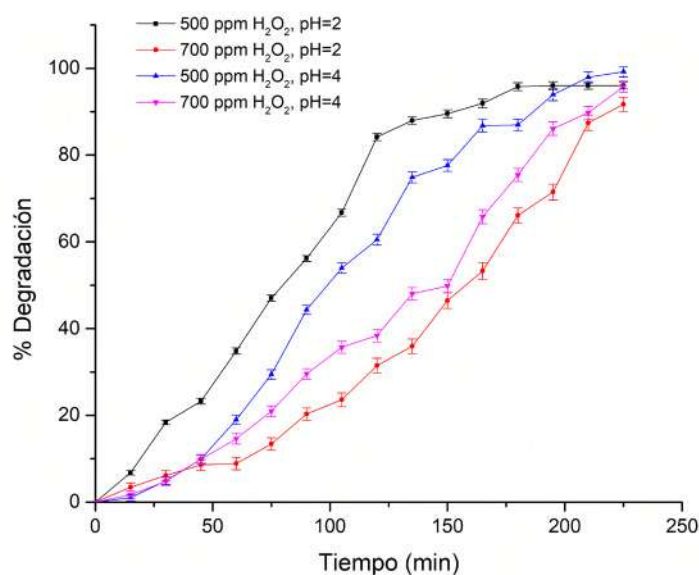


Figura 5. Porcentaje de degradación con barras de error de la 3-NA para 0,7 g/L de TiO_2 , pH de 2 y 4, y 500 y 700 ppm de H_2O_2

Cinética de reacción para la 2-NA y la 3-NA

La evaluación de la velocidad de degradación de la 2-NA y la 3-NA se hizo con los parámetros de pH, la concentración del oxidante y la dosificación del semiconductor con el mayor porcentaje de remoción (secciones G y H). En la **figura 6** (a, b y c) se observan las gráficas de pseudo-orden para la degradación de la 2-NA; en ellas el ajuste del pseudo-orden cero ($R^2=0,99144$) es mejor para describir los resultados de la cinética de degradación que el pseudo-orden uno ($R^2=0,95009$) o dos ($R^2=0,73323$). En la **figura 6a** se evidencia de forma proporcional la disminución de la concentración del derivado de nitroanilinas en el tiempo. El anterior pseudo-orden se obtuvo cuando el sustrato recurrió completamente el catalizador, cuya desaparición no depende de la concentración (**Theurich, et al., 1996**). De hecho, el ajuste de la regresión lineal con la ecuación 2 arrojó una pendiente que indica la disminución de $1,4093 \times 10^{-6}$ M/s o $0,1945$ mg/Ls de la concentración del 2-NA en agua.

$$C_{2NA} = -1.4093 \times 10^{-6}t + 3.5290 \times 10^{-4}M \quad (2).$$

De forma similar se procedió para la 3-NA. En la **figura 6d, e y f**, se presentan las gráficas de pseudo-orden para la cinética de degradación. El ajuste de la regresión lineal favoreció el pseudo-orden cero ($R^2=0,97151$) en comparación con el pseudo-orden uno ($R^2=0,79522$) o el dos ($R^2=0,30999$). Por lo tanto, se puede inferir que sucede el mismo fenómeno observado para la 2-NA. Para este isómero de la nitroanilina en agua se encontró una disminución de la concentración de $2,9816 \times 10^{-6}$ M/s o $0,5784$ mg/Ls, cuya ecuación de ajuste corresponde al número 3.

$$C_{3NA} = -2.9816 \times 10^{-6}t + 2.4708 \times 10^{-4}M \quad (3).$$

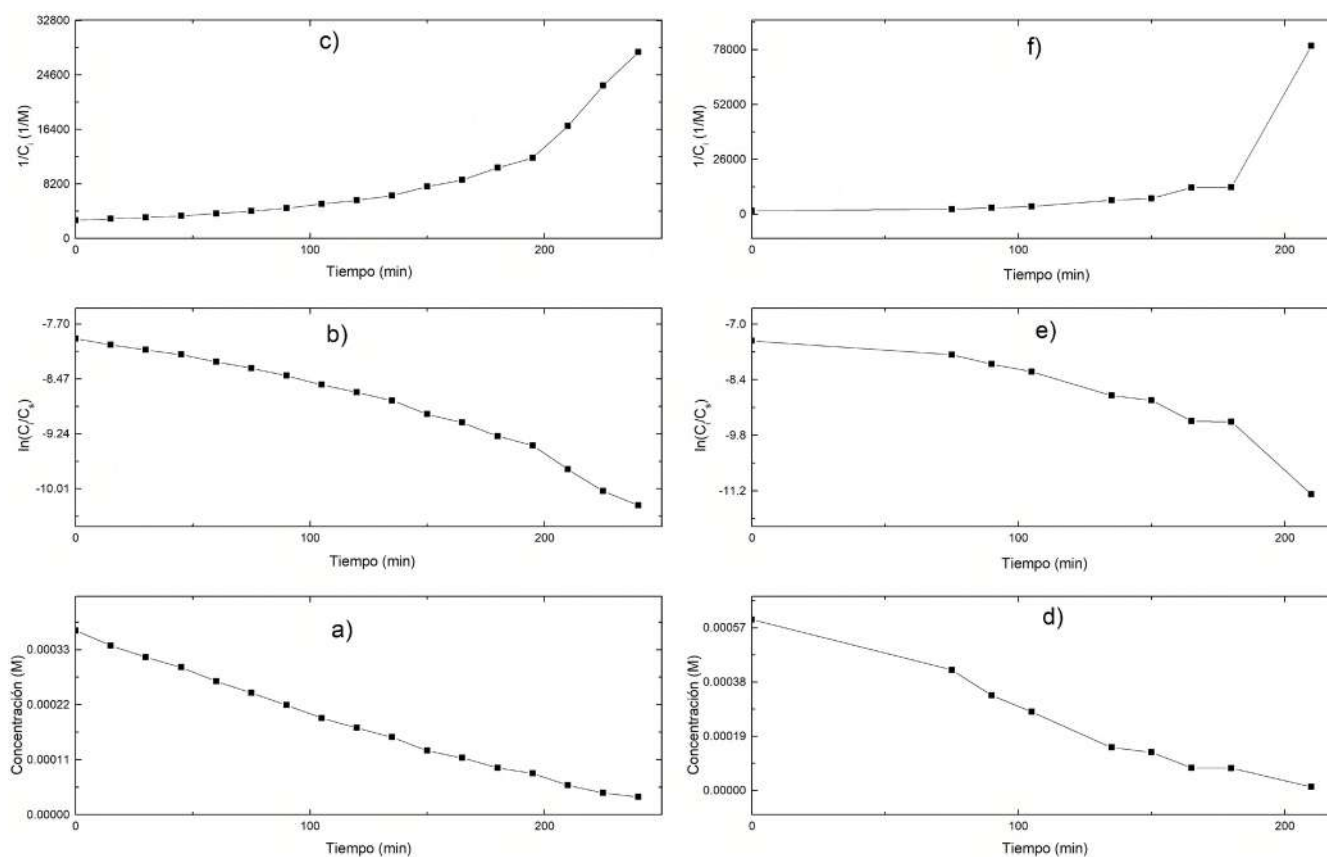


Figura 6. Gráficas de pseudo-orden: **a)** cero, **b)** uno y **c)** dos para la degradación de la 2-NA, y de pseudo-orden: **d)** cero, **e)** uno y **f)** dos para la degradación de la 3-NA

Para comprobar el pseudo-orden cero obtenido en los dos sistemas, se asumió que la quimisorción puede describirse por el mecanismo de Langmuir-Hinshelwood (L-H), cuya velocidad de degradación se indica en la ecuación 4.

$$-\frac{1}{m_c} \frac{d[X - NA]}{dt} = \frac{k_a K[X - NA]}{1 + K[X - NA]} \quad (4),$$

donde $d[X-NA]/dt$ es la velocidad de degradación de la 2-NA o 3-NA por masa del catalizador (m_c), k_a es la constante de velocidad aparente de la reacción, K el coeficiente de adsorción de la 2-NA o 3-NA, y $[X-NA]$ la concentración molar de la 2-NA o 3-NA. De la ecuación 4 se infieren dos condiciones: i) si la concentración es baja, el denominador tiende a 1 y la ecuación depende de la concentración de los isómeros de la nitroanilina, considerándose de primer orden; ii) si la concentración es alta, el denominador tiende a $K[X-NA]$, llegando a ser dependiente de las constantes y se considera de orden cero.

En este estudio se consideró el análisis propuesto por **Theurich, et al.** (1996), aplicado a la degradación del 4-clorofenol en suspensiones acuosas de dióxido de titanio. Al graficar la concentración en cada tiempo con relación a la concentración inicial (**Figura 7**) se puede generar una tendencia de los datos, si estos son de correlación lineal. Como se observa en la **figura 7**, ambos isómeros de la nitroanilina se consideran de orden cero o pseudo-orden cero, lo que respalda los resultados de la cinética de la reacción mediante el método gráfico (**Figura 6 a y d**).

Recuperación del catalizador TiO₂

El dióxido de titanio recuperado después de la fotodegradación fue de 70 % (pérdidas por filtración en la toma de muestras). Además, se caracterizó el TiO₂ inicial por difracción de rayos X (DRX) en polvo (**Figura 11S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>), y mediante la superposición de picos en el difractograma se encontró una relación de 70:30 de las fases anatasa:rutilo, en el que las líneas verdes corresponden a la fase de anatasa sintética y las líneas rojas a la fase de rutilo sintético.

Después del calentamiento a 500 °C durante 24 horas, se observó un cambio en la proporción del sólido (relación 80:20 de rutilo:anatasa) (**Figura 12S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>) debido a la transición de la fase de anatasa a rutilo, que ocurre entre los 400 y los 1.000 °C. La relación de fases obtenidas no afectó el proceso fotocatalítico para los compuestos bajo estudio.

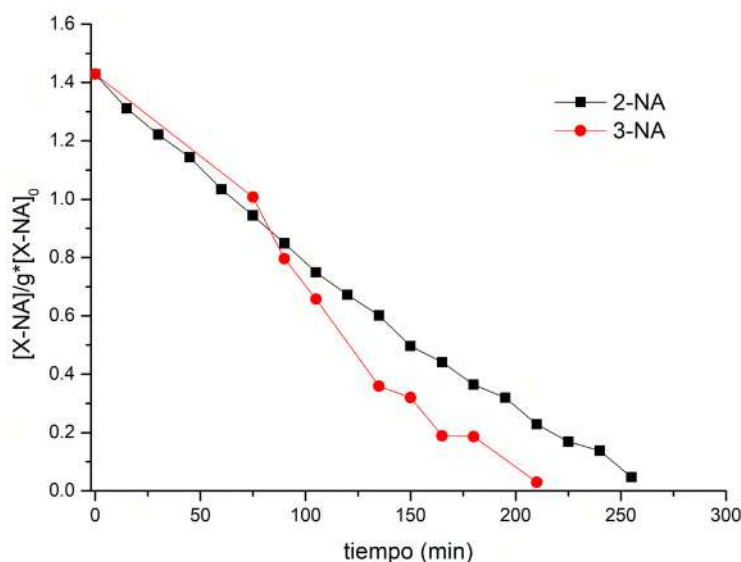


Figura 7. Gráficas de la relación de la concentración en el tiempo en relación con la concentración inicial por masa de catalizador con respecto al tiempo para 2-NA y 3-NA

Conclusiones

El prototipo de reactor fotocatalítico construido sirve para evaluar procesos de degradación de contaminantes en agua a escala de laboratorio. En el proceso de degradación de la 2-NA y la 3-NA en el reactor prototipo, con variaciones en el pH, la concentración de oxidante y la cantidad de semiconductor, se llegaron a obtener degradaciones de 93,5 y 97,6 % de los compuestos, respectivamente. Para la degradación de la 2-NA se requirieron altas concentraciones del oxidante y pH ácidos, contrario a la degradación del isómero 3-NA. La cinética de degradación obtenida mediante el método gráfico y el análisis mediante el mecanismo de Langmuir-Hinshelwood resultó en un pseudo-orden cero para ambos sistemas, lo que indica que los isómeros de la nitroanilina recubren el catalizador en su totalidad durante la degradación. Por otro lado, el análisis DRX no evidenció un cambio significativo en la estructura por saturación del catalizador o la incorporación de materia orgánica en el semiconductor.

Información suplementaria

Figuras suplementarias. Vea la información suplementaria en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1315/2972>

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Ciencias Ambientales (INCIAM) de la Universidad del Quindío y el grupo GIEPRONAL de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia-UNAD. Cortés le agradece al M.Sc Luis Alfonso Salazar por todo el apoyo en la instrumentación química empleada en el presente trabajo.

Contribución de los autores

SMGG diseñó el reactor y realizó medidas experimentales de las concentraciones de la 2-NA y la 3-NA; JRRP contribuyó en la evaluación de las concentraciones y el análisis estadístico; NYCB aportó al análisis estadístico y la evaluación de los difractogramas; HFCH se encargó de la evaluación del seguimiento de la degradación, el análisis estadístico y la cinética química, además de supervisar la escritura del artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Alalm, MG. & Tawfik, A.** (2014). Solar Photocatalytic Degradation of Phenol in Aqueous Solutions Using Titanium Dioxide. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index* 86, *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*. **8** (2): 144-147. Doi: 10.5281/zenodo.1090934
- Al-bayati, TM.** (2014). Removal of Aniline and Nitro-Substituted Aniline from Wastewater by Particulate Nanoporous MCM-48. *Particulate Science and Technology An International Journal*. **32** (6): 616-623. Doi: 10.1080/02726351.2014.948973
- Al-bayati TM. & Doyle, AM.** (2013). Shape-Selective Adsorption of Substituted Aniline Pollutants from Wastewater. *Adsorption Science & Technology*. **31** (5): 459-468. Doi: 10.1260/0263-6174.31.5.459
- Amritha, AS. & Manu, B.** (2018). Degradation of nitroaromatic compounds: a novel approach using iron from laterite soil. *Appl Water Sci*. **8**: 136. Doi: 10.1007/s13201-018-0778-7
- Asuha, S., Zhou, X.G., Zhao, S.** (2010) Adsorption of Methyl Orange and Cr(VI) on Mesoporous TiO₂ Prepared by Hydrothermal Method. *Journal of Hazardous Materials*. **181**: 204-210. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.117
- Ayoub, H., Kassir, M., Raad, M., Bazzi, H., Hijazi, A.** (2017). Effect of Dye Structure on the Photodegradation Kinetic Using TiO₂ Nanoparticles. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. **5**: 31-45. Doi: 10.4236/msce.2017.56004

- Blakey, DH., Maus, KL., Bell, R., Bayley, J., Douglas, GR., Nestmann, ER.** (1994). Mutagenic activity of 3 industrial chemicals in a battery of in vitro and in vivo tests. *Mutat Res-Gen Tox.* **320** (4): 273-283. Doi: 10.1016/0165-1218(94)90080-9
- Deng, Y. & Zhao R.** (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Curr Pollution Rep.* **1**: 167-176. Doi: 10.1007/s40726-015-0015-z
- Díaz, WD., Cortés, HF., Rodríguez, JA.** (2017). Degradación fotocatalítica de la orto y meta-nitroanilina en un reactor cilíndrico – parabólico compuesto. *Entre Ciencia e Ingeniería.* **11** (22): 95-100. Doi: 10.31908/19098367.3554
- Dong, Z., Le, X., Li, X., Zhang, W., Dong, C., Ma, J.** (2014). Silver nanoparticles immobilized on fibrous nano-silica as highly efficient and recyclable heterogeneous catalyst for reduction of 4-nitrophenol and 2- nitroaniline. *Appl Catal B.* **158** (129): 129-135. Doi: 10.1016/j.apcatb.2014.04.015
- Gautam, S., Kamble, SP., Sawant, SB., Pangarkar, VG.** (2005). Photocatalytic degradation of 4-nitroaniline using solar and artificial UV radiation. *Chemical Engineering Journal.* **110** (1-3): 129-137. Doi: 10.1016/j.cej.2005.03.021
- Gnanaprakasam, A., Sivakumar, VM., Thirumarimurugan, M.** (2015). Influencing Parameters in the Photocatalytic Degradation of Organic Effluent via Nanometal Oxide Catalyst: A Review. *Indian Journal of Materials Science.* **2015**: 1-16. Doi: 10.1155/2015/601827
- Habibi, MH., Khaledisardashti, M., Montazerzohori, M.** (2004). Photocatalytic Mineralisation of Aniline Derivatives in Aquatic Systems Using Semiconductor Oxides. *Annali di Chimica.* **94** (5-6): 421- 428. Doi: 10.1002/adic.200490051
- Hasani, M. & Emami F.** (2008). Evaluation of feed-forward back propagation and radial basis function neural networks in simultaneous kinetic spectrophotometric determination of nitroaniline isomers. *Talanta.* **75**: 116-126. Doi: 10.1016/j.talanta.2007.10.038
- Hernández, JM., García, LA., García, R., Cueto, A., Carmona, J.** (2012). Estudio cinético de la fotodegradación del naranja de metilo en presencia de TiO₂: efecto de la fuente de radiación U.V., concentración del azo-colorante y del catalizador. *Av. cien. Ing.* **3** (2): 25-34.
- Huang, W. & Liu, R.** (2011). Photocatalytic Degradation of p-Nitroaniline with Composite Photocatalyst H3P12W40/TiO₂. *Advanced Materials Research.* **233-235**: 967-970. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.967
- Lan, S., Liu, L., Li, R., Leng, Z., Gan, S.** (2014). Hierarchical Hollow Structure ZnO: Synthesis, Characterization, and Highly Efficient Adsorption/Photocatalysis toward Congo Red. *Industrial & Engineering Chemistry Research.* **53** (8): 3131-3139. Doi: 10.1021/ie404053m
- Li, K., Zheng, Z., Feng, J., Zhang, J., Luo, X., Zhao, G., Huang, X.** (2008). Adsorption of p-nitroaniline from aqueous solutions onto activated carbon fiber prepared from cotton stalk. *Journal of Hazardous Materials.* **166** (2-3): 1180-1185. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.035
- Ma, H., Wang, M., Pu, C., Zhang J., Zhao, S., Yao, S., Xiong, J.** (2009). Transient and steady-state photolysis of p-nitroaniline in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials.* **165** (1-3): 867-873. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.077
- Mei, X., Ding, Y., Wang, Y., Yang, Y., Xu, L., Wang, Y., Shen, W., Zhang, Z., Ma, M., Guo, Z., Xiao, Y., Yang, X., Zhou, B., Xu, K., Guo, W., Wang, C.** (2020a). A novel membrane-aerated biofilter for the enhanced treatment of nitroaniline wastewater: Nitroaniline biodegradation performance and its influencing factors. *Bioresource Technology.* **307**: 123241. Doi: 10.1016/j.biortech.2020.123241
- Mei, X., Wang, Y., Yang, Y., Xu, L., Wang, Y., Guo, Z., Shen, W., Zhang, Z., Ma, M., Ding, Y., Xiao, Y., Yang, X., Yin, C., Guo, W., Xu, K., Wang, C.** (2020b). Enhanced treatment of nitroaniline-containing wastewater by a membrane-aerated biofilm reactor: Simultaneous nitroaniline degradation and nitrogen removal. *Separation and Purification Technology.* **248**: 117078. Doi: 10.1016/j.seppur.2020.117078
- Mirkhani, V., Tangestaninejad, S., Moghadam, M., Habibi, MH., Vartooni, AR.** (2009). Photodegradation of aromatic amines by Ag-TiO₂ photocatalyst. *Journal of the Iranian Chemical Society.* **6**: 800-807. Doi: 10.1007/BF03246172
- Naseem, K., Begum, R., Farooqi, Z.H.** (2017). Catalytic reduction of 2-nitroaniline: a review. *Environ Sci Pollut Res.* **24**: 6446-6460. Doi: 10.1007/s11356-016-8317-2
- Panunto, TW., Urbanczyk, Z., Johnson, R., Etter, CM.** (1987). Hydrogen-bond formation in nitroanilines: the first step in designing acentric materials. *Journal of the American Chemical Society.* **109** (25): 7786-7797. Doi: 10.1021/ja00259a030
- Sapawe, N., Jalil, AA., Triwahyono, S.** (2013). Photodecolorization of methylene blue over EGZrO₂/

- EGZnO/EGFe₂O₃/HY photocatalyst: effect of radical scavenger. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*. **9** (2): 67-73. Doi: 10.11113/mjfas.v9n2.85
- Saupe, A.** (1999). High-rate biodegradation of 3- and 4-nitroaniline. *Chemosphere*. **39** (13): 2325-2346. Doi: 10.1016/S0045-6535(99)00141-1
- Seshadri, H., Chitra, S., Paramasivan, K., Sinha, PK.** (2008). Photocatalytic degradation of liquid waste containing EDTA. *Desalination*. **232** (1-3): 139-144. Doi: 10.1016/j.desal.2007.12.013
- Sharma, S., Kumar, S., Arumugam, SM., Elumalai, S.** (2020), Promising photocatalytic degradation of lignin over carbon quantum dots decorated TiO₂ nanocomposite in aqueous condition. *Applied Catalysis A: General*. **602**: 117730. Doi: 10.1016/j.apcata.2020.117730
- Silambarasan, S. & Vangnai, A.** (2016). Biodegradation of 4-nitroaniline by plant-growth promoting *Acinetobacter* sp. AVLB2 and toxicological analysis of its biodegradation metabolites. *Journal of Hazardous Materials*. **302**: 426-436. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.010
- Sobana N., Swaminathan, M.** (2007). The effect of operational parameters on the photocatalytic degradation of acid red 18 by ZnO. *Separation and Purification Technology*. **56** (1): 101-107. Doi: 10.1016/j.seppur.2007.01.032
- Sun, JH., Sun, SP., Fan, MH., Guo, HQ., Qiao, LP., Sun, RX.** (2007). A kinetic study on the degradation of p-nitroaniline by Fenton oxidation process. *Journal of Hazardous Materials*. **148** (1-2): 172-177. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.02.022
- Surolia, PK., Tayade, RJ., Jasra, RV.** (2010). TiO₂-Coated Cenospheres as Catalysts for Photocatalytic Degradation of Methylene Blue, p-Nitroaniline, n-Decane, and n-Tridecane under Solar Irradiation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. **49** (19): 8908-8919. Doi: 10.1021/ie100388m
- Theurich, J., Lindner, M., Bahnemann, DW.** (1996). Photocatalytic Degradation of 4-Chlorophenol in Aerated Aqueous Titanium Dioxide Suspensions: A Kinetic and Mechanistic Study. *Langmuir*. **12** (26): 6368-6376. Doi: 10.1021/la960228t
- Wang, H., Jiang, H., Song, N., Liu, X., Jia, Q.** (2014). Application of cloud point methodology to the determination of nitroanilines in natural water, *Korean J. Chem. Eng.* **31**: 2261-2265. Doi: 10.1007/s11814-014-0182-4
- Wang, N., Zheng, T., Jiang, J., Wang, P.** (2015). Cu(II)-Fe(II)-H₂O₂ oxidative removal of 3-nitroaniline in water under microwave irradiation. *Chemical Engineering Journal*. **260**: 386-392. Doi: 10.1016/j.cej.2014.09.002
- Wang, Y., Zhang, YN., Zhao, G., Wu, M., Li, M., Li, D., Zhang, Y., Zhang, Y.** (2013). Electrosorptive photocatalytic degradation of highly concentrated p-nitroaniline with TiO₂ nanorod-clusters/carbon aerogel electrode under visible light. *Separation and Purification Technology*. **104**: 229-237. Doi: 10.1016/j.seppur.2012.11.009
- Yang, B., Cheng, Z., Fan, M., Jia, J., Yuan, T., Shen, Z.** (2018). Supercritical water oxidation of 2-, 3- and 4-nitroaniline: A study on nitrogen transformation mechanism. *Chemosphere*. **205**: 426-432. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.029
- Zhang, Z., Xu, Y., Ma, X., Li, F., Liu, D., Chen, Z., Zhang, F., Dionysiou, DD.** (2012). Microwave degradation of methyl orange dye in aqueous solution in the presence of nano-TiO₂-supported activated carbon (supported-TiO₂/AC/MW). *Journal of Hazardous Materials*. **209-210**: 271-277. Doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.01.021
- Zheng, K., Zhang, TC., Lin, P., Han, YH., Li, HY., Ji, RJ., Zhang HY.** (2015). 4-Nitroaniline Degradation by TiO₂ Catalyst Doping with Manganese. *Journal of Chemistry*. **2015**: 1-6. Doi: 10.1155/2015/382376

Artículo de revisión

Desarrollo de los instrumentos de detección y de registro de señales sísmicas. Metadatos de las redes sismológicas de la región de Latinoamérica y el Caribe

Development of instruments for the detection and recording of seismic signals. Metadata of the seismological networks of the Latin American and Caribbean region

Erhard Wielandt¹, Alexander Caneva^{2,3}, Carlos A. Vargas²

¹Institute of Geophysics, Stuttgart University, Stuttgart, Germany

²Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

³Centro de Investigaciones, Universidad Antonio Nariño, Bogotá, Colombia

Resumen

En el presente trabajo se hace una breve descripción del desarrollo de los instrumentos de detección y de registro de señales sísmicas, considerando algunos aspectos técnicos e históricos. Esta descripción parte de los primeros sismoscopios, que evolucionaron en sismómetros, y culmina con los sismógrafos, instrumentos que detectan y registran las señales sísmicas. En relación con estos últimos, se analiza cómo del sismógrafo mecánico se pasó al electrodinámico para llegar al sismógrafo moderno con registro digital. En la parte final del documento se plantea la necesidad de incluir los metadatos descriptivos de las redes sismológicas además de los datos registrados por las estaciones que la conforman. Se presentan los metadatos de las redes sismológicas que operan en la mayoría de los países de la región de Latinoamérica y del Caribe, desde el río Bravo en el norte de México hasta la punta más meridional de la Patagonia argentina. La recopilación de estos metadatos fue posible gracias a los aportes, valiosísimos y desinteresados, de muchos colegas que trabajan en dichas redes, a quienes los autores del presente trabajo expresan el mayor de los agradecimientos.

Palabras clave: Señal sísmica; Registro sísmico; Sismómetro; Red sismológica; Metadatos; Latinoamérica y Caribe.

Abstract

In this paper, we made a brief description of the development of the instruments for the detection and recording of seismic signals considering some technical and historical aspects. We described the first seismoscopes, which evolved into seismometers and culminated with the seismographs designed for the detection and recording of seismic signals analyzing how the mechanical seismograph evolved into the electrodynamic to arrive at modern seismographs with digital registration. Finally, we explained the need to include the descriptive metadata of the seismological networks along with the data recorded by their stations. We present the metadata of the seismological networks operating in most of the Latin American and Caribbean countries from the Río Grande in northern México to the southernmost tip of Argentine's Patagonia. The compilation of the metadata was possible thanks to the valuable and selfless contributions of many of the colleagues working in these networks for which we express our gratitude.

Keywords: Seismic signal; Seismic record; Seismometer; Seismological network; Metadata; Latin America and the Caribbean.

Introducción

Cerca de Schiltach, en el estado de Baden – Württemberg, una pequeña ciudad de la Selva Negra al suroeste de Alemania, hay una antigua mina de extracción de plata donde, a 150 metros bajo tierra, se encuentran instalados algunos de los sismógrafos más sensibles de

Citación: Wielandt E, Caneva A, Vargas CA. Desarrollo de los instrumentos de detección y de registro de señales sísmicas. Metadatos de las redes sismológicas de la región de Latinoamérica y el Caribe. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 45(174):313-332, enero-marzo de 2021. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1166>

Editor: Ligia Stella Urrego

***Correspondencia:**

Alexander Caneva;
acanevar@unal.edu.co

Recibido: 11 de marzo de 2020

Aceptado: 23 de noviembre de 2020

Publicado: 29 de marzo de 2021



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Alemania. Si alguien piensa que puede tener acceso a estas maravillas mecánicas, que cuentan con docenas de palancas, engranajes, rodillos y resortes, se llevaría una decepción (**Wielandt, 1996**). En primer lugar, no están permitidas las visitas; de hecho, los miembros del personal científico-técnico ingresan a las instalaciones donde se encuentran los sismómetros solo si es absolutamente indispensable, situación que, afortunadamente, se presenta rara vez. En segundo lugar, incluso si se permitiera la visita a las instalaciones, no habría mucho que ver más que unas cuantas cajas de espuma de poliestireno recubiertas con un material aislante de color plateado brillante, que sirven para proteger los equipos de las fluctuaciones de la temperatura. Y en tercer lugar, si un sismógrafo estuviera exhibido, solo se vería un pequeño cilindro metálico ubicado sobre una pequeña base de hormigón, en cuyo interior, protegido por un recubrimiento de múltiples capas, se oculta el sensor como tal: un bloque de latón de unos cientos de gramos conocido como masa sísmica. Esta puede moverse libremente en una dirección determinada y, en principio, su única función es permanecer inmóvil (por inercia) cuando la Tierra se mueve a su alrededor. La posición de la masa sísmica se determina electrónicamente, por lo cual un sismógrafo moderno requiere de un alto nivel de ingeniería de precisión (**Wielandt, 2012; Wielandt, 1996**).

Por ello en este artículo se quiso ofrecer la posibilidad de acercarse a estos instrumentos que parecen inaccesibles. Pero antes de echar un vistazo más de cerca a algunos sismógrafos antiguos y modernos, debe comprenderse su funcionamiento básico y aclarar los requerimientos técnicos de los elementos claves de su diseño. Cabe aclarar que aquí nos referiremos, principalmente, a sismógrafos de alta sensibilidad utilizados en sismología y en el monitoreo de los ensayos de armas nucleares, pues existe un gran número de sensores sísmicos menos sofisticados diseñados para ciertas aplicaciones prácticas concretas, en cuya construcción son más relevantes otros factores.

Sismómetros y sismógrafos

Para empezar, debemos dedicarle unas cuantas palabras a los términos “sismómetro” y “sismógrafo”. Por una parte, tenemos el sensor, es decir, el dispositivo que convierte el movimiento del suelo en una señal eléctrica, al que se le llama sismómetro. En ocasiones es conveniente que el registro de la señal sea almacenado en un lugar diferente a aquél donde está instalado el sismómetro, con el fin de no perturbarlo. Hasta hace algún tiempo, el registro se hacía sobre papel, pero en la actualidad se realiza en medios digitales.

Por otra parte, el sismómetro y la unidad de registro conforman, en su conjunto, un sismógrafo. En el caso de los sismógrafos antiguos esta diferencia no era tan clara, ya que, a menudo, ambos dispositivos eran inseparables (**Wielandt, 2012**). Desde su invención, los sismógrafos se han considerado instrumentos de medición altamente sensibles. En cierto sentido, hoy puede decirse lo mismo casi de cualquier instrumento científico de medición. Sin embargo, la fascinación que causa un sismógrafo se debe a algo diferente, y es que este instrumento registra mucho más que una simple medida física abstracta, que para alguien que no sea especialista en el tema puede no representar por sí misma más que un simple suceso, aunque perceptible e inquietante, de sacudida del suelo, cuya solidez e inmutabilidad nos parecen incuestionables en todo momento.

En un emplazamiento tranquilo que no se vea afectado por ninguna actividad antrópica que pueda producir vibraciones u otros tipos de movimientos, por leves que sean, por ejemplo, una cueva o una mina, un sismógrafo registra no solamente sismos de regiones cercanas, sino temblores suficientemente fuertes que puedan afectar estructuras alrededor del mundo. Además, un sismógrafo responde a los movimientos del suelo causados por la acción de las olas del mar, la fuerza de las mareas causadas por la acción gravitacional del Sol y la Luna, las cuales deforman la tierra firme a un ritmo semidiurno, así como diferentes efectos antrópicos como las vibraciones de grandes máquinas, las demoliciones en minas y, en algunas ocasiones, las pruebas de armas nucleares (**Stein & Wyession, 2003**).

Para la sismología global resultan de sumo interés los movimientos del suelo caracterizados por frecuencias de oscilación que casi no son perceptibles para el oído humano, es decir, frecuencias por debajo del umbral de audición: 10 Hz hasta 0,3 mHz (alrededor

de una oscilación por hora). Las oscilaciones aún más lentas (de menor frecuencia) no están asociadas con los sismos, en tanto que las más rápidas (de mayor frecuencia) sí son provocadas por estos, pero se disipan antes de emerger a la superficie. En cercanías del epicentro, a distancias de algunas decenas de kilómetros, las vibraciones del suelo incluso pueden escucharse o propagarse en forma de ultrasonido. Los rangos superiores (de 30 a 50 Hz) de un registro sismográfico son, hoy en día, comunes. Por debajo del umbral de audición el espectro de las frecuencias de las señales sísmicas es considerablemente más amplio que el de nuestro oído: 15 octavas frente a 10 octavas (**Lay & Wallace, 1995**).

Desde el punto de vista técnico es claro cuán sensible puede ser un sismógrafo. El suelo casi nunca se encuentra totalmente quieto, presenta una débil pero permanente trepidación. Ni siquiera un buen sismógrafo es capaz de detectar aquellas señales que son más débiles que este ruido de fondo. Así que el reto técnico es significativo, ya que en la práctica todo es mucho más complejo que lo aquí expuesto, pues el ruido sísmico tiene diferentes intensidades según las diferentes frecuencias. Únicamente los componentes del ruido que tienen la misma frecuencia que la señal sísmica pueden interferir con ella, por lo que bastaría con que el sismógrafo registrara señales de todas las frecuencias de interés y coincidentes con el ruido sísmico con un nivel mínimo de precisión. Sin embargo, no existe aún un sismógrafo que cumpla a cabalidad con esta exigencia (**Wielandt, 2012**).

Básicamente, hay tres características que definen la sensibilidad de un sismógrafo: primero, debe ser capaz de medir pequeños desplazamientos de la masa sísmica, es decir, debe tener una resolución adecuada; segundo, debe permitir que a la llegada de una señal sísmica el desplazamiento de la masa sísmica sea considerable, pues en su posición de equilibrio solo debe estar ligeramente fija, en caso contrario, se moverá con el suelo y no habrá registro alguno; sin embargo, tampoco sirve que la masa sísmica esté totalmente suelta, pues se vuelve independiente, y tercero, la masa sísmica debe estar cuidadosamente protegida de perturbaciones externas, para lo cual se toman las precauciones mencionadas en la introducción.

Ruido sísmico

El ruido sísmico está compuesto por la superposición de muchas señales de origen natural o antrópico. Entre las señales naturales se destacan las generadas por los impactos de las olas del mar contra los continentes, señales que luego se propagan, ya no por el agua, sino por la parte sólida del planeta. Su periodo de oscilación típico es de unos seis segundos y pueden, según las condiciones meteorológicas, alcanzar amplitudes de hasta una centésima de milímetro. La microsismicidad generada por las olas del mar es tan fuerte y omnipresente que les sirve a los sismólogos como señal gratuita de prueba: un sismógrafo que no la registre seguramente está defectuoso (**Bormann, 2012**).

Para señales con periodos de vibración más cortos o mayores de 6 segundos, el ruido sísmico es mucho menor y, por lo tanto, no es tan fácil de registrar. Sin embargo, en muchos lugares el ruido sísmico también está relacionado con vibraciones de origen antrópico (industria, transporte, trabajos de construcción, etc.), y ya que para la instalación de los sismógrafos se eligen los lugares más tranquilos desde el punto de vista sísmico, siempre es necesario tener en cuenta los niveles mínimos de ruido sísmico presente.

Sorprendentemente, bajo las condiciones adecuadas el nivel de ruido sísmico es aproximadamente el mismo en todo el mundo (**Figura 1S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2973>). A una frecuencia de 30 Hz debe ser posible medir desplazamientos tan diminutos como una mil millonésima de milímetro, ¡aproximadamente una centésima parte del diámetro de un átomo! Así de sensible debe ser el instrumento de medición de desplazamientos en un sismómetro.

En el otro extremo del espectro sísmico, con periodos de oscilación de algunos cientos de segundos, el desplazamiento del suelo es de alrededor de una diezmilésima de milímetro. Este valor puede parecer relativamente alto, pero, en realidad, resulta aún más difícil

de medir, ya que una medición de este tipo se basa en las fuerzas de inercia que actúan sobre la masa sísmica, y para oscilaciones lentas estas fuerzas son del orden de unas pocas billonésimas del valor de la fuerza de la gravedad (**Bormann**, 2012).

Dos principios de medición

El dispositivo descrito es un sismógrafo inercial (**Wielandt**, 2012), para cuyo funcionamiento deben definirse los términos de inmovilidad y movimiento durante un sismo tomando como referencia únicamente el concepto de inercia de la masa sísmica.

Consideremos un vagón de tren en reposo que puede rodar libremente a lo largo de una vía horizontal. De repente, el suelo comienza a moverse en la dirección de la vía; el vagón no se verá afectado por el movimiento del suelo, permanecerá en reposo, pero sus ruedas girarán, por lo cual un observador ubicado en tierra creará que el vagón se está desplazando. Las mismas consideraciones son válidas en el caso de un sismómetro, es decir, medimos el movimiento de la masa sísmica con respecto al marco (la estructura rígida del instrumento, que está firmemente apoyada en el suelo), aunque sabemos que en realidad es el suelo el que debió haberse movido en la dirección opuesta.

Hay otra manera fundamentalmente diferente de observar las ondas sísmicas recurriendo a las deformaciones que producen. Una onda sísmica no sacude el suelo como un cuerpo rígido, sino que lo deforma. Ciertamente, cuando la onda se propaga, las regiones vecinas del suelo se mueven por lo general de forma similar pero no simultáneamente. Así, por ejemplo, la distancia de separación entre dos pernos anclados en una roca cambia y al medir de forma continua esta distancia es posible identificar la presencia de ondas sísmicas. Por esta razón, para identificar la fluencia de una muestra de material en ingeniería civil, se utilizan dispositivos llamados extensómetros, cuyo funcionamiento se basa en este principio (**Wielandt**, 2012), y en sismología se les llama sismógrafos de deformación. Solo en tareas de medición muy concretas estos instrumentos alcanzan una sensibilidad comparable a la de los sismógrafos inerciales que son los que en adelante analizaremos.

Marcas de tiempo

Uno de los aspectos más importantes en el análisis de un sismograma es la determinación de la hora exacta. Las lecturas que se hacen sin la ayuda de un computador, es decir, manualmente, son las de los tiempos de arribo y de las amplitudes máximas de los distintos tipos de ondas. Por ejemplo, es posible determinar la localización de un evento con base en los diferentes registros de tiempo de arribo de la señal en tres o cuatro estaciones (**Lowrie**, 2007) y, a partir de la amplitud máxima de la señal y de la distancia previamente determinada, es posible calcular la magnitud local, conocida en sismología como magnitud en la escala de Richter.

Hasta hace algún tiempo, para facilitar la lectura precisa de la hora en los registros en papel al finalizar cada minuto se producía un corto movimiento de una aguja que dejaba una marca, y los segundos y las décimas de segundo debían ser obtenidos por interpolación. Para coordinar esto antiguamente cada observatorio sismológico contaba con un reloj de péndulo cuya lectura se comparaba vía telefónica una vez al día con la hora oficial, o escuchando la señal oficial por radio. Por ejemplo, en el primer observatorio sismológico en Stuttgart-Hohenheim (Alemania), ya en 1912 se recibían las señales de la hora oficial de la Torre Eiffel o de la radio de Norddeich.

Posteriormente se instaló un reloj de péndulo Riefler (1938), que contaba, por una parte, con un péndulo hecho de invar, una aleación de níquel-hierro que es prácticamente insensible a las variaciones de temperatura (**Sears, et al.**, 2009), así como con un sistema de compensación del empuje por flotación ejercido por el aire. La precisión seguía siendo de una décima de segundo por día y la sincronización se llevaba a cabo mediante relojes de cuarzo. Actualmente, la hora exacta se determina en todo el mundo mediante una señal satelital, con una precisión de un microsegundo (**Fowler**, 2005).

Suspensión de la masa sísmica

Por lo general, la dirección de movimiento de la masa sísmica, como en el ejemplo del vagón de tren, es rectilínea. Hacer coincidir el movimiento de la masa sísmica con una línea recta en ausencia de fricción es relativamente difícil; es más fácil dirigir la masa a lo largo de un arco de circunferencia cuyo centro de curvatura está localizado en un eje al que está unida la masa mediante dos elementos lineales que se cruzan (**Figura 2S**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2974>). Sin embargo, existen sismómetros en los cuales la masa puede moverse en todas las direcciones (**Stein & Wysession, 2003**).

En la dirección de la medición la masa debe tener la posibilidad de moverse fácilmente, de tal manera que, bajo condiciones ideales, sin fuerza restauradora mecánica presente, se alcancen desplazamientos suficientemente grandes. Por otra parte, esta fuerza restauradora no puede reducirse arbitrariamente, pues debe compensar cada perturbación sísmica, en caso contrario la masa sísmica excedería el límite de desplazamiento del instrumento. Asimismo, la magnitud de la fuerza restauradora debe conocerse con precisión y debe ser invariable en el tiempo, de lo contrario se tendrá un detector, pero no un instrumento de medición.

Esta es una dificultad seria: cuanto menor es la fuerza restauradora, lo que hace que el sismógrafo sea más sensible, menos controladas son sus propiedades de transferencia. Los sismógrafos modernos resuelven este problema generando la fuerza restauradora electrónicamente en lugar de hacerlo mecánicamente. Abordaremos este aspecto más adelante.

En el caso de los sismómetros horizontales es relativamente fácil mantener una fuerza restauradora mecánica pequeña. Basta con fijar la masa excéntricamente a un eje de rotación casi vertical de tal manera que se mueva en un plano horizontal (**Figura 2Sa**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2974>).

En el caso de los sismómetros verticales es necesario hacer algo adicional, ya que se debe compensar el efecto de la gravedad. Una de las soluciones más elegantes fue hallada por el físico estadounidense Lucien LaCoste en 1934: un péndulo de resorte con la masa sostenida por un resorte pretensado con una, así llamada, longitud-cero en reposo tal que la masa, teóricamente, se encuentra en su posición de equilibrio en cada posición (**Figura 2Sb**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2974>). El funcionamiento de muchos sismómetros y gravímetros (instrumentos de medición de la gravedad) se basa en este principio. Por cierto, las puertas abatibles superiores de un garaje o un mueble tienen un mecanismo de funcionamiento similar: en cada posición es el resorte el que soporta la mayor parte del peso.

En los sismógrafos modernos a menudo se utiliza un sistema de suspensión más sencillo (**Figura 2Sc**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2974>), con un resorte plano que se comporta de manera similar al diseño de LaCoste en un rango angular limitado (**Wielandt, 2012**).

Por otra parte, dependiendo de la magnitud de la fuerza restauradora y, por lo tanto, del periodo de oscilación de la masa, es posible distinguir entre sismómetros de periodo corto y de periodo largo. Los mayores valores del periodo de oscilación producidos de manera netamente mecánica se encontraban en torno al medio minuto: ¡un péndulo simple con este periodo debería tener una longitud de 225 metros! (**Sears, et al., 2009**). En el caso de una fuerza restauradora con control electrónico hoy es posible alcanzar periodos de oscilación de hasta seis minutos: ¡lo que corresponde a un péndulo simple de 32 km de longitud! Sin embargo, la sensibilidad aún depende de la suspensión mecánica, lo que quiere decir que la construcción de un sismómetro sensible sigue siendo principalmente un problema de mecánica fina.

El medidor de desplazamiento

Medir los desplazamientos de la masa sísmica en centésimas del diámetro atómico parece algo sacado de la ciencia ficción, sobre todo si nos fijamos en la rugosidad de su superficie manifiesta en esta escala. Pero no hay ninguna ley de la naturaleza que impida medir

pequeños desplazamientos de un cuerpo lo suficientemente masivo. Por ejemplo, mediante el uso de interferómetros láser es posible realizar mediciones con una precisión superior en varios órdenes de magnitud a lo aquí expuesto. Sin embargo, esta opción no se utiliza en el caso de los sismómetros, pues es técnicamente muy exigente y costosa.

La manera más práctica de determinar el movimiento de la masa sísmica es mediante un transductor electrodinámico, tal como se aplica en el caso de los micrófonos y los altavoces. Esto consiste en fijar a la masa sísmica una bobina de alambre de cobre, la cual se sitúa entre los polos de un imán fijo; con frecuencia, la masa de la bobina juega el papel de masa sísmica. Luego, debido al movimiento de la bobina en el campo magnético del imán, en el cable (alambre de cobre) se induce un voltaje (Sears, *et al.*, 2009) que, a continuación, puede amplificarse electrónicamente y luego registrarse. Con base en este principio hoy solo funcionan los sismómetros de periodo corto (frecuencias a partir de 1 Hz) y los llamados geófonos, los cuales se utilizan en trabajos de exploración sísmica (Telford, *et al.*, 1991).

En el caso de los sismómetros de periodo largo, la señal de salida del transductor electrodinámico es tan débil que no se alcanza el nivel de sensibilidad requerido. Así que, para medir los movimientos lentos del suelo, es mejor usar un sensor de desplazamiento en lugar de uno de velocidad (Wielandt, 2012).

Entre los diferentes métodos la medición de la distancia diferencial capacitiva ha resultado ser la más eficaz. En principio, aquí se compara mediante una medición eléctrica el tamaño de los dos espacios de aire entre tres pequeñas placas de metal, de las cuales la de la mitad es móvil (Sears, *et al.*, 2009). Puede registrarse un desplazamiento de la placa central del orden de una milmillonésima parte de la distancia de separación entre las placas externas, es decir, ¡aproximadamente el grosor de un cabello comparado con el ancho del Canal de la Mancha! Por otra parte, en emplazamientos tranquilos una separación de unas pocas décimas de milímetro entre las placas resulta ser suficiente para identificar el ruido sísmico de periodo corto.

Perturbaciones externas

La temperatura, la presión atmosférica, los campos magnéticos, el movimiento del aire dentro de la carcasa del instrumento, cualquier tipo de radiación, etc., pueden ejercer influencia sobre la masa sísmica y su sistema de suspensión y llegar a perturbarlos. A continuación, presentamos algunos ejemplos cuantitativos de dichas perturbaciones.

La fuerza ejercida por un resorte estándar varía un 0,03 % por cada grado de variación de la temperatura. En los resortes fabricados con ciertas aleaciones especiales esta fuerza permanece invariable hasta un 0,001 %. Sin embargo, para su adecuado funcionamiento un sismómetro vertical sensible la fuerza ejercida por el resorte no debe variar en más de un 0,000 000 001 % por cada grado de variación de la temperatura, es decir, debe ser seis órdenes de magnitud menor en comparación con las variaciones que experimentan los resortes fabricados con aleaciones especiales (Wielandt, 2012).

En cuanto a la temperatura, resultaría inútil tratar de mantenerla invariable en un rango de una millonésima de grado, pero aquí solo estamos considerando cambios periódicos que pueden mantenerse pequeños mediante el uso de aislamiento.

Por otra parte, la presión atmosférica varía permanentemente (varios pascales en cuestión de minutos), lo cual cambia las características de flotación de la masa sísmica en un 0,000 001 % de su peso, es decir, tres órdenes de magnitud más para un sismómetro vertical sensible. Una carcasa resistente a la presión, que preferentemente se encuentre al vacío, puede ayudar, pero si no está bien diseñada, se deformaría como reacción a los cambios de presión atmosférica, lo cual genera aún mayores perturbaciones que las producidas por las variaciones de las características de flotación.

Por último, mencionaremos un tipo de perturbación que, aunque muy pequeña, es inevitable: el efecto del movimiento térmico browniano sobre la masa sísmica. Esta perturbación es producto, principalmente, de la colisión de partículas de aire contra la masa

sísmica. En condiciones de equilibrio térmico y en ausencia de todo tipo de señal sísmica, la masa sísmica tiene en promedio la misma energía cinética que una molécula de aire, es decir, $E = 1/2 kT$ en cada dirección, donde k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta (Sears, *et al.*, 2012). En el caso de masas sísmicas grandes su amplitud de movimiento es imperceptiblemente pequeña, pero cuando se trata de masas del orden de 100 g la amplitud resulta medible. Así pues, cuando un sismómetro de masa sísmica pequeña alcanza el nivel de máxima sensibilidad se hace necesario generar vacío, con el fin de evitar el efecto del movimiento browniano (Wielandt, 2012).

Técnicas de registro

En tiempos en los que las señales sísmicas eran registradas sobre papel, a primera vista la técnica de registro podía parecer un asunto menor. Sin embargo, desde mediados del siglo XIX, cuando comienza el desarrollo de los sismógrafos modernos, el proceso de registro de las señales sísmicas ha sido un problema técnico que ha obstaculizado los avances y ha conducido a soluciones incómodas. En la práctica, resulta que las señales sísmicas tienen el aspecto que la Tierra como planeta les imprime, por lo que simplemente no son adecuadas para el registro sobre papel.

Como ya hemos mencionado, las señales sísmicas con frecuencias en diferentes intervalos del espectro de frecuencias pueden manifestarse con muy diferentes intensidades (por ejemplo, el nivel de afectación de diferentes estructuras). Así, las señales correspondientes a la microsismicidad generada por las olas del mar puede ser mil veces más intensa que la señal del terremoto que se desea evaluar. En principio esta situación no es un obstáculo cuando las señales son lo suficientemente diferentes en sus contenidos frecuenciales, en cuyo caso pueden ser separadas mediante el uso de filtros de frecuencia. Sin embargo, una vez las señales quedan registradas en forma impresa es demasiado tarde, ya que el ojo humano no es capaz de distinguir diferentes aportes frecuenciales de manera adecuada. Para los sismógrafos clásicos, que cuentan con un registro impreso directo, esto significó un problema casi sin solución.

Para obtener registros razonablemente legibles era necesario procesar la información en rangos de frecuencias y de amplitudes muy limitados. La evolución temporal del movimiento del suelo, necesaria para conocer el proceso de fracturamiento en el foco del sismo, podía ser reconstruida a partir de sismogramas, pero de una forma tediosa e imprecisa. Con el fin de reducir la imprecisión, se incrementaba la sensibilidad de la mayoría de los sismógrafos, por lo que en los terremotos fuertes, los sensores de las estaciones cercanas a sus epicentros quedaban saturados, así que había muy pocas estaciones capaces de registrar adecuadamente eventos fuertes, pues no estaban calibradas a niveles de sensibilidad suficientemente altos para evitar el problema de la saturación (Fowler, 2005). Una de las excepciones a este problema fue la estación del servicio sismológico de Württemberg, donde se requería mucha perseverancia para operar un sismógrafo con amplificación baja durante largo tiempo, por lo que en sus registros, tal vez, se pudiera identificar algo en diez o 20 años.

Durante mucho tiempo el registro en cinta magnética introducido en los años 60 del siglo XX (ya sea en forma análoga o digital), no superó en calidad el registro en papel. En 1976 se produjo un gran avance en Alemania con la construcción del Observatorio Sismológico Central en Erlangen, en el cual se implementó la más avanzada tecnología digital de la época (Trnkoczy, *et al.*, 2012). Gracias a este avance por primera vez fue posible registrar señales sísmicas en un rango frecuencial relativamente amplio de manera simultánea para ser separadas posteriormente de manera exitosa.

En esa época, la recién surgida técnica digital aún debía demostrar que podía aportar resultados igual de satisfactorios a los mejores registros sismográficos en papel. En la práctica, hoy los registros en papel no se utilizan para realizar lecturas, sin embargo, eventualmente pueden servir para detectar fallas de funcionamiento, además de tener valor histórico.

Finalmente, el problema del registro sísmico fue resuelto satisfactoriamente cuando se desarrolló el conversor análogo-digital (A/D) con resolución de 24 bits, con el cual quedaron cubiertas las necesidades específicas de la sismología (Asch, 2012). Gracias a estos conversores es posible extraer señales ocultas por otras un millón de veces más fuertes, pero de frecuencias diferentes. Así que ahora no es necesario aplicar el filtrado previo ni el ajuste automático de amplificación para poder registrar sin problema las señales sísmicas.

Por su parte, un sismógrafo de banda ancha es capaz de registrar casi todas las señales sísmicas, incluso vibraciones fuertes, en tanto que los sismógrafos especiales se requieren únicamente para registrar las señales correspondientes a eventos destructivos. Así pues, de la mezcla de señales se extraen las porciones de información que son de interés y se presentan gráficamente a una escala razonable. Es como si un sismólogo pudiera escoger *a posteriori* y a su gusto la forma de ajustar el sismógrafo antes de cada terremoto. De esta manera, en la actualidad el registro de sismos no solo es más sencillo y más preciso, sino también mucho más económico.

Historia

La invención del primer instrumento conocido para la detección de terremotos se le atribuye al sabio chino Zhang Heng, en el año 132 de nuestra era. Consistía en un gran jarrón con ocho cabezas de dragón ubicadas a los lados, cada una de las cuales sostenía una esfera de bronce (Figura 1). En caso de producirse un terremoto, alguna de las esferas sostenidas por los ocho dragones caía e indicaba la dirección de la cual provenía el impulso (China Science and Technology Museum - CSTM, 2019; China Central Television - CCTV-9, 2019).



Figura 1. Indicador de terremotos (sismoscopio), invento del sabio chino Zhang Heng, 132 a.C. Adaptado de CSTM (2019) y CCTV-9 (2019)

En Europa los indicadores de terremotos denominados sismoscopios (instrumentos que indican la aparición de un evento sísmico sin cuantificarlo) entraron en uso desde comienzos del siglo XVIII, sin embargo, contribuyeron poco al entendimiento de los sismos. En aquel entonces se suponía que las causas de los sismos eran explosiones subterráneas, con lo cual el movimiento del suelo sería intermitente y se propagaría alejándose del foco del sismo. En definitiva, las indicaciones de los pocos y muy diversos sismoscopios nunca aportaron una imagen clara acerca del fenómeno. Solo a partir de la década de 1880 los primeros sismogramas evidenciaron que el movimiento del suelo tiene una estructura y una secuencia muy complicadas: en ocasiones la dirección de movimiento cambia y el máximo desplazamiento del suelo puede ser transversal a la dirección de propagación.

A partir de 1856 los sismógrafos más utilizados fueron los electromagnéticos, desarrollados por el sismólogo y vulcanólogo italiano Luigi Palmieri. Estaban integrados por varios péndulos metálicos que cerraban un circuito eléctrico a la menor vibración; mediante un mecanismo de electroimanes se detenía un reloj que indicaba la hora del terremoto y comenzaba a funcionar una especie de registrador Morse que marcaba los subsiguientes cierres de contacto. Al parecer estos dispositivos eran muy sensibles y continuaron siendo utilizados incluso después del cambio de siglo, hasta que se inició el registro de los datos con los sismógrafos modernos.

Se puede afirmar que el físico italiano Filippo Cecchi fue el inventor del sismógrafo en el sentido moderno del término, es decir, un dispositivo que registra con precisión la evolución temporal del movimiento del suelo (Dewey & Byerly, 1969). El dispositivo de Cecchi fue presentado en 1875, pero su sensibilidad era tan baja que pasaron 12 años para que registrara su primer sismo. Es por ello que el honor de haber obtenido el primer sismograma le correspondió a un grupo de científicos ingleses dirigido por John Milne, en 1880, durante una visita a Japón (Reitherman, 2012). Dado que la sensibilidad del sismógrafo estaba limitada por la fricción mecánica, solo se podían registrar los sismos cuyos epicentros eran cercanos a la estación. El registro se realizaba sobre discos giratorios de vidrio ennegrecido y, más tarde, sobre papel ahumado y mediante fotografías.

El primer registro de un evento lejano fue una feliz coincidencia. Ernst von Rebeur-Paschwitz, astrónomo alemán, había instalado en 1889 sismógrafos con péndulo horizontal y registro fotográfico sobre bases para telescopios en Potsdam y Wilhelmshaven para monitorear la inclinación de dichas bases. Una perturbación ocurrida simultáneamente en las dos estaciones condujo a una explicación sorprendente cuando el astrónomo leyó en la revista *Nature* un informe acerca de un gran terremoto ocurrido en Japón. Este descubrimiento es considerado ahora como el nacimiento de la sismología global. En la **figura 2** se muestra este sismograma, considerado el más famoso del mundo.

En los siguientes 20 años la sismología tuvo un desarrollo espectacular, tanto en la comprensión teórica como en las características instrumentales. Alrededor de 1910 se desarrollaron prácticamente todos los sismógrafos que, luego de mejoras graduales, llegarían a prestar sus servicios hasta bien entrada la segunda mitad del siglo XX, cuando la electrónica de semiconductores impulsó una nueva fase en el desarrollo de la instrumentación.

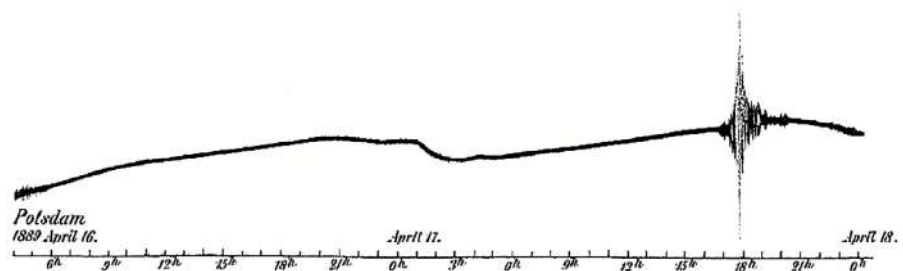


Figura 2. Primer sismograma conocido correspondiente a un terremoto lejano registrado en 1889 en Potsdam. En el desplazamiento máximo la luz de la lámpara era demasiado débil para dejar huella sobre el papel fotográfico. Adaptado de Schweitzer & Lee (2003)

El sismógrafo mecánico

El sismógrafo horizontal de Bosch-Omori, uno de primeros sismógrafos mecánicos, fue instalado en 1905 en la estación sismológica de Stuttgart-Hohenheim. Este sismógrafo fue desarrollado por el sismólogo japonés Fusakichi Omori, perfeccionado por los ingenieros Joseph y Albert Bosch de Estrasburgo y construido en Stuttgart en la empresa Tesdorpf (**Bosch & Bosch**, 1907). Contaba con una masa sísmica de 50 kg en forma de cilindro delgado vertical, al cual se agregaban posteriormente masas adicionales. El movimiento del suelo era amplificado de 30 a 50 veces sin necesidad de multiplicadores de transferencia gracias a la longitud del mango en el cual se encontraba la aguja. El sistema de registro consistía de un tambor giratorio impulsado por un mecanismo de reloj sobre el cual se extendía un papel ahumado. Además, el dispositivo contaba con un pistón para amortiguar las oscilaciones naturales del péndulo.

De la misma época (1902) es el péndulo vertical de Adolfo Cancani (bien conservado) instalado en el Observatorio Vesubiano, que cuenta con un mecanismo de palancas que amplifica el movimiento de la masa sísmica a la aguja y un amortiguador hidráulico. Al igual que el sismógrafo Bosch-Omori, el registro se realizaba sobre papel ahumado.

El mayor problema de todos los sismógrafos mecánicos siempre fue la fricción de la aguja al escribir sobre el papel. Para superar este inconveniente era necesario usar masas cada vez más grandes con una amplificación cada vez mayor. El sucesor del sismógrafo de Bosch-Omori fue el péndulo cónico instalado por Carl Mainka en 1913, con una amplificación de 200 veces y un peso de 450 kg, en tanto que su sucesor, del tipo Wiechert, 1937, pesaba 17 toneladas y tenía una amplificación de 1.200 veces. Esta línea no continuó su desarrollo (**Reitherman**, 2012).

Ahora bien, en el caso de los sismógrafos verticales, para los cuales la masa sísmica debía ser colgada de un resorte, era necesario luchar contra la sensibilidad del acero del resorte a las variaciones de temperatura, pues hasta los más mínimos incrementos de temperatura hacían que la fuerza recuperadora del resorte se redujera, la masa sísmica descendiera, la aguja se desplazara con respecto a su posición central y las marcas de registro se mezclaran. Sería Emil Wiechert, sismólogo de la ciudad de Gotinga, quien construyera alrededor de 1910 el primer sismógrafo vertical razonablemente estable ante las variaciones de temperatura. En este sismógrafo el resorte se apoya sobre barras de zinc cuya expansión térmica permite al resorte volver a tensarse. Este tipo de sismógrafo llegó a ser estándar en todo el mundo.

En la **figura 3** se muestra un sismógrafo de periodo corto de tres componentes de Emil Wiechert y Ludger Mintrop (pionero en la exploración sísmica de yacimientos minerales), el cual podía amplificar el movimiento del suelo hasta aproximadamente 16.000 veces

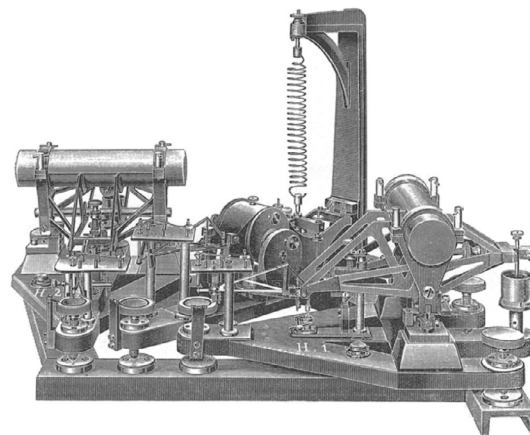


Figura 3. Tres sismómetros de periodo corto de E. Wiechert y L. Mintrop sobre una base común. Adaptado de **Schweitzer & Lee** (2003)

gracias al mecanismo de transferencia por palanca y al puntero de luz (**Schweitzer & Lee, 2003; Reitherman, 2012; Ramírez, et al., 2004; Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, España, 2004**).

Pero probablemente el sismógrafo mecánico más sofisticado y robusto que se haya construido jamás es el sismógrafo universal de Alfred de Quervain y Auguste Piccard, instalado en 1922 en la estación sismológica de Zúrich, construida exclusivamente con esa finalidad (**Figura 4**). Este sismógrafo consistía en una masa sísmica de 21 toneladas que podía moverse en las tres dimensiones y que estaba suspendida de resortes helicoidales; sus desplazamientos se determinaban tomando como referencia su centro de gravedad y en cada dirección de movimiento (norte-sur, este-oeste y vertical) se amplificaban dos mil veces mediante un apalancamiento triple. La mecánica era tan precisa y sin desplazamiento aleatorio alguno, a tal punto que podía registrar movimientos del suelo del orden de una diezmilésima de milímetro.

Un aspecto novedoso y especialmente elegante de este sismógrafo fue la solución que se le dio al problema de la sensibilidad a la temperatura, el cual se solventó mediante un dispositivo de control automático. Dependiendo de la posición de la aguja que indicaba el movimiento vertical del suelo una vez por minuto, una pequeña cantidad de agua se vertía cuidadosamente en un contenedor ubicado en la masa sísmica o se extraía de él mediante un control eléctrico; tal cantidad era necesaria para compensar la variación de la fuerza recuperadora del resorte según fuera verano o invierno, y en total se podían verter más de 80 kg de agua. Todos los sismógrafos modernos cuentan con un control de posición similar, pero, por supuesto, ya no con agua, sino con un sistema electrónico.

Resulta interesante mencionar un detalle acerca del origen del material con el que estaba fabricada la masa sísmica. Consistía en unos 800 bloques de acero adquiridos originalmente por el ejército suizo para la fabricación de granadas. Dicho material fue entregado a los científicos en calidad de préstamo con la condición de que fuese devuelto, en caso de guerra, en el término de 48 horas. En 1922 esta fue una precaución extraordinaria. Quervain y Piccard optaron por dejar una inscripción en latín: *Et conflabunt gladios in vómeres* (“Y que se forjen las espadas en rejas de arado”), y con ello destinaron a la ciencia el acero, que nunca fue reclamado de vuelta.



Figura 4. El gran sismógrafo universal de Zúrich. Adaptado de **SED (2019)** y **SCHEMA-TEC (2019)**

El sismógrafo electrodinámico

Uno de los sismólogos más prominentes del siglo XX fue el príncipe ruso Boris Galitzin, cuyo extraordinario trabajo “Lecciones sobre sismometría” fue publicado en 1912 en ruso y en alemán. A Galitzin le debemos el invento del sismógrafo electrodinámico en 1904 (Figura 5).

En un principio, este tipo de sismógrafo no podía competir con los sismógrafos mecánicos, pero después de algunas mejoras llegó a ser el tipo de sismógrafo predominante, conservando este estatus hasta alrededor de 1970 (Ponomarev & Sidorin, 2012; Kondorskaya, 2003).

En el sismógrafo de Galitzin la masa sísmica está conectada a un transductor electrodinámico; cuando ocurre un movimiento el transductor genera una señal eléctrica y esta es registrada mediante un galvanómetro que tiene un espejo incorporado. De esta manera se eliminó la fricción de la aguja contra el papel, que era el mayor problema de los sismógrafos mecánicos. Además, el transductor es sensible solo al movimiento de la masa, no a su posición, por lo tanto, la temperatura juega un papel mucho menor que en los sismógrafos mecánicos. Sin embargo, debido a la geometría del resorte, la sensibilidad en la medición aún dependía de la ubicación de la masa y, por lo tanto, de la temperatura. Este problema solo fue resuelto en 1930 gracias a la invención de LaCoste y al desarrollo de aleaciones menos sensibles a la temperatura.

Por otra parte, aunque la señal eléctrica de salida del sismómetro en la época de Galitzin no podía ser amplificada electrónicamente, el principio electrodinámico de medición permitió por primera vez lograr una gran amplificación con una masa sísmica relativamente pequeña (10-20 kg). Con el tiempo fue posible conectar otros dispositivos de registro en lugar de los galvanómetros con puntero de luz, lo que permitió que los sismómetros electrodinámicos fueran aún más pequeños (Ponomarev & Sidorin, 2012; Kondorskaya, 2003). Cabe aclarar que los galvanómetros son, en un sentido estrictamente físico, aparatos de medición casi ideales para señales eléctricas débiles (cuentan con respuesta lineal y carecen de ruido), por lo que no fueron superados por los amplificadores electrónicos durante mucho tiempo debido al ruido y la distorsión no lineal que estos provocaban.

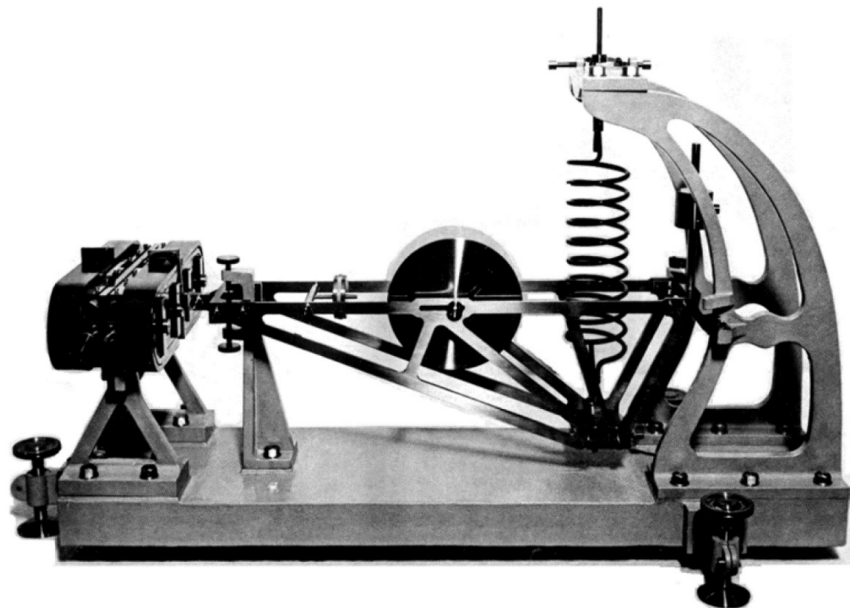


Figura 5. Sismómetro electrodinámico de Galitzin (1904), un diseño genial para su época. Algunos de los que se encuentran en funcionamiento hoy en día están basados en ese modelo. A la izquierda se observan los imanes del transductor electrodinámico. Adaptado de Schweitzer & Lee (2003)

Sismógrafos modernos

La función principal de un sismómetro, como hemos descrito hasta ahora, se reduce a dos pasos: primero, convertir el movimiento del suelo en un movimiento relativo entre la masa sísmica y el marco del sismógrafo, y, segundo, realizar la medición como tal. Una buena descripción del movimiento del suelo se logra solo si ambos pasos se llevan a cabo con calidad. Esto implica una dificultad importante, ya que es extremadamente difícil hacer que la fuerza restauradora sea muy pequeña y, simultáneamente, lo suficientemente estable.

El hecho de que este problema se solucione mediante la introducción de una fuerza restauradora grande producida electromagnéticamente sorprende al principio. La idea básica consiste en que, en lugar del desplazamiento, lo que se mide es la fuerza de inercia que actúa sobre la masa sísmica y que surge cuando la masa se desplaza con respecto al marco debido al movimiento del suelo. No es posible medir la fuerza sin permitir también un desplazamiento, pero este desplazamiento puede mantenerse, en principio, arbitrariamente pequeño.

Consideremos un experimento mental con el gran sismógrafo de Zúrich. Imaginemos que podemos configurar el control automático de la posición de la aguja para controlar, no una vez por minuto (como en la versión original del gran sismógrafo) sino continuamente la posición de la aguja y traer de vuelta la masa sísmica a su posición de equilibrio mediante la adición de cierta cantidad de agua. Con estas condiciones, la aguja ya no oscilaría significativamente y la masa prácticamente se movería junto con el suelo. Para ello, este esquema debe proporcionar una fuerza impulsora que corresponda exactamente a la aceleración del suelo, por lo tanto, la cantidad de agua (el peso del agua) en el depósito debe corresponder en todo momento a la aceleración del suelo. Además, para observar la señal sísmica tendríamos que hacer un seguimiento del nivel del agua en el depósito y registrarlo, en lugar de registrar el movimiento de la aguja.

Vamos a considerar ahora las siguientes propiedades de un sismógrafo modificado de esta forma, el cual es, en algunos aspectos, notablemente mejor.

1. Teóricamente puede medir todo tipo de señal, sin importar qué tan fuerte sea, con la condición de que haya suficiente agua, pues ya no está limitado por el rango de movimiento mecánico de la aguja, que ahora solo se desplaza lo necesario para activar el mecanismo de regulación.
2. Ya no es cuestión de qué tan complejo es el diseño mecánico, pues la cantidad de agua en el depósito de nivelación siempre corresponde a la aceleración instantánea del suelo. Debido a esto, es prácticamente irrelevante para el resultado de la medición si la transferencia por apalancamiento se amplifica de 1.000 a 2.000 veces o, incluso, si la amplificación no es constante.
3. A pesar de que el rango de medición es mayor que antes, la sensibilidad de detección de pequeños movimientos del suelo se mantiene. Un movimiento del suelo que antes provocaba una desviación mensurable de la aguja ahora está relacionado con la variación en la cantidad de agua, por lo tanto, cualquier señal que quedara registrada en el papel ahora podría ser identificada midiendo el nivel del agua. Y dado que el nivel es controlado eléctricamente, podríamos simplemente registrar la señal de control en lugar de medir el nivel del agua. ¡Incluso teóricamente sería posible contar las gotas de agua y obtener un sismógrafo con una señal de salida digital!

Es claro que en este experimento mental hemos dejado de lado algunas dificultades técnicas, ya que es mucho más fácil controlar un sistema eléctrico que construir uno hidráulico. Aquí reducimos la masa sísmica a decenas o cientos de gramos, y sustituimos la aguja y el sistema de transferencia por apalancamiento por un medidor de velocidad electrónico sin contacto, así como el tanque de agua por un transductor electrodinámico, con el que también es posible convertir una corriente eléctrica en una fuerza (como en los altavoces). El circuito de control, entonces, establece una corriente en la bobina que sea proporcional a la aceleración de todo el dispositivo. Estos sistemas (con una masa

sísmica de unos pocos gramos) se llaman acelerómetros, y se utilizan, por ejemplo, para la navegación inercial o como medidores de vibraciones de origen industrial (Telford, *et al.*, 1991).

La sensibilidad de los acelerómetros es baja, por lo tanto, son menos adecuados para el registro de señales sísmicas débiles. Sería necesario aumentar su sensibilidad al menos en cinco órdenes de magnitud, pero, en ese caso, el sensor se saturaría fácilmente por sismos o vibraciones de gran amplitud, como las de origen industrial, por ejemplo. Sin embargo, la solución está a la mano: en lugar de registrar directamente la corriente que controla el transductor de fuerza, dejamos que la corriente cargue un condensador. El voltaje entre las placas es proporcional a la velocidad de movimiento del suelo, pero, al ser relativamente menor a altas frecuencias, puede ser procesado con mucha mayor facilidad que la corriente. De esta manera, se obtiene un sismógrafo de banda ancha, que en cierto sentido es inmune a la sobrecarga, por lo cual, sería extraño que no pudiera “soportar” un terremoto, por fuerte que éste sea.

En la **figura 6** se muestra la parte mecánica interna del sismómetro vertical de banda ancha, desarrollado en 1976 por Erhard Wielandt (coautor del presente trabajo) y Gunar Streckeisen en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich). En comparación con un sismógrafo mecánico (por ejemplo, el que se muestra en la **figura 3**), este sistema pendular tiene un aspecto primitivo y, con excepción del material utilizado para la fabricación del resorte plano, hubiera sido posible construirlo en el siglo XIX. De hecho, actualmente se utiliza una mecánica menos rigurosa que antes, pero se observa una superioridad técnica del sistema de control electrónico. Sin embargo, el dispositivo resulta ser mucho más complejo si tomamos en cuenta la protección del sensor contra los cambios de temperatura y de presión atmosférica, así como frente a los campos magnéticos externos, por lo que puede registrar señales diez mil veces más débiles que el sismógrafo de Zúrich de 21 toneladas.

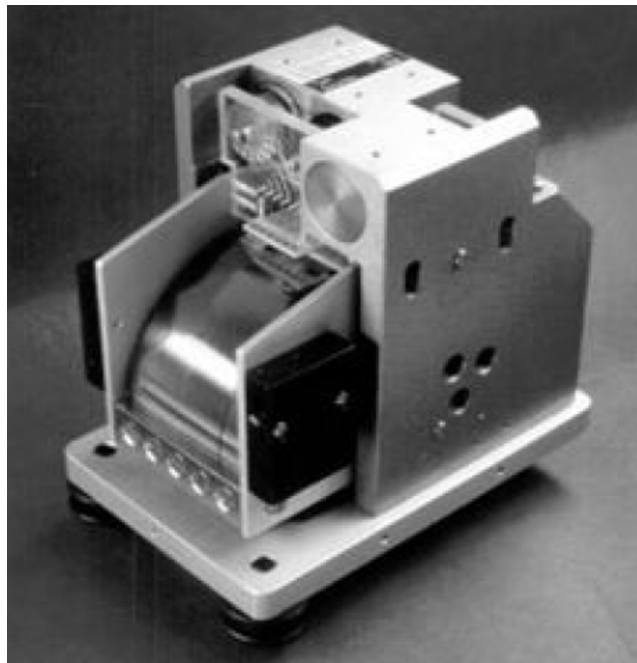


Figura 6. Sismómetro con resorte plano, versión más compacta del sistema con péndulo de resorte plano, cuyo esquema se muestra en la Figura 2Sc. Las dos piezas negras a la izquierda (por delante y por detrás) son las masas sísmicas entre las cuales se encuentra el resorte plano. En la parte superior se encuentran dos sistemas de bobinas para retroalimentación de la fuerza y el transductor. Adaptado de **Wielandt & Streckeisen** (1982)

Ejemplo de un sismograma

Es el momento de considerar con mayor detalle el sismograma, resultado final de todos nuestros esfuerzos al construir un sismómetro.

En la **figura 7** se muestra el sismograma de un terremoto que tuvo lugar en California (26/11/1976) y fue registrado en Zúrich con un prototipo de sismómetro con resorte plano. Se trata de un sismograma filtrado de periodo largo que solo contiene oscilaciones lentas de al menos 30 segundos de duración y, por lo tanto, es bastante claro.

La marca H en el centro de la **figura 7a** denota el tiempo de origen de las ondas sísmicas (momento del evento sísmico medido en el epicentro). El sismógrafo ubicado en Zúrich responde unos 13 minutos más tarde, con una pequeña alteración (P). Este es el tiempo que necesitan las ondas sísmicas más rápidas, es decir, las longitudinales, en su viaje a través del manto terrestre, en el que penetran hasta unos 2.500 km de profundidad. Un poco más tarde (PP) arriban las ondas que no han penetrado tan profundamente y que, a mitad de camino, han sido reflejadas de la superficie de la Tierra hacia abajo, para luego propagarse nuevamente hacia la superficie. Luego se observa algo de quietud hasta que arriban las ondas transversales S, cuya velocidad en el manto terrestre alcanza un valor cercano al 58 % del de las ondas P. Este tipo de ondas también cuenta con ondas rezagadas (SS) que se reflejan en la superficie terrestre.

Todos los tipos de ondas mencionados arriban al sismómetro desde “abajo”, no propagándose por la superficie de la Tierra, es decir que proceden del manto, por lo tanto, se les llama ondas de cuerpo, en este caso, el cuerpo del planeta

La siguiente parte del sismograma está dominada por las llamadas ondas de superficie, que se propagan de manera similar a las ondas en la superficie del agua, pero esta vez lo hacen sobre la superficie terrestre. Estas ondas reciben el nombre de ondas Rayleigh (R1) (parte izquierda de la **figura 7b**) en honor al físico británico Lord Rayleigh. Las ondas de superficie están visiblemente dispersas; las ondas de longitudes de onda más larga llegan antes que las de longitud de onda más corta.

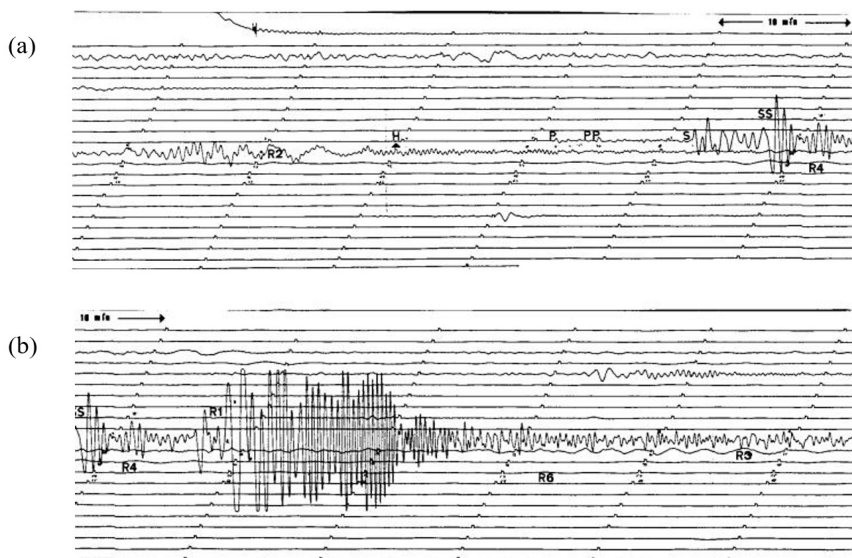


Figura 7. Sismograma registrado en Zúrich de un terremoto ocurrido en California (26/11/1976). H: tiempo de origen; P, PP, S y SS: arribo de las ondas de cuerpo (longitudinales y transversales, respectivamente); R1 a R6: arribo de las ondas de superficie. Intervalo entre las marcas de tiempo: 10 minutos. Los sismogramas (trazas) de la **figura (a)** y de la **(b)** conforman un único sismograma: las secciones con SS (derecha de la **figura (a)**) y R4 (izquierda de la **figura (b)**) deben superponerse para conformar un único sismograma (la **figura (b)** es continuación de la **figura (a)**). Las trazas son como líneas de impresión que se leen de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo

Las ondas Rayleigh son seguidas por la llamada coda (parte final o “cola” del sismograma), que consiste en ondas de superficie dispersas (mitad derecha de la **figura 7b**). Por supuesto que después de ser registradas por el sismógrafo, las ondas de superficie continúan su viaje alrededor de la Tierra: después de tres horas aparece nuevamente el tren de ondas R1, que ahora se llama R3 (derecha de la **Figura 7b**), esta vez fuertemente atenuado al llegar por segunda vez al sismógrafo después de dar la vuelta completa a la Tierra. En el registro original es posible identificar el siguiente paso de R1, ahora como R5, y en el medio se pueden ver los trenes de ondas R2 y R4, así como los indicios de R6, que han rodeado la Tierra propagándose en la dirección opuesta.

Pero todas estas ondas son solo una pequeña parte de las ondas generadas por un terremoto. Después de un terremoto fuerte la Tierra vibra durante más o menos una semana, tal como lo hace una campana al ser golpeada, hasta que las oscilaciones disminuyen por debajo del límite de detección.

El sismograma contiene una gran cantidad de información, tanto acerca de la región del epicentro, como de la estructura interna de la Tierra y únicamente una pequeña parte de esta información puede verse en esta reproducción tan “suavizada”. Sin embargo, es la parte que, en cierta medida, podemos entender con nuestro conocimiento actual acerca de la estructura de la Tierra.

Un sismograma como este, que muestra hasta la coda puede recalcularse utilizando un modelo computacional de la vibración de la Tierra. La similitud entre los sismogramas reales y los modelos computacionales es lo suficientemente buena como para garantizar que no estamos muy lejos del modelo “real” del planeta. Por otro lado, un sismograma obtenido mediante el uso de un sensor de periodo corto por lo general abarca solamente un intervalo corto de tiempo, durante el cual las ondas de cuerpo son visibles y cuantitativamente modeladas, en tanto que el resto de la información no es siquiera descifrable.

Metadatos

Los datos que arroja una red sismológica son los registros sísmicos, en tanto que los metadatos, entendidos como “datos acerca de otros datos”, incluyen la ubicación de las estaciones, los tipos de instrumentación, los métodos de transmisión de los datos registrados, la información acerca de los terremotos registrados, etc. En definitiva, los metadatos sirven para mejorar y respaldar los archivos de datos de las formas de onda, lo que permite hacer más fluido el intercambio abierto de información y de ideas entre redes sismológicas que operan en el área de estudio, así como con la comunidad sismológica global (**Incorporated Research Institutions for Seismology - IRIS**, 2019).

Como se destaca en la declaración de la Unión Geofísica Americana (AGU) sobre la importancia de la preservación a largo plazo y la accesibilidad de los datos geofísicos, la recopilación, el análisis y el almacenamiento de datos en el campo de las ciencias de la Tierra y el espacio son esenciales para nuestra comprensión del entorno natural y de cómo éste cambia con el tiempo (**American Geophysical Union - AGU**, 2009). Con esto en mente, la política de la AGU se basa en el principio del intercambio total y abierto de dichos datos y de los metadatos asociados para la investigación y la educación.

Dado que los conjuntos de datos se utilizan a menudo para fines distintos de aquellos para los que fueron recopilados, los metadatos precisos, completos y estandarizados (cuando ello es posible) son tan importantes como los datos mismos (**AGU**, 2009). Podemos afirmar, entonces, que los datos de las ciencias de la Tierra y el espacio son patrimonio mundial. Correctamente documentados y almacenados, estos datos ayudarán a los futuros científicos a comprender el sistema conformado por el interior de la Tierra, la atmósfera, los océanos, la biosfera y el entorno espacial. En consecuencia, cuidar adecuadamente de ellos es nuestra responsabilidad y nuestra obligación con las generaciones futuras (**AGU**, 2009).

En este sentido, ¿cómo están las cosas en el caso de la región de Latinoamérica y el Caribe? El territorio latinoamericano se encuentra ubicado en una zona de convergencia, donde las placas oceánicas Pacífica, Cocos, Nazca, Antártica y Caribe subducen bajo las

placas continentales de Mesoamérica y Suramérica, lo que genera una amplia zona de deformación en la que se emplaza un cinturón orogénico con permanente actividad volcánica y recurrente actividad sísmica de diversas magnitudes y profundidades. Específicamente debido a las variaciones en los ángulos de subducción de la placa Nazca bajo la placa Suramericana, se observa una alternancia en el vulcanismo y cambios en las profundidades hipocentrales a lo largo del borde occidental del continente americano (**Lowrie, 2007; Fowler, 2005; Lay & Wallace, 1995**).

En este laboratorio natural se encuentra el arquetipo de los nidos sísmicos más activos y, en algunos casos, más profundos del mundo, como, por ejemplo, el nido sismoactivo de Bucaramanga (Colombia), producto posiblemente de la convergencia entre las placas Suramericana, Nazca y Caribe. Asimismo, en el sur del continente también encontramos zonas de convergencia de tres placas, como es el caso de la subducción de las placas Nazca y Antártica bajo la Suramericana y la interacción entre las placas Antártica, Suramericana y Scotia. Lejos de la zona de subducción, la sismicidad prevalece debido a procesos de equilibrio isostático o procesos de origen antrópico, particularmente en áreas de márgenes pasivas (**Lowrie, 2007; Fowler, 2005; Lay & Wallace, 1995**).

Bajo este panorama de permanente actividad sismotectónica y volcánica, se hace necesario el despliegue de redes sismológicas permanentes y temporales (**Vargas, et al., 2018**). Desde inicios del siglo XX y hasta hoy, dichas redes han evolucionado tecnológicamente para garantizar cada vez mayor sensibilidad y cobertura para diversos propósitos.

En el **Anexo**, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2975> presentamos una descripción sucinta de las redes sismológicas instrumentales que realizan dichas actividades de monitoreo en la mayoría de los países de la región de Latinoamérica y del Caribe. La solicitud de compartir los metadatos de las redes fue enviada a todos los países de la región y de la mayoría se recibió la información solicitada. Las redes de algunos países no contestaron y es por ello que no figuran en esta publicación. La información se presenta en forma de fichas de metadatos y en orden estrictamente alfabético por países para garantizar comparaciones operativas y de tendencias tecnológicas. La información aquí presentada ha sido tomada textualmente del material enviado por los colegas de las diferentes redes, sin que los autores del presente trabajo editaran su contenido en forma alguna.

Información suplementaria

Figura 1S. Modelo de bajo ruido (*Low Noise Model*). Representación simplificada de las perturbaciones verticales mínimas asociadas con el ruido sísmico observado en función del periodo de oscilación. Esta gráfica muestra la aceleración efectiva del suelo en cada octava, expresada como una fracción de la aceleración gravitacional. Estas perturbaciones en forma de microsismicidad generada por las olas del mar alcanzan el valor máximo para un periodo de 6 s. Adaptado de **Wielandt (2012)**. Vea la figura 1S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2973>

Figura 2S. Representaciones esquemáticas de: (a) péndulo horizontal de tipo puerta del jardín; (b) péndulo vertical de periodo largo (diseño de LaCoste, 1934); (c) péndulo de resorte plano de periodo largo. Vea la figura 2S en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2974>

Anexo. Metadatos de las redes sismológicas de la región de Latinoamérica y el Caribe. Vea el anexo en <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/1166/2975>

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todas las personas que de manera desinteresada y como expresión de compañerismo contestaron positivamente al llamado de reunir información acerca de las redes de registro de datos sísmicos que operan en los países de Latinoamérica y el Caribe.

Confirmando en no dejar ningún nombre sin mencionar, a continuación relacionamos por países a quienes compartieron información de las redes donde trabajan.

- Argentina: Alejandro Giuliano e Irene Pérez (Instituto Nacional de Prevención Sísmica – INPRES); Silvana Spagnotto y Silvina Nacif (Instituto Geofísico Sismológico F. Volponi, Universidad Nacional de San Juan)
- Bolivia: Gonzalo Fernández (Observatorio San Calixto)
- Brasil: Marcelo Assumpção (Universidade de São Paulo)
- Chile: Sergio Barrientos y Héctor Massone (Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile)
- Colombia: Viviana Dionisio, Emmanuel Castillo y Lina Aguirre (Red Sismológica Nacional de Colombia, Servicio Geológico Colombiano); Elkin Salcedo y César Cardona (Red Sismológica del Suroccidente Colombiano, Universidad del Valle); Marisol Gómez (Observatorio Sismológico de la Universidad del Quindío); Juan Manuel Solano (Red Sismológica de la Sabana de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá)
- Costa Rica: Lepolt Linkimer, Ivonne Arroyo y Oscar Lücke (Universidad de Costa Rica); Marino Protti y Esteban Chaves (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica – OVSICORI)
- Cuba: O’Leary González (Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas – CENAI)
- El Salvador: Griselda Marroquín (Observatorio Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales)
- Guatemala: Robin Yani (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIMUVEH)
- Nicaragua: Wilfried Strauch (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales – INETER)
- Islas Caimán: Lee Madison (Department of Public Safety Communications)
- México: Xyoli Pérez Campos y Caridad Cárdenas (Servicio Sismológico Nacional, Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM)
- Panamá: Antonio Abrego (Autoridad del Canal de Panamá)
- Puerto Rico: Victor Huérfrano (Universidad de Puerto Rico Mayagüez)
- República Dominicana: Jottin M. Leonel (Centro Nacional de Sismología de la Universidad Autónoma de Santo Domingo)
- Uruguay: Leda Sánchez Bettucci (Universidad de la República)
- Venezuela: Alejandra Martínez y Michael Schmitz (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas – FUNVISIS)

Contribución de los autores

EW aportó la descripción general de los sistemas de detección y registro de ondas sísmicas. AC y CAV participaron en la adecuación del material correspondiente a los sistemas de detección y registro de ondas sísmicas. AC recopiló los metadatos de las redes sismológicas de la región de Latinoamérica y el Caribe. Todos los autores contribuyeron en la redacción del artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener ninguna relación comercial o financiera que pueda interpretarse como un posible conflicto de intereses.

Referencias

- American Geophysical Union - AGU.** (2009). EOS, Transactions, American Geophysical Union. **90** (35): 301. The Importance of Long-term Preservation and Accessibility of Geophysical Data. p. 301. Doi: [10.1029/eost2009EO35](https://doi.org/10.1029/eost2009EO35)

- Asch, G.** (2012). Seismic Recording Systems. En P. Bormann. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice*. Potsdam, Alemania: GFZ German Research Center for Geosciences. (NMSOP-2), Chapter 6, Potsdam, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI. Doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_CH6
- Bormann, P.** (2012). Seismic Signals and Noise. En P. Bormann. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice*. Potsdam, Alemania: GFZ German Research Center for Geosciences. (NMSOP-2), Chapter 2, Potsdam, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI. Doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_CH2
- Bosch, J. & Bosch, A.** (1907). Katalog Nr. 20. Seismographical and Meteorological Instruments. Strassburg. 42 pp.
- China Central Television - CCTV-9.** (2008). Han Dynasty Seismograph 132AD. Fecha de consulta: diciembre de 2019. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=GcVFuIccf5c&feature=youtu.be>
- China Science and Technology Museum - CSTM.** (2019). The Glory of China. Fecha de consulta: diciembre de 2019. Disponible en: <http://cstm.cdstm.cn/e/action/ListInfo/?classid=485>
- Dewey, J. & Byerly, P.** (1969). The early history of seismometry (to 1900). *Bulletin of the Seismological Society of America*. **59**: 183-227.
- Dirección General del Instituto Geográfico Nacional.** (2004). Catálogo inventario de sismógrafos antiguos españoles. Madrid, España: Centro Nacional de Información Geográfica.
- Fowler, C. M. R.** (2005). *The Solid Earth: An introduction to global geophysics*. 2nd edition. Cambridge University Press. 726 pp. ISBN: 978-0521893077.
- Incorporated Research Institutions for Seismology IRIS.** (2019). Metadata. Disponible en <https://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/data/types/metadata/> accedida en diciembre de 2019.
- Kondorskaya, N. V.** (2003). Development of ideas and scientific heritage of B.B. Golitsin in seismology: on the 140th birthday. Moscú, Rusia: Russian Academy of Sciences, Schmidt Joint Institute of the Physics of the Earth Physics named after O.Yu. Schmidt; Ed. V.I. Ulomov. Moscow: OIFZ RAS, 245 pp. ISBN 5-201-14911-1. (en ruso).
- Lay, T. & Wallace, T.** (1995). *Modern Global Seismology*. Cambridge, Estados Unidos: Academic Press, Inc., Cambridge, MA, 521 pp. ISBN: 978-0127328706.
- Lowrie, W.** (2007). *Fundamentals of Geophysics*. 2nd ed. x + 381 pp. Cambridge, New York, Melbourne Cambridge University Press. ISBN: 9780 521 85902 8; 9780 521 67596 3 (pb). R. W. England.
- Ponomarev, A. V. & Sidorin, A. Ya.** (2012). The founder of modern seismology Boris Borisovich Golitsyn (1862–1916): In commemoration of the 150th birth anniversary, *Vestn. Otd. Nauk Zemle*, **4**: 1-11. <https://onznnews.wdcb.ru/doi/2012NZ000114.html>, NZ6001. Doi: 10.2205/2012NZ000114. ВЕСТНИК ОНЗ РАН, ТОМ 4, NZ6001 (en ruso).
- Ramírez, J. E., Prieto Salazar, J. A., Briceño, L. A., Caneva, A., Ramos, A.** (2004). Actualización de la historia de los terremotos en Colombia. Bogotá, Colombia: Editorial Pontificia Universidad Javeriana. 186 pp. ISBN: 958-683-738-6.
- Reitherman R.** (2012). *Earthquakes and Engineers*. Reston, Estados Unidos: American Society of Civil Engineers. 764 pp. ISBN: 978-0784410714.
- SCHEMA-TEC.** (2019). SCHEMATEC. Fecha de consulta: diciembre de 2019. Disponible en <http://schematec.he-arc.ch>
- Schweitzer, J. & Lee, W. H. K.** (2003). Old Seismic Bulletins to 1920: A Collective Heritage from Early Seismologists. *International Geophysics*, **81**: 1665-1723. Doi: 10.1016/S0074-6142(03)80300-5.
- Sears, W., Zemansky, M., Young, H., Freedman, R.** (2009). *University Physics with Modern Physics*. San Francisco, Estados Unidos: 12th ed., (chapters 1-20), published by Pearson Education, Inc., publishing as Addison-Wesley. 760 pp. ISBN: 978-607-442-288-7.
- Swiss Seismological Service - SED.** (2019). Fecha de consulta: diciembre de 2019 Disponible en: <http://www.seismo.ethz.ch>
- Stein, S. & Wysession M.** (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. xi + 498 pp. Oxford: Blackwell Science. ISBN: 978-0865420786.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E.** (1991). *Applied Geophysics*. 2nd edition. Cambridge University Press. xx + 770 pp. ISBN: 0-521-33938-3.
- Trnkoczy, A., Havskov, J., Ottemöller, L.** (2012). Seismic Networks. En P. Bormann. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice*. Potsdam, Alemania: GFZ German Research

Center for Geosciences. Bormann, P. (Ed.). New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2), Chapter 8, Potsdam, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI. Doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_CH8

Vargas, C., Caneva, A., Monsalve, H., Salcedo, E., Mora, H. (2018). Geophysical Networks in Colombia. *Seismological Research Letters*, **89**: 440-445. Doi: 10.1785/0220170168

Wielandt, E. (1996). Seismograph. Fecha de consulta: 12 de diciembre de 2019. Disponibles en: <http://seismic.mgm-monschau.de/downloads/seismographen.pdf>

Wielandt, E. (2012). Seismic Sensors and their Calibration. Bormann, P. (Ed.). New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2), Chapter 5, Potsdam, Deutsches GeoForschungszentrum GFZ; IASPEI. Doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_CH5

Wielandt, E. & Streckeisen, G. (1982). The Leaf-Spring Seismometer: Design and Performance. *Bulletin of the Seismological Society of America*. **72** (6A): 2349-2367.

Comentario bibliográfico

Por considerarlo de interés para nuestros lectores reproducimos el artículo *A sea in the Amazon. Did the Caribbean sweep into the western Amazon millions of years ago, shaping the region's rich biodiversity?* de Amy McDermott, periodista científica de PNAS, publicado el 3 de marzo de 2021, en la sección "Noticias" del PNAS.

Gene Russo, editor de Front Matter Section, dió el permiso correspondiente para la reproducción. La referencia del comentario original es PNAS 2021 Vol. 118 No. 10 e2102396118, en <https://doi.org/10.1073/pnas.2102396118>

★ NEWS FEATURE



NEWS FEATURE

A sea in the Amazon

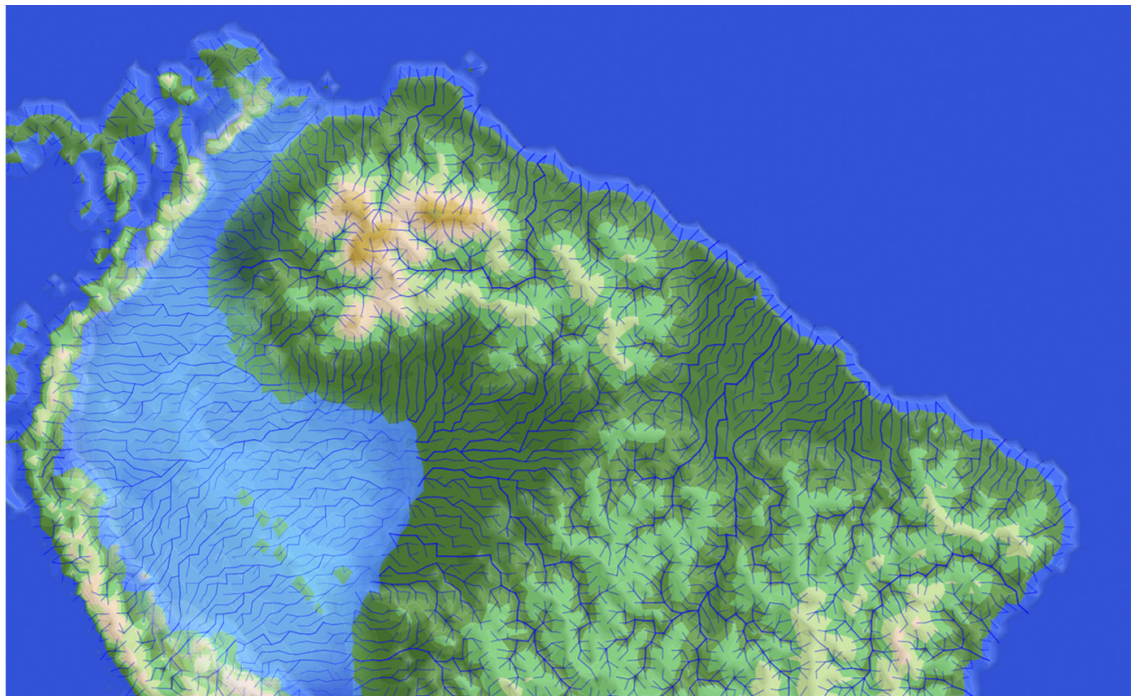
Did the Caribbean sweep into the western Amazon millions of years ago, shaping the region's rich biodiversity?

Amy McDermott, Science Writer

A tropical shrub called *Chrysobalanus icaco* pushes up through Brazil's white sandy beaches. The plant's leathery oval leaves and tough silver bark give it the distinct appearance of a mangrove species, adapted to a life buffeted by saltwater. Strangely, though, *C. icaco* also turns up more than a thousand miles inland, in the forests of the western Amazon. "We find fossil mangroves and associated coastal plants in the middle of the Amazon," says paleoecologist

Carina Hoorn, at the University of Amsterdam in The Netherlands.

The shrub's appearance inland with an assemblage of mangrove plants, noted in a 2019 article, is among the latest lines of evidence hinting that the Caribbean Sea flooded into the western Amazon during the Miocene, sometime in the last 10 to 20 million years (1). If it did, the region could have been awash in shallow saltwater for hundreds of thousands of years after the



New evidence, including geophysical modeling, supports the contentious notion that the Caribbean flooded into the western Amazon during the Miocene. Image credit: Tacio Cordeiro Bicudo (University of São Paulo, São Paulo, Brazil), Victor Sacek (University of São Paulo, São Paulo, Brazil), and Lucy Reading-Ikkanda (artist).

Published under the [PNAS license](#).
Published March 3, 2021.

PNAS 2021 Vol. 118 No. 10 e2102396118

<https://doi.org/10.1073/pnas.2102396118> | 1 of 6



Carina Hoorn uses a hammer and chisel to sample layers rich in organic matter along the Agua Negra outcrop, Colombia, in 1988. Her field assistant, Anibal Matapi, stands at the ladder's base. Black layers of claystone and lignite show forest and swamp taxa, but Hoorn did not find evidence of marine influence at this site. Image credit: Rien Corstanje (photographer).

flooding. *C. icaco* and other plants may have spread into Brazil's interior by dispersing along this sea's beaches, before the water retreated and forest reclaimed the land (2).

The prevailing view of the western Amazon during the Miocene is one of a massive wetland, twice the size of Texas, furred with rainforest and streaked with lakes and tributaries. Whether this wetland was ever inundated by seawater remains a matter of some debate amongst geologists, paleontologists, ecologists, biogeographers, and researchers of pollen known as palynologists. All of them are united by the desire to answer a much larger question: How did the Amazon become so species-rich? That question, Hoom says, is the "overarching motive that brings us all together."

Several recent studies bolster the case that the Caribbean swept inland. A 2017 analysis of rock cores from Colombia and Brazil, for example, revealed changes in sediments as well as uncovering a fossilized shark tooth and a marine mantis shrimp, consistent with two separate Caribbean flooding periods in the last 20 million years (3). If an inland sea did reach the western Amazon, the changing landscape would have shaped patterns of species dispersal and ultimately diversification. Other lines of evidence,

including the occurrence of Amazon River dolphins, sharks, stingrays, and manatees, also suggest that the area was once inundated by saltwater (4).

A series of new geophysical models provide some explanation for how the flooding might have occurred, suggesting a combination of global sea level rise, uplift of the Andes Mountains, and changes in plate tectonics and mantle dynamics. All of these factors would have worked in concert to pull down on the Earth's crust and form a flooded depression in the continent. To find out whether this really happened, geologists will begin the largest sampling project to date, likely this summer, drilling rock cores from three Brazilian sites in search of definitive evidence.

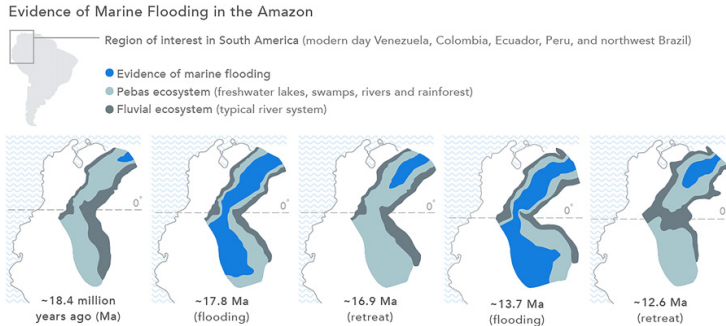
A Lush History

No one really knows what the view would have been, standing on a summit of the Andes Mountains about 20 million years ago. From a peak in modern-day Peru, looking north and east, some researchers imagine they'd have seen a glittering inland ocean, "where you could go from Paraguay to Venezuela in a boat," says palynologist Carlos Jaramillo at the Smithsonian Tropical Research Institute, in Panama City, Panama. Still others picture a landscape of freshwater marshes, he says, with "no marine evidence at all."

For his part, Jaramillo envisions multiple intervals during the Miocene when the ocean surged into the western Amazon, creating a continuous inland sea. Saltwater currents would have poured in from the Caribbean in the north, where they mixed with fresh water pouring down from torrential rains. Flooding periods would have been relatively brief, however. For the majority of the epoch, the ocean receded, leaving a freshwater megawetland of interconnected lakes and snaking channels with a narrow neck to the Caribbean in the north.

The salinity would have been low, because the wetland was mostly freshwater, but episodically salty, says paleontologist Frank Wesselingh. He's spent two decades studying the ancient western Amazon and is now part of the Netherlands' Naturalis Biodiversity Center in Leiden. Beneath the water's surface, Wesselingh imagines a carnival of colorful fish, as well as stingrays, manatees, and dolphins. Even typically bland mud snails may have been striking, Wesselingh says, based on evidence of squiggled lines and shell ornamentation on 19-million-year-old aquatic snail fossils in the area (5). "I'd love to go snorkeling," he says, "but there were also 14-meter-long caimans and 11-meter-long gharials. There were all kinds of not-so-nice creatures that would be a problem for us."

Such swirling visions of mangroves and salty, brackish water are relatively new for the Amazon. When Hoom began her PhD fieldwork in 1988, collecting sediment and pollen samples in the Colombian, Peruvian, and Brazilian Amazon, the origins of Amazonian biodiversity were hotly debated. Most biologists at the time focused on the region's more recent history, just the last 2.6 million years, to explain the evolution of biodiversity there. They thought that forest and savannah expanded and contracted



The Caribbean may have swept south twice during the Miocene, penetrating a landscape dominated by freshwater lakes, swamps, rivers, and rainforest. Image credit: Carlos Jaramillo (Smithsonian Tropical Research Institute, Panama City, Panama) and Lucy Reading-Ikkanda (artist).

between glacial periods, bounded by stable rivers that flowed along the same paths for millennia. Geologist and ornithologist Jürgen Haffer first proposed that theory in 1969, at a time when most biologists thought new species only arose through geographic isolation (6). Haffer assumed a patchwork of isolated refuges of forest and savannah, each an evolutionary haven (7). His ideas dominated the field through the 1980s.

But by the time Hoom came along, cracks had appeared in Haffer's theory, and disagreements over his views had become "quite personal," Hoom recalls. Ultimately, in the early 1990s, a variety of studies refuted Haffer's view, including work on pollen which revealed a recent history of continuous forest cover rather than patchy tree stands (8). Without patchy forest, a theory of geographic isolation didn't hold up. Paleoecologists went back to the drawing board to figure out what had driven Amazonian diversification.

Although Hoom was aware of the debate raging all around her, "I felt like I had nothing to do with it," she says, because her research focused on the Amazon's much deeper past than the last 2.6 million years. "I lived happily like that," she says with a chuckle. But in her fieldwork collecting clay and soil samples around the top of South America, Hoom discovered evidence of fossilized pollen from mangrove trees. She published a seminal study in 1993 suggesting that the pollen was evidence of a megawetland in western Amazonia during the Miocene, 10 to 20 million years ago, which was subject to coastal influence through several periods of marine flooding (9). Shortly after Hoom finished her doctorate, she took a break from research. Upon her return to Europe in 1999, she was "very surprised" to find that her thesis had exploded across the Amazonian research community.

Whereas Hoom's Miocene wetland theory has largely been accepted since 1993, according to palynologist Jaramillo, the marine flooding aspect has remained more controversial—in part because of the difficulty of fieldwork in the Amazon, he says. The forest is so dense that geologists tend to travel by riverboat rather than overland, searching for the relatively few exposed rock faces that poke out from under the thick cover of vegetation. Research teams

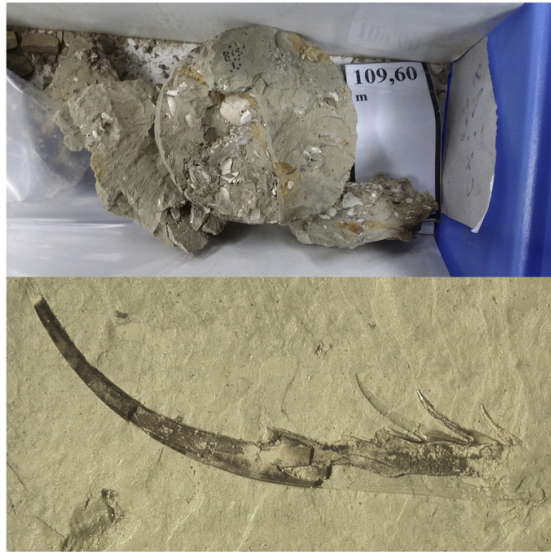
collect sediment samples from the cliffs along the riverbanks. But the cliffs jut out at odd angles, making it difficult to tell whether two outcropping rock faces are the same age based on stratified rock layers alone. Some show evidence of marine influence. Fossilized mollusks and ostracods stud certain cliffs, and oxygen- and carbon-stable isotope ratios in some samples also point to saltwater flooding (10).

But not all riverbank sediments tell the same story, and none is unequivocally marine. Even among those that support marine influence, there are seeming contradictions. In a study Wesselingh published in 2006, for instance, he found fossilized saltwater invertebrates alongside freshwater mollusks in the same rocky outcrop. He concluded that the fossils could be different ages. Or, if they were the same age, the saltwater invertebrates could have evolved an unusual tolerance for freshwater (11). Without limestone deposits or fossilized whale skeletons—the kind of material that plainly shows areas once under oceans in other parts of the world—the debate over the Amazon rages on.

Shifting Tides

Jaramillo himself was skeptical of an Amazonian sea until about three years ago. Fossil-strewn rock cores changed his mind. Stored in the laboratory of Paleoflora in Bucaramanga, Colombia, each core is a cylinder of shale, clay, and sandstone, drilled out of sites in northern Brazil or Southern Colombia. The Brazilian geological survey and a Colombian oil company had collected them in the 1970s, in search of coal and oil. And although the cores were old and in some cases broken or incomplete, they offered the best available window on the past, Jaramillo says.

With a hand lens pressed to his eye, Jaramillo scanned each core, inspecting the many different layers of sediment, deposited one on top of the other over millions of years. Some of the layers were unmistakably river mud, with the kinds of fine-grained sediments, sandstones, and mudstones that tend to accumulate in tributaries today. But two of the layers were more typically marine. Organic peat, algae, and fossil fragments hinted at salty estuarine



In a 2017 study, Carlos Jaramillo and coauthors analyzed rock cores from Columbia and Brazil (top) consistent with two separate Caribbean flooding periods in the last 20 million years. Evidence included this marine mantis shrimp (bottom). Image credit: Carlos Jaramillo (Smithsonian Tropical Research Institute, Panama City, Panama).

environments. Under a microscope, the fossils included about 20 different species of dinoflagellates found in Miocene marine deposits worldwide. Two larger fossils, a shark tooth and a marine mantis shrimp, provided further evidence for ocean flooding. Pollen records from the two marine sediment layers suggest that they date to 18 million years ago and 14 million years ago, respectively.

“The logical conclusion is the ocean was there,” Jaramillo explains. His 2017 analysis of the cores demonstrated two marine intervals when ocean waters reached the western Amazon, he says, with the incursion likely starting from the Caribbean in the north and flowing south along the foot of the Andes (3). In each case, the water advanced and then retreated over periods as short as half a million years. Jaramillo suspects that a combination of tectonic processes and punctuated global sea level rise flooded a depression in the continent. Geological models published since 2010 suggest such a scenario is possible (12).

High-speed video simulations show the uplift of the Andean cordillera over tens of millions of years and, in some cases, the subsequent submersion of western Amazonia. Over a Zoom call from his office at the University of São Paulo, Brazil, geophysicist Victor Sacek screen-shared one such model, which he first developed in 2014. It simulates the surface of South America during the uplift of the Andes, beginning sometime between 30 million and 60 million years ago. The initial model described geological processes at the level of Earth’s crust, such as erosion, sedimentation, and the formation of the Andean

Cordillera. In 2019, PhD student Tacio Cordeiro Bicudo updated the model to also approximate processes deep in the Earth, including convection in the mantle below the South American continent.

To picture mantle convection, Sacek says, first imagine the western edge of South America colliding with the oceanic Nazca Plate tens of millions of years ago. As the two tectonic plates ground against each other, the lip of South America contracted and thickened into the rising spine of the Andes. Simultaneously, the oceanic Nazca Plate dove under the continent into the softer mantle beneath it. Think of the hard, dense oceanic plate as if it was made of iron, Sacek says, and the mantle as a vat of honey. The heavy iron mass plunging through the honey would create convection that perturbed the liquid’s surface. So, too, did the plate sinking through the mantle, creating a smooth depression in the Earth’s surface far above. When Sacek, Bicudo, and others included these dynamics in their models—published in 2019 and 2020—the simulations put this subsidence right under the western Amazon, forming a huge depression in the continent (13, 14). This hollow could have flooded from the Caribbean, pouring in across an apron-shaped expanse of what is now parts of Colombia, Ecuador, Bolivia, Peru, and western Brazil, to form an inland sea between 25 and 17 million years ago.

Whether this actually happened is still impossible to say. “With our models we just give scenarios,” Bicudo says. The mantle was certainly in motion beneath the continent at the time, he says. But the size and shape of the depression it created, and whether it ever connected to the ocean, remain unknown. Geodynamicist Nicolas Flament at the University of Wollongong in Australia has also modeled the western Amazon. In one 2015 paper, he combined data on the positions and speed of the tectonic plates and the thickness of the top layer of the mantle, called the lithosphere, to simulate the changing topography of South America attributable to mantle convection over the last 50 million years (15). Flament’s models also predicted a western Amazonian shallow sea during the Miocene. Although he acknowledges that “models are not evidence,” Flament thinks the fact that his tectonic data-based simulations match predictions from the geological record lends further support to marine incursions as plausible—even likely.

Ebb and Flow

A sea in the Amazon captures the imagination, but there are still geologists who consider it just that—imaginary. What’s clear in the geological record is that mud, silt, and, in smaller proportion, sand blanketed the region, explains Edgardo Latrubesse, at the Federal University of Goiás in Goiânia, Brazil. The age of those sediments, and how exactly they arrived in the western Amazon, is less clear. Oceans don’t typically transport and deposit sediment into vast inland areas, Latrubesse points out. Rivers, on the other hand, do erode mountains and hills to produce sandy and silty deposits. “To accumulate such a huge amount of

sediment, the only way are rivers," Latrubesse says. Hoorn and Jaramillo, in fact, would agree that although repeated ocean flooding carried some sediments, most did wash in on rivers when the area looked more like a freshwater wetland than a continuous sea.

One key point of disagreement: the age of the sediments. Fossil pollen, ostracod, and mollusk assemblages date them to mid-to-late Miocene, which would match the proposed age of the ancient sea. But Latrubesse doesn't put much stock in pollen-based age estimates; plants, he says, evolve too slowly to provide precise-enough date ranges. And in work published in 2010 analyzing vertebrate fossils from the southwestern Amazon, Latrubesse dated the sediments as far more recent, 6.5 to 9 million years old (16). It makes no sense to debate the existence of an inland sea 20 million years ago, he says, based on evidence from sediments that aren't even 10 million years old.

In other parts of the world, layers of volcanic ash could be used for absolute radiometric dating. But volcanic ash sediments are rare in the western Amazon. Geologists instead rely on comparisons of fossils with the evolutionary record, which is far from an exact science, says palynologist Andrea Kern. She coauthored a 2020 study aiming to resolve the Amazon sediment age debate while working as a postdoc at the University of São Paulo in Brazil. Kern and her collaborators analyzed one Brazilian sediment core from a different site in the same collection that Jaramillo used in his 2017 analysis. In previous studies, pollen and ostracod fossils had dated the rock to the middle Miocene, about 14 million years ago. However, Kern's 2020 study used grains of the mineral zircon buried in the sediments alongside the fossils (17). Zircon can be radiometrically dated, and Kern's analysis put the rock's maximum age at about 11.4 million years. Although the cores in both studies came from sites potentially inundated by marine incursions during the Miocene, most of the pollen and ostracod fauna in the sample Kern analyzed indicated swamps and small lakes transitioning to a river-dominated habitat. She acknowledges, however, that it is just one record from a single site.

Drilling Down

"I love this stuff, but it's so complicated," says evolutionary biologist John Bates, speaking from the Field Museum in Chicago, IL, where he curates birds. Although geology isn't his specialty, Bates is keenly interested in the geologic history of the western Amazon. "I want to know what the ramifications were for biology," he says. An inland sea could help explain how a region that contains a tenth of the world's known species became such a trove of life.

Take, for instance, the sand-colored nighthawk. The bird is only found in the western Amazon, where it nests on sandbanks. There's no clear behavioral or ecological reason why nighthawks should be tied to creeks and rivers, Bates says. Yet they are, as are scarlet-crowned barbets and a wealth of other birds, endemic to the same waterways.

A massive Miocene lake or sea could offer some evolutionary explanation for the birds' association with a shoreline niche, Bates says. He coauthored a 2018 study comparing the phylogenetic relatedness and geographic distributions of 1,783 passerine species across 19 families of neotropical birds (18). Bates found that bird lineages in the western Amazon are younger and more related, on average, than lineages in surrounding areas. That means the western Amazon has its own evolutionary history, separate from the rest of the continent, he says. A huge body of water would have been such a starkly different habitat from surrounding forests that it could have spurred a unique evolutionary signature among species there. If sand-colored nighthawks evolved around an ancient sea or delta, it may explain why they still live near water today.

Plant species, too, could have been affected by marine incursions. Although the Amazonian flora was diverse millions of years before the Miocene, Hoorn notes that saltwater flooding could certainly have altered regional plant biodiversity. Not only would seawater change the chemical composition and fertility of the soil, shaping which plants grew where, but coastal species brought inland by marine incursions could also have been isolated and adapted into new groups. If a seaway enabled new plants and animals to radiate into the west, it could be an overlooked mechanism driving the region's species richness.

Geologists agree that resolving exactly what the Miocene landscape looked like will require better rock samples. The oil and coal industries did not collect cores with multidisciplinary studies in mind; some are contaminated and so can't be thoroughly analyzed by

"I'd say it's pretty much a slam dunk that there were marine incursions in South America. It's just all of the details are difficult."

—Christine Bacon

researchers. They're also proprietary and only available to a small subset of the scientific community.

Paul Baker, a geologist at Duke University in Durham, NC, will colead the effort, likely starting in June or July, to collect and analyze what researchers believe will be the best sediment samples ever taken from the Amazon. Called the Trans-Amazon Drilling Project, and funded by the National Science Foundation, International Ocean Discovery Program, the São Paulo Research Foundation, and the Smithsonian Institution, the plan includes roughly 50 scientific collaborators from a range of disciplines, including Hoorn and Jaramillo. They will drill 2,000-meter-long sediment cores from three Brazilian sites running east-to-west across the Amazon Basin, following the Amazon River, with the goal of capturing a snapshot of the entire Cenozoic Era, from 66 million years ago to the present (19). Painstakingly collected and carefully stored, these freshly drilled cores will capture even millimeter-scale changes in the sediment layers that

could hold evidence of ocean incursion. Continuous rock will give geologists their best shot yet at comprehensively assessing every layer of Miocene sediment for marine evidence. And dating zircon grains in the rock cores will give the most definitive time frame for the sediment to date, based on “by far the best material that’s ever been looked at,” Baker says.

“I’d say it’s pretty much a slam dunk that there were marine incursions in South America,” says

evolutionary biologist Christine Bacon, co-first author of the 2019 study on *C. icaco* and other plants’ unusual inland distributions. “It’s just all of the details are difficult,” she says, on the phone from the University of Gothenburg in Sweden. If there is unequivocal marine evidence, it should turn up in the new cores. “Without continuous rock,” Jaramillo says, “the discussions could go forever.” And that might mean never knowing whether the view from the Andes 20 million years ago included a vast, shimmering inland sea.

- 1 R. Bernal et al., Could coastal plants in western Amazonia be relicts of past marine incursions? *J. Biogeogr.* **46**, 1749–1759 (2019).
- 2 M. Sciumbata, J. T. Weedon, G. Bogota-Angel, C. Hoorn, Linking modern-day relicts to a Miocene mangrove community of western Amazonia. *Palaeobio. Palaeoenv.* 10.1007/s12549-020-00470-z(2021).
- 3 C. Jaramillo et al., Miocene flooding events of western Amazonia. *Sci. Adv.* **3**, e1601693 (2017).
- 4 N. R. Lovejoy, J. S. Albert, W. G. R. Crampton, Miocene marine incursions and marine/freshwater transitions: Evidence from Neotropical fishes. *J. S. Am. Earth Sci.* **21**, 5–13 (2006).
- 5 F. P. Wesselingh, Mollusks from the Miocene Pebas Formation of Peruvian and Colombian Amazonia. *Scr. Geol.* **133**, 19–290 (2006).
- 6 D. G. da Rocha, I. L. Kaefer, What has become of the refugia hypothesis to explain biological diversity in Amazonia? *Ecol. Evol.* **9**, 4302–4309 (2019).
- 7 J. Haffer, Speciation in Amazonian forest birds. *Science* **165**, 131–137 (1969).
- 8 S. G. Haberle, M. A. Maslin, Late Quaternary vegetation and climate change in the Amazon basin based on a 50,000 year pollen record from the Amazon fan, ODP site 932. *Quat. Res.* **51**, 27–38 (1999).
- 9 C. Hoorn, Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of northwestern Amazonia: Results of a palynostratigraphic study. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **105**, 267–309 (1993).
- 10 M. Boonstra, M. I. F. Ramos, E. I. Lammertsma, P.-O. Antoine, C. Hoorn, Marine connections of Amazonia: Evidence from foraminifera and dinoflagellate cysts (early to middle Miocene, Colombia/Peru). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **417**, 176–194 (2015).
- 11 F. P. Wesselingh et al., The nature of aquatic landscapes in the Miocene of western Amazonia: an integrated palaeontological and geochemical approach. *Scr. Geol.* **133**, 363–393 (2006).
- 12 G. E. Shephard, R. D. Müller, L. Liu, M. Gurnis, Miocene drainage reversal of the Amazon River driven by plate–mantle interaction. *Nat. Geosci.* **3**, 870–875 (2010).
- 13 T. C. Bicudo, V. Sacek, R. P. de Almeida, J. M. Bates, C. C. Ribas, Andean tectonics and mantle dynamics as a pervasive influence on Amazonian ecosystem. *Sci. Rep.* **9**, 16879 (2019).
- 14 T. C. Bicudo, V. Sacek, R. P. de Almeida, Reappraisal of the relative importance of dynamic topography and Andean orogeny on Amazon landscape evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.* **546**, 116423 (2020).
- 15 N. Flament, M. Gurnis, R. D. Müller, D. J. Bower, L. Husson, Influence of subduction history on South American topography. *Earth Planet. Sci. Lett.* **430**, 9–18 (2015).
- 16 E. M. Latrubesse et al., The Late Miocene paleogeography of the Amazon Basin and the evolution of the Amazon River system. *Earth Sci. Rev.* **99**, 99–124 (2010).
- 17 A. K. Kern et al., Re-investigating Miocene age control and paleoenvironmental reconstructions in western Amazonia (northwestern Solimões Basin, Brazil). *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* **545**, 109652 (2020).
- 18 N. M. Crouch, J. M. G. Capurro, S. J. Hackett, J. M. Bates, Evaluating the contribution of dispersal to community structure in Neotropical passerine birds. *Ecography* **42**, 390–399 (2018).
- 19 P. A. Baker et al., Trans-Amazon Drilling Project (TADP): Origins and evolution of the forests, climate, and hydrology of the South American tropics. *Sci. Drill.* **20**, 41–49 10.5194/sd-20-41-2015. (2015).

A nuestros lectores y autores

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es una publicación periódica trimestral, multidisciplinaria, que tiene como objetivo dar a conocer artículos inéditos de investigación de alta calidad.

La Revista publica artículos científicos en las áreas de ciencias biomédicas, ciencias del comportamiento (filosofía, psicología, antropología, sociología), ciencias físicas, ciencias naturales (biología, microbiología, botánica, zoología, ecología) ciencias químicas, ciencias de la tierra (geología, medio ambiente) y matemáticas.

Está reseñada en varios índices nacionales e internacionales tales como Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (*International Center for Scientific Research*), *Current Mathematical Publications*, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, Online Computer Library Center – OCLC, *Zentralblatt für Mathematik*, *Zoological Record*. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

El primer número se publicó en diciembre de 1936, año de creación oficial de la Academia, bajo la dirección del doctor Jorge Álvarez Lleras y hasta el momento se han editado 41 volúmenes.

Proceso de evaluación por pares

Se recibirán solo los manuscritos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los manuscritos serán evaluados en primera instancia por el editor y los editores asociados de la disciplina correspondiente.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, quienes evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración aproximada de 90 días.

Los pares académicos pueden adoptar alguna de las siguientes tres opciones: a) aceptación sin modificaciones; b) aceptación con correcciones; c) no aceptación. En caso de desacuerdo de los pares, el original será enviado a un tercer evaluador.

En cualquiera de los casos, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo dentro de las cuatro semanas siguientes. Además, deberá enviar un documento en el que responderá, una a una, todas las observaciones señaladas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, se entenderá que los autores han retirado el manuscrito en su forma actual y, si se remitiera de nuevo, el Comité Editorial de la Revista lo considerará como un nuevo trabajo.

Los trabajos que sean aceptados se considerarán como propiedad de la **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales** y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Ética de la publicación

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (RACCEFYN), acoge la normatividad internacional definida por el *Committee on Publication Ethics* (COPE). Algunas normas se pueden consultar en:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

Ver documento pdf (anexo)

Política de acceso abierto

La página web de la Revista (www.raccefyn.co) permite el acceso libre y abierto a los artículos con el fin de contribuir a la visibilidad, el acceso y la difusión de la producción científica.

Directrices para autores

Tipología de los artículos publicados en la Revista

Artículos originales o artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene los siguientes apartes importantes: introducción, metodología, resultados, discusión, conclusiones y referencias.

Artículos cortos: documentos breves que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica y, que, por lo general, requieren de una pronta difusión.

Artículos de posesión o artículos de revisión de tema: documentos resultantes de una investigación donde se analizan crítica y sistemáticamente, a la par que se integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, centradas en un campo de la ciencia o la tecnología, con el fin de dar cuenta de sus avances y sus tendencias de desarrollo. Presentar un artículo de revisión constituye un requisito para que un Académico pueda posesionarse como miembro correspondiente o de número.

Cartas al editor: posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.

Comentarios bibliográficos: son escritos críticos breves sobre libros recientes publicados en las disciplinas de interés de la Revista.

Corrección de los autores

Fe de erratas

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

1. Los trabajos presentados deberán ser originales y de alto nivel, escritos en inglés o español, y que traten sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedarán como propiedad permanente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo la internet. (Ver transferencia derechos de autor).
2. El autor de la correspondencia aceptará mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original, que no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado para aparecer en otra publicación impresa o electrónica y que, además, ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista. Igualmente, que los derechos de autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad. (Ver formatos declaración originalidad, conflicto de intereses y sesión de derechos de autor en la página web de la Revista: <http://www.raccefyn.co>).
3. La participación de los autores en el trabajo deberá ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad por los aportes de cada cual. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, quienes deberán ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres. Finalmente, el manuscrito debe contener un párrafo en el que se detallará la contribución de cada uno de los autores.
4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplan con los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deberán aparecer en la sección de *Agradecimientos*, pero no serán citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deberán aparecer en los *Agradecimientos*.
5. La terminología debe regirse por el Código Internacional de Nomenclatura Botánica. La terminología física, química o bioquímica, deberá seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deberán usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos deberán ser escritos en la forma recomendada por el *Internacional Code of Botanical Nomenclature* y por el *International Committee on Systematics of Prokaryotes* o ICSP.

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deberán ser enviados a través de <http://www.raccefyn.co>

El manuscrito incluirá además de la página correspondiente al título, el resumen, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de las figuras, todos los cuales deberán estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No debe olvidarse el usar la numeración en todo el manuscrito. Extensión máxima de 30 páginas, entre 5.000 a 8.000 palabras.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

1. Una hoja de presentación, página en Word con los nombres y apellidos (si desea poner el segundo apellido, debe ir separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grado académico), filiaciones y correos electrónicos. Agregar aquí un párrafo en el que los autores declaren su aporte personal al manuscrito bajo consideración.
2. Título completo del manuscrito en español e inglés (máximo 30 palabras, 165 caracteres)
3. Título corto (máximo 10 palabras, 50 caracteres)
4. Resumen en español e inglés que no supere 250 palabras.
5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis, separadas por punto y coma.
6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico, dirección electrónica y código ORCID. *Open Researcher and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Researcher and Contributor ID*.
8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo en conjunto con las leyendas de las figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales y con una resolución mayor a 300 dpi (*dots per inch*).
9. El número máximo de tablas y figuras es de 7. Para enviar información adicional se puede emplear la sección de *Información suplementaria* debidamente referenciada en el texto: tabla 1S, 2S, etc.; figura 1S, 2S, etc.

Estructura del manuscrito

Introducción: se debe mostrar el marco teórico en el cual se inscribe el tema de la investigación, propósito del artículo y justificación del estudio indicando, además, la delimitación de la pregunta problema.

Materiales y métodos: se describirán los sujetos de observación o experimentación, aparatos o dispositivos y metodologías empleadas en el estudio. La descripción de la metodología debe tener referencias de los métodos usados.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y la manera de analizar los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y las figuras acompañadas de una explicación y análisis de las mismas.

Discusión: debe hacerse énfasis en los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastando los resultados con la información pertinente disponible en literatura actualizada y relacionar las conclusiones con los objetivos propuestos. Se deben incluir las implicaciones y limitaciones de los hallazgos y comparar las observaciones relevantes con las de otros estudios.

Los resultados y la discusión pueden presentarse también en forma combinada, en cuyo caso la sección se denominará *Resultados y Discusión*.

Conclusiones: deberán responder al objetivo de la investigación reportada e incluir el planteamiento de objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Referencias: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre entre paréntesis el apellido del primer autor y el año de publicación. Si el apellido del autor o autores forma parte de la estructura formal de la frase, sólo se pondrá entre paréntesis la fecha; por ejemplo: Pérez y Ribas (1996). Si no forma parte de la estructura formal del texto, por ejemplo: ... como indica Barbudo (2003). Si son solo dos autores se pondrán los dos apellidos, si son más de dos sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo “*et al.*”

La Revista ACCEFYN utiliza las normas del Manual APA, estas emplean un sistema de citación de autor-fecha.

Lista de referencias. Se organizan alfabéticamente y se citan de la siguiente manera:

Artículo de revista

Apellido, A. A., Apellido, B. B., Apellido, C. C. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, volumen: pp-pp.

Ejemplo

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, 7: 33-40.

Libro

Apellido, A. A. (Año). Título. Ciudad, País: Editorial

Ejemplo

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). Fisiología Vegetal. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Capítulo de libro

Apellido, A. A., Apellido, B. B. (Año). Título del capítulo o la entrada. En A. A. Apellido. (Ed.), Título del libro (pp. xx-xx). Ciudad, País: Editorial.

Ejemplo

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. La enseñanza: Su teoría y su práctica (148-165). Madrid, España: Akal.

Revista en línea

Apellido, A. A. (Año). Título del artículo. Nombre de la revista, **volumen** (número): pp-pp. Disponible en: <http://www...>

Ejemplo

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Disponible en: <http://www.jstor.org/pss/2388013>.

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

Citas páginas web

Anotar la fecha de la consulta

Ejemplo

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Disponible en <http://www.algaebase.org>., accedida entre enero y junio de 2015.

Tablas y figuras: las tablas y cuadros se denominarán tablas y llevarán numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilizar las letras minúsculas del alfabeto según orden de aparición en la respectiva tabla: a, b, c, d, e, etc.

Las fotografías, gráficos, dibujos y esquemas se denominan todos como Figuras, las cuales se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se describen en hoja separada. Si se trata de micro-fotografías debe indicarse el aumento utilizado. Las personas, o sus nombres, no deben ser identificables en las fotografías pero se requiere permiso escrito para su publicación.

Cuando las tablas y figuras hayan sido tomadas de revistas o libros, sean impresos o electrónicos, se debe especificar la fuente y adjuntar autorización de la respectiva publicación para su reproducción.

Agradecimientos: podrán ser expresados a personas o entidades que hayan ayudado en la realización del trabajo. Se mencionarán las personas y el tipo de ayuda aportada, así como las entidades, instituciones o fundaciones que hayan financiado o suministrado materiales. En caso de proyectos de investigación financiados será suficiente con mencionar el código de registro y la entidad, institución o fundación que lo apoyó económicamente.

Consideraciones

Los trabajos aceptados son propiedad de la Revista ACCEFYN y podrán ser reproducidos total o parcialmente por la Revista.

La Revista no se hace responsable de los contenidos científicos ni de las implicaciones legales de los artículos publicados.

Corrección de estilo y publicación del manuscrito

Una vez aceptados los artículos, éstos se enviarán a corrección orto-tipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará el registro de cada una de las sugerencias llevadas a cabo y los comentarios o dudas para que el autor o los autores aprueben y contesten apropiadamente.

La versión corregida deberá ser enviada nuevamente para su aprobación definitiva en un plazo mínimo de 48 horas. El manuscrito deberá ir con una carta al editor, informando cuales correcciones fueron procesadas. El editor le informará al autor la fecha aproximada y el número del volumen en el que el trabajo será publicado.

Rectificaciones y correcciones de errores

Las rectificaciones sobre la información suministrada por parte de los autores, se harán en el número inmediatamente posterior al anuncio de las mismas y serán responsabilidad de los mismos autores. La Revista se encargará de publicar una nota aclaratoria a manera de erratas. En el caso que sean necesarias mejoras y corrección de errores orto-tipográficos, de manejo visual de la información o de imprecisiones involuntarias, el o los autores podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan efectuarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificación de artículos

Si en el proceso editorial se encuentra falsificación, omisión de datos, duplicidad del artículo o plagio, se devolverá el original al autor con la debida notificación a su institución patrocinadora, centro de investigación o universidad.

Conflicto de intereses

Si los autores o coautores, editores o revisores (evaluadores) tienen algún conflicto de intereses que pueda de alguna manera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, tal conflicto debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleador-empleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, entre otros.

También existen los conflictos personales resultado de amistades o animadversiones, competencias académicas y pasiones en el campo intelectual o moral (por ej. parientes en una compañía que se beneficiaría de los resultados que se van a publicar, el uso de los resultados publicados para promoción inmediata basada en el artículo publicado, creencias religiosas que estén en conflicto directo con la investigación que se va a publicar, entre otros).

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También pueden publicarse el título del trabajo, resumen, tablas y figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, también dando el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Aviso de derechos de autor

Los autores certifican que son los creadores originales del trabajo y declaran que:

- a) Los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y,

en los casos que así lo requieran, se cuenta con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales.

- b) Todos los materiales que se presentan están totalmente libres de derecho de autor y, por lo tanto, el autor de la correspondencia se hace responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de responsabilidad a la **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.
- c) El trabajo es inédito y no será enviado a otras revistas mientras se espera la decisión de los editores de tal revista. El primer autor declara que no existe un posible conflicto de intereses en este manuscrito.
- d) En caso de ser publicado, los autores del artículo transfieren todos los derechos de autor a la Revista ACCEFYN, sin cuyo permiso expreso no podrá reproducirse ninguno de los materiales publicados en la misma.
- e) A través de este documento, y si el trabajo es aceptado para su publicación, la Revista ACCEFYN asume los derechos para editar y publicar los artículos en índices nacionales, e internacionales o bases de datos con fines académicos y científicos no comerciales en medios impresos, electrónicos, Internet en texto completo o cualquier otro medio conocido o por conocer con respeto de los derechos de autoría.

Transferencia de derechos de autor

En caso de que el artículo enviado sea aprobado para publicación, el autor principal en nombre propio y en el de los coautores o el autor principal y los coautores deben ceder los derechos de autor del artículo mencionado a la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN), excepto en los siguientes casos:

- a) Los autores y coautores retienen el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, presentaciones orales y distribuir a algunos colegas impresos de su propio trabajo publicado, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a la revista de ACCEFYN. También se pueden publicar el título del trabajo, el resumen, las tablas y las figuras del trabajo en los correspondientes sitios web de autores o de sus empleadores, dando también el crédito a la revista de ACCEFYN.
- b) Si el trabajo ha sido realizado por contrato, el empleador del autor tiene el derecho de revisar, adaptar, preparar trabajos derivados, reproducir o distribuir en formato impreso el trabajo publicado, de una manera segura y para el uso exclusivo de sus empleados.
- c) Si a la revista de ACCEFYN se le solicitara permiso individual por terceras personas para usar, imprimir o publicar específicamente artículos ya publicados, deberá obtenerse el permiso expreso del autor y de los coautores del trabajo o del empleador con excepción del uso en salones de clase, bibliotecas o reimpresos en un trabajo colectivo.
- d) La revista ACCEFYN se reserva el posible uso en la portada de la revista, de figuras sometidas con los manuscritos.
- e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de ACCEFYN.

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico incluidos en esta revista se usarán exclusivamente para los fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros ni serán usados con otros fines.

Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envíos, los autores están obligados a comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. Se devolverán a los autores aquellos envíos que no cumplan estas directrices.

1. Carta de sometimiento del artículo, donde informa que todos los autores han leído, aprueban y declaran que:

- Están de acuerdo con el manuscrito remitido, en su contenido, organización y presentación.
- El trabajo es original, el cual no ha sido publicado previamente y, de igual forma, no se someterá a otra revista hasta conocer la respuesta del Comité Editorial.
- En caso de ser aceptado el manuscrito, se autoriza su publicación bajo las normas establecidas por la revista.

- El documento no cuenta con texto o figuras que tengan reserva de derechos y si los tuviere se cuenta con la autorización escrita para su reproducción.
- El documento no contiene citas o transcripciones de obras que carezcan de referencias bibliográficas debidamente citadas.
- Se incluye un párrafo donde los autores declaran cuál fue el aporte de cada uno de ellos al documento.
- Esta carta firmada debe ser adjuntada en el paso 4 del presente proceso de envío en formato PDF.

2. Presentación

- Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo, apellido y segundo apellido separado por un guion) de todos los autores (sin cargos, ni grados académicos), filiaciones y correos electrónicos.
- Título completo del manuscrito en español e inglés y título corto.
- Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras. Figuras en formato jpg o tiff en archivos individuales.

3. Estructura del artículo. Se incluyen

- El resumen en español e inglés (Abstract).
- Las palabras clave (máximo 6) en español e inglés (Keywords).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y/o instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.
- Referencias.
- Declaración de conflicto de interés.

4 Información adicional: figuras

- Se incluyen como archivo independiente, cada figura en página aparte.
- Se incluyen las leyendas correspondientes al final del original. Estas figuras deberán ser cargadas en el paso 4 del presente proceso de envío en formato JPG o TIF.

5. Información adicional: tablas

- Se incluyen al final del original, elaborados en el modelo más sencillo de tablas del programa Word.
- Se ordenan secuencialmente.
- Se incluye el título correspondiente.

6. Referencias

- Se han seguido las normas de la revista de ACCEFYN en las instrucciones a los autores.

7. Abreviaturas:

- Se introducen entre paréntesis la primera vez que se usan.

8. Nomenclatura:

- Los nombres de género y especie están en letra cursiva.
- Los nombres de microorganismos, plantas y animales se escriben completos la primera vez que se citan, en el título y en el resumen.

9. Ética

- Todos los autores conocen y aprueban la presentación del manuscrito, su contenido, la autoría y el orden de la autoría.
- El manuscrito ha sido postulado solo a la Revista ACCEFYN y no se encuentra postulado ni ha sido publicado en otra revista.
- Si el artículo incluye la investigación en humanos o con animales se han seguido las directrices de la Declaración de Helsinki y el uso de primates no humanos en la investigación.
- Se incluye los agradecimientos a las instituciones u organizaciones que financiaron la investigación.

10. Revisores

Se suministran indicaciones sobre tres o cuatro posibles revisores con sus nombres completos, formación académica y direcciones de correos electrónicos.

To our readers and authors

Focus and Scope

The Journal of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences (ACCEFYN) is a multidisciplinary quarterly journal that publishes high quality original research articles.

The journal publishes scientific articles in the disciplines of Biomedical Sciences, Behavioral Sciences (philosophy, psychology, anthropology, and sociology), Natural Sciences (Biology, Botany, Microbiology, Zoology, Ecology), Physical Sciences, Chemical Sciences, Earth Sciences (Geology, Environmental Sciences) and Mathematics. It is included in several national and international directories and indexing services like Actualidad Iberoamericana, Agris, CIRS (International Center for Scientific Research), Current Mathematical Publications, EBSCO, Dialnet, Historia Mathematica, Index Kewensis, Latindex, Mathematical Reviews, MathSciNet (on line data base), PERIODICA, SciELO Colombia, On-line Computer Library Center – OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Within the Colombian citation system, the journal is register in Publindex (The Journal index Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación, Colciencias).

The journal's website (www.raccefyn.co) allows free and open access to full-text articles with the purpose of contributing to the visibility, access and dissemination of Colombian scientific production.

The first issue was published in December 1936, year of the official creation of the National Academy, led by Jorge Álvarez Lleras. The journal has been edited 41 volumes since then.

Peer Review Process

Manuscripts that meet the author guidelines are welcomed. Manuscripts will be assessed by the editor in chief and associate editors' expert in the topic of the manuscript.

If the editors see fit, the manuscript will be sent to, at least, two peers knowledgeable in the topic of the manuscript. It is estimated the peer reviewing process will take around 90 days.

The reviewers can decide to a) accept the article without any modification, b) accept it if some recommendations are addressed, or c) reject the manuscript. If peers exhibit contradicting assessments, an extra reviewer will be approached to settle disparities and reach a final decision.

The corresponding author will be notified of the results of the peer review process. The author should return an amended version, along with a documenting reporting the response to the reviewers, four weeks after receiving the results of the reviewers.

If the author does not send these documents past the suggested time, the journal will assume the manuscript has been withdrawn. If the author send these documents past the suggested time, the journal takes the manuscript as a new submission and the reviewing process starts anew.

Accepted manuscripts are considered property of the journal. Thus, the journal is free to reproduce an entire manuscript or parts of it.

The journal is not responsible of the contents of the published manuscripts and related legal implications.

Publication Ethics and Publication Malpractice Statement

The journal abides by the *Committee on Publication Ethics* (COPE) standards. These guidelines can be consulted in the following links:

COPE guidelines on good publication practice: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1753164/>

COPE code of conduct: <https://publicationethics.org/resources/code-conduct>

See document pdf (annex)

Open access policy

The journal enables open access to published articles via its website (www.raccefyn.co) to contribute to the dissemination, accessibility, and visibility of scientific work.

Author Guidelines

Research articles. A manuscript documenting the results of at least one experiment/study by following the following structure: introductions, methodology, results, discussion, conclusions, and references. Extra material can be reported as an appendix.

Brief articles. Manuscripts reporting the results of novel experiments/study in a succinct manner and that require prompt diffusion.

Inaugural articles or Review articles. Manuscripts reporting literature reviews on a topic. It is one requirement for the Academics to be admitted to the Academy

Letters to the editor. Manuscripts proposing critical comments, novel analysis or re-interpretations of published work.

Book reviews. Short manuscripts reporting a review of a book recently published within an area of interest to the journal.

Authors correction

Errata

Information for Authors

Authors should bear in mind the following

1. Submitted manuscripts must be original and of outstanding quality. They can be written in Spanish or English in an area related to the **Exact, Physical or Natural Sciences**. All works accepted will remain permanent property of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences so that such work can be published in hard copy or in electronic format, including web posting. (See transference of authors' rights).
2. The corresponding author will be required to state that the work is original, has not been published elsewhere, is not under review elsewhere and that co-authors agree as to the version submitted. Equally important, the corresponding author will be asked to state whether copyrights have been passed on to other parties. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
3. It is assumed all listed authors have contributed substantially to the manuscript. Their order in the manuscript should be reached by agreement. Finally, each author's contribution should be explicitly stated. Collaborators whose contribution was not substantial (see above) should be mentioned in the 'acknowledgments' section (see <http://www.icmje.org/> for a reference). Financial supports and grants should also be mentioned in this section.
4. The terminology used in the manuscript should follow that used in specific areas (we therefore recommend authors to consult specialised references in this regards as to their own fields of research). Scientific names should follow recommendations such as those stated, for example, by the International Code of Botanical Nomenclature and the International Committee on Systematics of Prokaryotes.

Submission and Presentation of manuscript

The manuscripts should be submitted using the website of the Academy: <http://www.acefyn.co>

The manuscript, including the title page, the abstract, tables with titles, graphics with descriptive legends, must be prepared in Microsoft WORD processor in double space. Use Arial font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript. Maximum extension 30 pages, 5,000 to 8,000 words.

The manuscripts must contain the following information:

1. A page in Microsoft Word with the names and surnames (complete name, first and second family name separated by a hyphen) of all the authors (without positions, and without academic degrees), academic affiliations and email addresses.
2. Complete manuscript title in Spanish and English.
3. Short Title
4. Abstract in Spanish and English using 250 or less words
5. Key words in Spanish and English not containing more than 6 words.
6. Name of the author responsible for all correspondence, including his complete address, telephone number and email address.
7. Electronic addresses of all the co-authors.
8. Text, bibliographical references, and tables in the same file together with the legends for all the figures.
9. Figures must be in jpg or TIF format.

Manuscript Structure

Introduction: there must be a clear description of the theoretical framework of the theme of the investigation, purpose of the article and justification of the study, indicating the limitation of the problem question.

Materials and methods: a description of the object of observation or experimentation, instruments or devices and the methodology employed in the study.

Statistical analysis: indicate the statistical methods used and the data analysis employed.

Results: these must be presented in a logical sequence, with the accompanying tables and figures with their respective explanations and analysis.

Discussion: emphasis must be given to those aspects of the study which are new and important, contrasting the results with the relevant information available in the recent literature and relate the conclusions with the proposed objectives. Mention must be made of the implications and limitations of the results found and a comparison of the relevant observations with that of other studies. The results and the discussion may also be presented in a combined form.

Conclusions: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

References: these citations must be verifiable. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way: last name of the first author and year of publication Pérez (1996). If there are only two authors use both last names Perez and Ribas (1996). If there are more than two authors use only the first last name followed by *et al.*

Reference list: alphabetically and following the examples

Journal article

Last name, A. A., Last name, B. B., Last name, C. C. (Year). Title. Journal name, **volume:** pp-pp.

Example

Kay, M.A., Glorioso, J.C., Naldini, L. (2001). Viral vectors for gene therapy: the art of turning infectious agents into vehicles of therapeutics. *Nat Med.*, **7:** 33-40.

Book

Last name, A. A. (year). Title, City, Country: Publisher

Example

Salisbury, F. B., Ross, C. M. (1994). *Fisiología Vegetal*. Guadalajara, México: Grupo editorial Iberoamérica.

Book chapter

Last name, A. A., Last name, B. B. (Year). Chapter title. In A. A. Last name. (Ed.), Book title (pp. xx-xx). City, Country: Publisher.

Example

Guba, E.G. (1983). Criterios de credibilidad en la investigación naturalista. En J. Jimeno Sacristán y A. Pérez Gómez. *La enseñanza: Su teoría y su práctica* (148-165). Madrid, España: Akal.

Journal on line

Last name, A. A. (Year). Article title. Journal, **volume** (issue): pp-pp. Available in <http://www...or DOI>

Examples

Cintrón, G., Lugo, A. E., Pool, D. J., Morris, G. (1978). Mangroves of arid environments in Puerto Rico and adjacent islands. *Biotropica*, **10** (2): 110-121. Available in: <http://www.jstor.org/pss/2388013>

Gutiérrez-Vargas, J.A., Moreno, H., Cardona-Gómez, G.P. (2016). Targeting CDK5 post-stroke provides long-term neuroprotection and rescues synaptic plasticity. *J Cereb Blood Flow Metab.* doi: 10.1177/0271678X16662476

References web pages

Date of the access

Example

Guiry, M.D., Guiry, G.M. (2015). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. Available in <http://www.algaebase.org>., accessed in June 2015.

Tables and graphics: The tables and frames are called tables and carry an Arabic numeration in accordance with the order in which they appear. The corresponding title is placed on the upper part of the table and notes are placed in the lower part. Symbols for unit measures must appear in the column

headings. If it is necessary to display some information, use lower case letters from the alphabet according to the appearance of the table: a, b, c, d, e, etc.

Photographs, graphics, pictures, or sketches are named figures, are enumerated in order of appearance, and their legends must be written in a separate page. With respect to microfiches, indicate the size of the augmentation used. People or their names should not be identifiable in photographs, unless written permission for their publication has been obtained.

When tables and figures have been taken from magazines or books, published in hard copy or electronically, specify the source and include the authorization for its reproduction from the respective publication.

Acknowledgments: These can be expressed to persons or entities who have aided in the realization of the work. Mention is made of persons and their type of aid provided, as well as to entities or institutions which have provided financial and material assistance. In case of investigative projects with financial support it suffices to mention the registry code and the entity, institution or foundation which provided the economic support.

Considerations

They will be published in the following issue to the announcement of the correction. They are responsibility of the authors. Errata are responsibility of the Journal.

Fabrication of evidence, data omission, duplicity of data or plagiarism will be penalized. The authors and their institutions, research center or university and sponsors will be notified.

Once the article has been accepted, it will undergo a style and format revision which will bring it to its definitive version. The authors will receive the galley proofs in PDF format for the correction of errors before its printing. The corrected version must be returned for final approval within a period of 48 hours. The manuscript must be accompanied with a letter to the editor informing him of the corrections that were carried out. The editor will inform the author of the date and volume number in which the publication will appear.

If the authors or co-authors, the editors or reviewers (evaluators) have some conflict of interest which may in any way influence the transparency and objectivity of the peer review process and publication, it must be so declared.

The most obvious conflicts of interest are those referred to as financial conflicts, which result between, employer-employee, investments, and patents, as well as honoraria, consulting, paid investigation by companies which depend on the investigative results, etc.

There also exist personal conflicts arising from friendships, animosity, academic competencies and passions in the moral or intellectual field (for example relatives in a company which will benefit from the results to be published, the use of the results for immediate promotion based on the published article, religious beliefs which are in direct conflict with the investigation that will be published, etc.).

Copyright Notice

Declaration of originality and transfer author's rights

The authors declare:

The published data and reference materials have been duly identified with their respective credits and have been included in the bibliographic notes and citations that have been so identified and that should it be required, I have all releases and permissions from any copyrighted material.

All material presented is free from any copyright and that I accept full legal responsibility for any legal claims relating to copyrighted intellectual property, fully exonerating from responsibility the **Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

This work is unpublished and will not be sent to any other journal while waiting for the editorial decision of this journal. I declare that there is no conflict of interest in this manuscript.

In case of publication of this article, all author's rights are transferred to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, and so cannot be reproduced in any form without the express permission of it.

By means of this document, if the article is accepted for publication by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, the Revista assumes the right to edit and publish the articles in national and international indices or data bases for academic and scientific use in paper, electronic, CD-ROM, internet form either of the complete text or any other known form known or to be known and non-commercial, respecting the rights of the authors.

Transfer of author rights

In case the article is approved for publication, the main author in representation of himself and his co-authors or the main author and his co-authors must cede the author rights of the corresponding article to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, except in the following cases:

The authors and co-authors will retain the right to revise, adapt, prepare derived works, oral presentations, and distribution to some colleagues of reprints of their own published work, if the corresponding credit is given to the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**. It is also permissible to publish the title of the work, summary, tables, and figures of the work in the corresponding web sites of the authors or their employers, also giving credit to the Revista.

If the work has been realized under contract, the author's employer has the right to revise, adapt, prepare derivative works, reproduce, or distribute in hard copy the published work, in a secure manner and for the exclusive use of his employees.

If the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** were approached for permission by a third party for using, printing, or publishing specifically articles already published, the Revista must obtain the express permission of the author and co-authors of the work or of the employer except for use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work. The **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales** reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

No other right, other than the author's right, can be claimed by the **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**.

Privacy Statement

The names and e-mail addresses appearing in the journal will be used solely for the purposes explicitly therein expressed and by no means will they be supplied to third parties.

Submission Preparation Checklist

As part of the submission process, authors are required to check off their submission's compliance with all of the following items, and submissions may be returned to authors that do not adhere to these guidelines.

1. Letter of submission, where it is stated that all authors have read and approved that:

- The submitted manuscript conforms in content, organization and presentation with established norms.
- The original article has not been previously published in any form nor has it been submitted to another journal nor will it be until an answer is received from the Editorial Committee.
- In the case the manuscript is accepted, it is then authorized to be published under the journal's norms.
- The document may not be published without authorization of all copyrighted texts and figures.
- The document is fully cited in a list of references.

2. Appearance

- The first page written in Word with names and surnames (complete name, first and second surnames separated by a hyphen) of all authors (without job titles or academic titles), affiliations and e-mail address.
- Complete title of the manuscript in Spanish and English. Short title.
- Name of person responsible for correspondence with their complete address, telephone number and electronic address.
- E-mail of all coauthors.
- Text, references and tables in the same file together with legends of the figures. Figures in jpg or TIF format.

3. Structure of the article

The following sections are to be included:

- An abstract should be included in both Spanish and English.
- Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
- Introduction.
- Materials and methods.

- Results and Discussion for short communications.
- Discussion.
- Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
- Declaration of conflict of interest.

4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or TIF format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o TIF format

5. Additional information: Tables

- Tables are included on a separate page and are presented in a simple manner as a Word table
- Tables are ordered sequentially

6. References

Citations must follow the journal ACCEFYN's norms found in the authors' instructions

7. Abbreviations

The first use is introduced in parentheses

8. Nomenclature

- The generic and specific names are written in italics
- Names of micro-organisms, plants and animals are written out completely the first time that they are cited in the title and in the abstract.

9. Ethics and malpractice considerations

- All authors must know and approve of the form, content, authors, and the order of the authors
- An article that has been submitted to the journal ACCEFYN has not be submitted or published in any other journal.
- If the article includes research on human or animals have all authors read and followed the guiding principles of the Declaration of Helsinki and the use of non-human primates in the research?

10. Reviewers

List 3 or 4 possible reviewers with their complete names, academic background and e-mails.

