

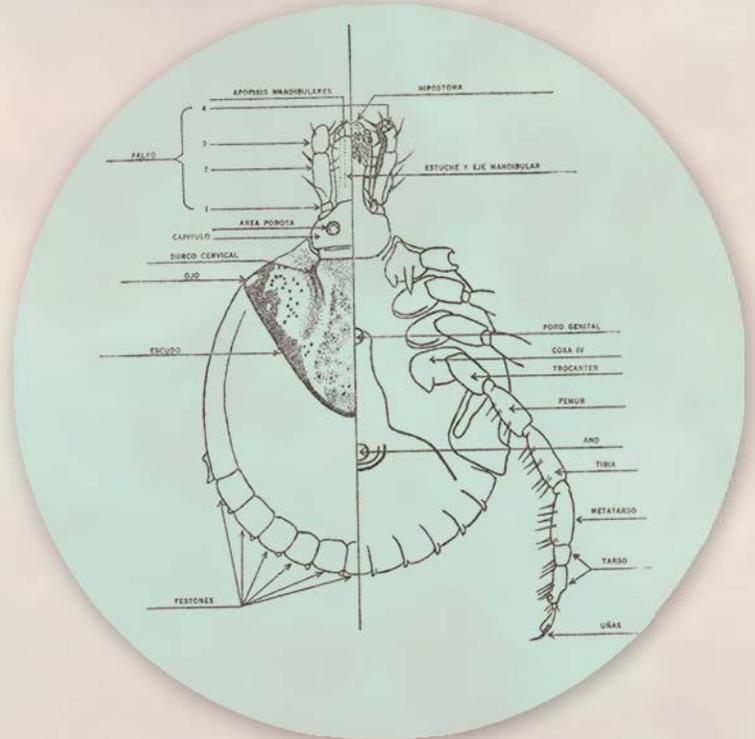


ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 42 • Número 164 • Págs. 161-300 • Julio-Septiembre de 2018 • Bogotá - Colombia



ZOOLOGÍA



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. 42 • Número 164 • Págs. 161-300 • Julio-Septiembre de 2018 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

- Elizabeth Castañeda, Ph. D.
Instituto Nacional de Salud,
Bogotá, Colombia

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M.Sc.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Luis Caraballo, Ph. D.
Universidad de Cartagena, Cartagena, 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, B.Sc., Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias del Comportamiento

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

- Fernando Marmolejo-Ramos, Ph. D.
Universidad de Adelaide, Adelaide, Australia

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

Ciencias Naturales

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

Ciencias Químicas

- 10 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Moisés Wasserman Lerner, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

- 10 Myriam Sánchez de Gómez, M.Sc.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

- 10 Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

- 10 Néstor García, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias de la tierra

- 10 Germán Poveda Jaramillo, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

- 10 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

- 10 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

- 10 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Matemáticas

Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia

- 10 Luis Español González, Doctor
Universidad de la Rioja, España

Jaime Ignacio Lesmes Camacho, Dr. phil. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

- 10 Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia

- 10 Alf Onshuus, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

10 Ángela María Guzmán, Ph. D.
University of Central Florida,
Orlando, Estados Unidos

10 Antoine M. Cleef, Ph. D.
University of Amsterdam,
The Netherlands

Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, USA

10 Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España

Gioconda San Blas, Ph. D.
Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas
y Naturales, Caracas, Venezuela

10 Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA,
USA

10 José Rubens Pirani, Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brasil

10 Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile

10 Pedro Joseph Natham, Ph. D.
Centro de Investigación y de
Estudios Avanzados, Instituto
Politécnico Nacional, México

Asistencia y coordinación editorial
Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía
Marta Renza

Diseño y diagramación
Johanna Morales

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 2016), categoría B

Periodicidad: trimestral
Fecha de inicio: 1936
Tamaño: 21,5 x 28 cm
Papel: propalmate de 90 gr.
Solicitud de canje

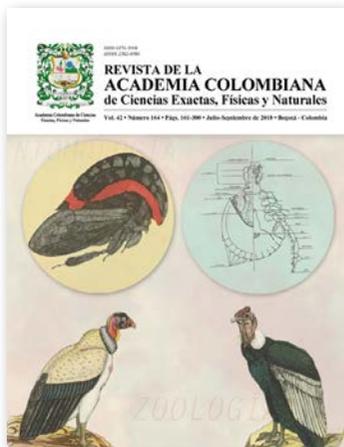
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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.

Impreso en Colombia



Portada

Mosaico de ilustraciones incluidas en los artículos clásicos de los primeros 50 años de la revista de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 41(Suplemento):467-490, diciembre de 2017 doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn>

1. Leopoldo Richter. *Membracidae colombianae*. Revisión de las especies colombianas del género *Membracis*. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1947, 8 (27): 382-403.

Plancha II. Fig 1. *Membracis Buctoni Funkh.* Caso único en todo el género *Membracis* en que las franjas longitudinal y subapical difieren de colorido. Dib. L. Richter.

2. Ernesto Osorno Mesa. Las garrapatas de la República de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1940, 4 (13): 6-24.

Figura 1. Cara dorsal y ventral de la hembra de **AMBLYOMMA CAJENNENSE**. (Aum. 21X) (Dibujo original del autor).

3. Federico Carlos Lehmann Valencia. Contribución al estudio y conocimiento de las aves rapaces de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1940, 3 (12): 455-461.

a. Plancha I. El rey de los gallinazos. *Sarcorhamphus papa* (Linneo). 1/8 de tam. nat. (F.K. Lehmann V. II-1940)

b. Plancha II. El cóndor. *Vultur gryphus* Linneo. 1/12 del tam. nat. (Dibujo del autor).

1	2
3a	3b



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. 42 • Número 164 • Págs. 161-300 • Julio-Septiembre de 2018 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences

Estudio preliminar de anticuerpos IgG antiinsulínicos y complejos inmunitarios en pacientes colombianos con diabetes tipo 2 **AP**

Preliminary study of anti-insuline IgG antibodies and immune complexes in Colombian patients with type 2 diabetes

Yohana Domínguez-Romero, Jorge Arturo Santa, Luisa Fernanda Bohórquez Villamizar, Lucy Gabriela Delgado Murcia 166

Ciencias Físicas Physical Sciences

Thermodynamic properties, electronic and crystallographic structure, and magnetic response of the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ material **OA**

Propiedades termodinámicas, estructuras electrónica y cristalográfica y respuesta magnética del material $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$

Crispulo E. Deluque Toro, Ariday S. Mosquera Polo, Jorge I. Villa Hernández, David A. Landínez Téllez, Jairo Roa-Rojas 180

Bioeconomía: el futuro sostenible **AP**

Bioeconomy: A sustainable future

Elizabeth Hodson de Jaramillo 188

Las perchas para aves como estrategia de restauración en la microcuenca del río La Vega, Tunja, Boyacá **AO**

Bird perches as restoration strategy in the micro-basin of La Vega River, Tunja, Boyacá

Carlos Andrés Villate-Suárez, Francisco Cortés-Pérez 202

Utilización de macroinvertebrados acuáticos como herramienta para determinar la calidad del agua en la quebrada Santo Tomás, municipio de Pensilvania, Colombia **AO**

Utilization of aquatic macroinvertebrates as a tool to determine water quality in Santo Tomás ravine, Pensilvania municipality (Colombia)

Sergio Adrián Murillo-Montoya, Alexander Mendoza-Mora, Edwin Santiago Restrepo-Bastidas, Miguel Ángel Rodríguez 212

Mass occurrence of the liverwort *Herbertus sendtneri* in a glacial lake in the Andes of Colombia **OA**

Presencia masiva de la hepática *Herbertus sendtneri* en una laguna glaciar en los Andes de Colombia

Robbert Gradstein, Alain Vanderpoorten, Guido van Reenen, Antoine Cleef 221

Primer registro de *Nanomis rasmusseni* Chacón, Pescador & Segnini, 2013 (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) en el departamento del Tolima, Colombia **AO**

First record of *Nanomis rasmusseni* Chacón, Pescador & Segnini, 2013 (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) from Tolima, Colombia

Adriana Marcela Forero-Céspedes, Gladys Reinoso-Florez 230

Ciencias Naturales Natural Sciences

<i>Moutabea chartacea</i> (Polygalaceae), a new species from the north-central Amazon and Guayana Shield OA	
<i>Moutabea chartacea</i> (Polygalaceae), una nueva especie de la Amazonía nor-central y el escudo guayanés	
<i>Gerardo A. Aymard C., Lisa M. Campbell</i>	232
Diversidad de mariposas diurnas (Lepidoptera: Papilionoidea) asociadas con tres hábitats en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó, Chocó, Colombia AO	
The diversity of butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea) associated with three habitats in Pacurita, Quibdó municipality, Chocó, Colombia	
<i>Víctor Danilo Palacios-Mayoral, Leison Palacios-Mosquera, Alex Mauricio Jiménez-Ortega</i>	237
Dinámica temporal de la riqueza de especies y la abundancia de mariposas frugívoras (Lepidoptera: Nymphalidae) en la sabana inundable del municipio de Arauca (Colombia) AO	
Temporal dynamics of species richness and abundance of fruit-feeding butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae) in the flooding savannas of Arauca (Colombia)	
<i>Juan Carlos Agudelo-Martínez, Evelin María Gómez-Tapia, Néstor Pérez-Buitrago</i>	246
Evaluación del efecto de <i>Trialeurodes vaporariorum</i> (Hemiptera: Aleyrodidae) en el crecimiento de plántulas de <i>Oreopanax floribundus</i> (Araliaceae) AO	
Evaluation of the effect of <i>Trialeurodes vaporariorum</i> (Hemiptera: Aleyrodidae) on the growth of <i>Oreopanax floribundus</i> (Araliaceae) seedlings	
<i>Manuela Calderón-Hernández</i>	255
Evaluación de resistencia de cultivares de soya (<i>Glycine max</i> L.) a aislamientos de <i>Phytophthora sojae</i> Kaufm. & Gerd. de la altillanura colombiana AO	
Evaluation of soybean (<i>Glycine max</i> L.) cultivars resistance to <i>Phytophthora sojae</i> isolates from the Colombian eastern high plains	
<i>Nathali López-Cardona, Marcela López-Casallas</i>	262
Patrones altitudinales de las comunidades vegetales en el Chocó biogeográfico del Valle del Cauca, Colombia AO	
Altitudinal patterns of plant communities in the Chocó biogeographical region of Valle del Cauca, Colombia	
<i>María Paula Moreno Cavazos, Edier Alberto Soto Medina, Alba Marina Torres González, Martín Llano-Almarío</i>	269
Reporte del hallazgo de restos de <i>Hilarcotherium</i> sp. (Mammalia, Astrapotheria) y de material asociado en una nueva localidad fosilífera del valle inferior del Magdalena, ciénaga de Zapatosá, Cesar, Colombia AO	
Report on the finding of remains of <i>Hilarcotherium</i> sp. (Mammalia, Astrapotheria) and associated material in a new fossil locality in the Lower Valley of Magdalena, Zapatosá wetlands, Cesar, Colombia	
<i>Mauricio Pardo Jaramillo</i>	280
Comentarios bibliográficos	287
Enfoque y alcance	
Focus and Scope	289

Estudio preliminar de anticuerpos IgG antiinsulínicos y complejos inmunitarios en pacientes colombianos con diabetes tipo 2

Yohana Domínguez-Romero¹, Jorge Arturo Santa¹, Luisa Fernanda Bohórquez Villamizar²,
Lucy Gabriela Delgado Murcia^{1,*}

¹Grupo de Investigación en Inmunotoxicología, Departamento de Farmacia,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

²Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 24 de mayo de 2017

Resumen

El uso terapéutico de insulina exógena de origen animal para el tratamiento de la diabetes mellitus se ha asociado con la inducción de anticuerpos antiinsulínicos, los cuales alterarían la seguridad y la eficacia de esta formulación. Con la introducción de la tecnología del ADN recombinante y la producción de insulinas con secuencias similares a la humana, se redujo, pero no se eliminó, la aparición de dichos anticuerpos. En el marco del análisis de la inmunogenicidad inducida por las proteínas terapéuticas y con el objetivo de evaluar el perfil de inmunidad humoral de tres formulaciones comerciales de insulina exógena humana (insulina regular, insulina Neutral protamine Hagedorn [NPH], e insulina glargina), se estudió la presencia de anticuerpos antiinsulínicos en 29 muestras de suero de pacientes con diabetes tipo 2, y se caracterizó su reactividad cruzada, su perfil según la subclase de IgG y su capacidad para formar complejos inmunitarios. Los pacientes se clasificaron en tres grupos según su tratamiento: a) insulina regular y NPH (n=10), b) insulina NPH (n=9) y c) glargina (n=10). La detección, caracterización y evaluación de las subclases de IgG se hizo mediante ELISA indirecto, y la detección de complejos inmunitarios constituidos por anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena, mediante ELISA de captura. Los resultados permitieron evidenciar que: i) cada formulación de insulina es reconocida de manera diferencial por los anticuerpos antiinsulínicos, lo cual sugiere un mayor potencial inmunogénico de la insulina NPH y uno menor de la insulina glargina; ii) el perfil según la subclase de IgG de los anticuerpos antiinsulínicos en humanos es diferencial para cada formulación, siendo predominante la subclase IgG3 para la insulina NPH en pacientes en tratamiento con insulina regular y NPH; iii) la presencia de anticuerpos antiinsulínicos no se asoció con alteraciones de los parámetros metabólicos analizados, y iv) los complejos inmunitarios constituidos por anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena no se detectaron con la metodología utilizada en los sueros de los pacientes con diabetes tipo 2 estudiados. Los resultados obtenidos permiten concluir que existen diferencias entre el perfil inmunogénico de las insulinas evaluadas, lo cual es importante en el análisis de la inmunogenicidad de dichas formulaciones en cuanto a su seguridad y eficacia. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: anticuerpos insulínicos; insulina exógena; complejo inmune; diabetes; ELISA.

Preliminary study of anti-insuline IgG antibodies and immune complexes in Colombian patients with type 2 diabetes

Abstract

The therapeutic use of exogenous insulin of animal origin for the treatment of diabetes mellitus has been associated with the development of insulin antibodies, which raises concerns regarding the safety and efficacy of this formulation. With the advent of recombinant DNA technology and the generation of insulin with human-like sequences, the production of insulin antibodies has been reduced but not eliminated. As part of the analysis of immunogenicity induced by therapeutic proteins and to evaluate the immunogenic profile of three commercial formulations of human exogenous insulin (regular, neutral protamine Hagedorn (NPH), and glargine) we evaluated the presence of insulin antibodies in 29 serum samples from volunteers with type 2 diabetes, and we characterized their cross-reactivity, IgG subclass profile, and ability to form immune complexes. To this end, volunteers were classified into three groups according to their current insulin therapy: a) Regular and NPH insulin (n=10); b) NPH

*Correspondencia:

Lucy Gabriela Delgado Murcia, lgdelgadam@unal.edu.co

Recibido: 30 de noviembre de 2017, **Aceptado:** 16 de julio de 2018, **Editor:** John Mario González

(n=9), and c) glargine (n=10). For the detection, characterization, and evaluation of the IgG subclasses we used an indirect ELISA test, and for the detection of immune complexes formed by insulin antibodies and exogenous insulin, capture ELISA. Our results evidenced that: i) Each insulin formulation was recognized differentially by the insulin antibodies suggesting a greater immunogenic potential for NPH insulin and a lower one for glargine insulin; ii) the IgG subclasses profile of insulin antibodies in humans was different for each formulation; the IgG3 subclass for NPH insulin was predominant in volunteers treated with regular and NPH insulin; iii) the presence of insulin antibodies was not associated with alterations in the metabolic parameters analyzed, and iv) immune complexes composed of exogenous insulin antibodies were not detected in the sera of diabetic volunteers. The results obtained in this study allowed us to conclude that there are differences between the immunogenic profile of the insulin formulations tested, which has significant value in the analysis of their immunogenicity with regard to their safety and efficacy. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Insulin antibodies; exogenous insulin; immune complexes; diabetes; ELISA.

Introducción

La Federación Internacional de Diabetes (*International Diabetes Federation*, IDF) reportó que en el 2017 más de 425 millones de personas en el mundo padecían diabetes y 4 millones murieron a causa de la enfermedad en ese año (**International Diabetes Federation**, 2017). En ese mismo año, en Colombia más de 2 millones de personas padecían diabetes y más de 20 mil murieron por esta causa (**International Diabetes Federation**, 2017). Según la IDF, la prevalencia de diabetes tipo 2 en el 2017 fue de 7,12 % (frente a una población colombiana adulta de 29.989.290 habitantes de entre 20 y 79 años de edad). La diabetes tipo 2 es uno de los principales problemas para los sistemas de salud de Latinoamérica, ya que afecta a más de 577 millones de habitantes. El número creciente de casos en la región y la complejidad de su tratamiento han incrementado las muertes y las incapacidades resultantes. En la mayoría de los países de la región la diabetes se encuentra entre las primeras cinco causas de mortalidad por cardiopatía isquémica e infartos cerebrales. Además, es la primera causa de ceguera, enfermedad renal y amputaciones no traumáticas, así como de incapacidades prematuras, y está entre las 10 primeras causas de hospitalización y atención médica (**Asociación Latinoamericana de Diabetes**, 2013).

La administración de insulina exógena en pacientes con diabetes mellitus se ha asociado con la inducción de anticuerpos antiinsulínicos detectables en suero. Por lo general, estos aparecen en el paciente diabético como consecuencia del tratamiento con insulina exógena y, al parecer, pueden afectar la correcta respuesta de disminución de los niveles de glucemia (**Francis, et al.**, 1985; **Hattori, et al.**, 2013).

La hipersensibilidad clínica y la resistencia a la insulina se han asociado con la presencia de anticuerpos antiinsulínicos en pacientes que han recibido terapia con insulina animal (**Beeson, et al.**, 1956; **Reeves, et al.**, 1982). En algún momento se pensó que la aparición de eventos de inmunogenicidad, como la generación de anticuerpos neutralizantes frente a la insulina exógena, podía deberse al uso de insulinas provenientes de otras especies distintas al humano, ya que ello permitiría su reconocimiento como antígeno. Por lo tanto, se esperaba que la producción de formulaciones con

una insulina similar (en secuencia) a la humana, redujera esta probabilidad. Sin embargo, a pesar de que se disminuyeron los efectos inmunogénicos asociados a la hipersensibilidad, como la anafilaxis, las lipodistrofias y las reacciones locales graves, no se redujo totalmente la producción de anticuerpos antiinsulínicos exógenos, la cual se asoció específicamente a la respuesta inmunitaria adaptativa. En diversos estudios se ha reportado la presencia de anticuerpos antiinsulínicos en pacientes con diabetes tipo 2 tratados con insulinas recombinantes humanas y análogos de la insulina (**Chen, et al.**, 2005; **Yanai, et al.**, 2011; **Thalange, et al.**, 2016; **Hattori, et al.**, 2013). Los anticuerpos antiinsulínicos inducidos por la insulina exógena en pacientes diabéticos se ha asociado a eventos clínicos como la variabilidad de la glucemia y el control metabólico (**Fineberg, et al.**, 2007; **Segal, et al.**, 2008), y especialmente con la resistencia a la insulina en forma de hiperglucemia (**Ishizuka, et al.**, 2009; **Lahtela, et al.**, 1997) o hipoglucemia (**Zhao, et al.**, 2010; **Itoh, et al.**, 2011; **Koyama, et al.**, 2005).

Independientemente de su pureza y origen, las insulinas terapéuticas continúan siendo inmunogénicas en los seres humanos por su naturaleza proteínica. Sin embargo, las respuestas inmunológicas graves son muy poco frecuentes y afectan a una minoría de los pacientes. Entre los factores que pueden favorecer la propensión a las respuestas humorales a la insulina exógena están los genéticos, la edad, la presencia de insulina exógena en altas concentraciones en la sangre y el sitio de administración del medicamento (**Fineberg, et al.**, 2007).

Como parte del análisis de la inmunogenicidad inducida por proteínas terapéuticas de origen biotecnológico, y después de estandarizar durante el desarrollo de este trabajo las técnicas de inmunodetección de anticuerpos antiinsulínicos libres (ELISA indirecto) y de complejos inmunitarios (ELISA de captura) (**Domínguez**, 2014), se procedió a evaluar la presencia de dichos anticuerpos, libres y unidos a la molécula de insulina (complejo inmunitario), en muestras de pacientes con diabetes tipo 2 (cuya etiología no es autoinmunitaria y en quienes no es frecuente la generación de anticuerpos anti-insulina endógena durante el desarrollo de la enfermedad, como sí ocurre en los pacientes con diabetes tipo 1), con el fin de caracterizar su reactividad

frente a tres formulaciones de insulina exógena (regular, NPH y glargina) y establecer su perfil según las subclases de IgG. La evaluación de los sueros de los pacientes permitió la detección y el análisis de la reactividad de los anticuerpos antiinsulínicos generados en respuesta a la administración de las insulinas exógenas evaluadas.

Materiales y métodos

Reactivos biológicos utilizados. Se utilizaron tres insulinas exógenas terapéuticas, dos humanas de origen recombinante: regular (Novo Nordisk®, Bagsvaerd, Dinamarca) y NPH (Novo Nordisk®, Bagsvaerd, Dinamarca), y un análogo de la insulina: glargina (Sanofi-Aventis, Frankfurt, Alemania). Estas tres distintas formulaciones se seleccionaron como blanco del estudio por estar incluidas en el Plan Obligatorio de Salud (POS) en Colombia (**Comisión de regulación en salud**, 2011) y por representar cada una de las categorías de la clasificación según su farmacocinética (Valla, 2010).

Obtención y almacenamiento de sueros. Las personas diabéticas voluntarias en tratamiento con insulina fueron contactadas en consulta externa por parte de dos de los autores del presente trabajo. Tres fueron los criterios de inclusión empleados: 1) voluntarios con diagnóstico de diabetes tipo 2 según los criterios de la American Diabetes Association (ADA) (**American Diabetes Association, ADA**, 2014); 2) voluntarios mayores de 18 años, y 3) voluntarios bajo tratamiento con las insulinas regular y NPH, NPH o glargina. El único criterio de exclusión fue el de padecer enfermedades del sistema endocrino e inmunológico según constancia en su historia clínica. El estudio se realizó en dos fases: i) una inicial, que contempló la toma de dos muestras de sangre, la primera en ayunas para la evaluación de la glucosa en ayunas, la hemoglobina glicosilada y la inmunodetección de anticuerpos antiinsulínicos libres, y la segunda, 120 minutos después de la ingestión de alimentos para evaluar la glucosa posprandial, y ii) una segunda fase que contempló la toma de cuatro muestras de sangre: la primera, 5 minutos antes de la administración de la insulina, y las siguientes, a los 30, 60 y 120 minutos de la aplicación, con el objetivo de detectar los probables complejos inmunitarios constituidos por los anticuerpos antiinsulínicos y la insulina, y asociarlos con los valores de glucemia e insulinemia. Como sueros de control negativo se emplearon aquellos procedentes de pacientes cuya historia clínica no reportaba diabetes, inmunosupresión o endocrinopatías. Cada uno de los voluntarios (con niveles normales de glucemia o con exceso de glucosa en la sangre) tuvo conocimiento verbal y escrito del procedimiento de toma de las muestras y de su destinación según las normas de ética vigentes. Las muestras se centrifugaron a 600 g durante 20 minutos para la posterior recuperación del suero, el cual se dispensó en tubos de 1,5 ml estériles (Eppendorf®) y se almacenó a -20°C hasta su empleo.

Evaluación de los niveles séricos de glucemia, insulinemia y hemoglobina glicosilada. La determinación de glucosa en las muestras de suero se hizo en el laboratorio

de la Clínica de Nuestra Señora del Rosario mediante el método enzimático Glucose GOD FS (DiaSys Diagnostic Systems®, Holzheim, Alemania), en tanto que los niveles séricos de insulina se evaluaron en el Laboratorio Clínico Médico Colcan utilizando la técnica de inmunoquimoluminiscencia (LIAISON®insulin, Saluggia, Italia). El porcentaje de hemoglobina glicosilada (%HbA1c) se evaluó utilizando la prueba cuantitativa A1CNow+ (Bayer HealthCare®, EE.UU.).

Ensayos inmunoabsorbentes ligados a enzimas (ELISA). Elisa indirecto para la detección de anticuerpos antiinsulínicos. Se utilizó anti-IgG humana producida en cabra (anticuerpo policlonal) acoplada a peroxidasa Invitrogen (Invitrogen®, CA, USA). Para la inmunodetección de anticuerpos antiinsulínicos y sus subclases se incubó la microplaca de 96 pozos (Nunc™Maxisorp™) con 10 $\mu\text{g}/\text{ml}$ de cada una de las formulaciones comerciales de insulina exógena en 50 μl de solución tampón carbonato bicarbonato 10 mM, pH 9,6, a 4°C durante 16 horas; se lavó tres veces con solución fosfato salina (PBS) más Tween® 20 (Scharlau, Barcelona, España) al 5 % (PBS-T). Como agente bloqueador se usó leche descremada (Colanta®, Funza, Colombia) al 7 % y se incubó una hora a 37°C . Posteriormente, se realizaron tres lavados y se incubó a 37°C durante una hora con 100 μl del suero en estudio para terminar con tres lavados adicionales. Después se incubó con 100 μl del anticuerpo anti-IgG conjugado con peroxidasa (Invitrogen®, Waltham, MA) en una dilución de 1/20.000 en PBS-T a 37°C durante 1 hora, se lavó para retirar el exceso de reactivo y se adicionó el sustrato 3,3',5,5'-tetrametilbenzidina (TMB) (Invitrogen®, Waltham, MA) en una proporción de 1:1 por pozo. La reacción se detuvo pasados 15 minutos con 50 μl de HCl 1N. La microplaca se leyó a 450 nm en un lector de placas TRIAD Series Multimode Detector (Dynex® Technologies, Chantilly, VA, USA). Cada ensayo se realizó por duplicado.

Para establecer la concentración óptima de absorción de cada insulina en el pozo, se proyectó una curva de saturación con seis diluciones seriadas de cada insulina (10 a 0,078 $\mu\text{g}/\text{ml}$). Las insulinas se detectaron utilizando el suero policlonal anti-insulina exógena derivado de conejo de Nueva Zelanda (producido en nuestro laboratorio con cada una de las insulinas en estudio usando adyuvante para promover la inmunogenicidad) (Domínguez, 2014). Dado que la concentración óptima de recubrimiento de la placa con el antígeno (para este caso insulina) se define como la concentración a una temperatura y un tiempo definido en los que el suero estándar o el control positivo alcanzan el mayor reconocimiento del antígeno y se obtiene el menor reconocimiento por parte del suero de control negativo y el blanco (Ochoa, 2012), se estableció el uso de 5 $\mu\text{g}/\text{ml}$ de cada formulación para la detección de anticuerpos antiinsulínicos en muestras de suero derivadas de conejos y 10 $\mu\text{g}/\text{ml}$ para la detección de anticuerpos antiinsulínicos en muestras de suero humanas.

Para evaluar la especificidad de la unión de antígenos y anticuerpos, se sensibilizaron pozos con albúmina de suero bovino (bovine serum albumin, BSA) y se incubaron con el suero de control positivo correspondiente a un paciente con diabetes tipo 1 en quien la generación de anticuerpos antiinsulínicos se detectó clínicamente y que había sido tratado con diversas insulinas, incluidas las tres analizadas en este estudio. En la misma placa se evaluó la unión inespecífica de anti-IgG humana en presencia de insulina y en ausencia de suero positivo para anticuerpos antiinsulínicos, revelada con anti-IgG humana acoplada a la enzima.

Elisa indirecto para la detección de las subclases de IgG. Para la detección de las subclases de IgG se utilizó un protocolo similar al anterior y las anti-IgG1, IgG2, IgG3 e IgG4 humanas producidas en ratones (anticuerpos monoclonales), marcadas con peroxidasa (Invitrogen®) en una dilución de 1:500 en PBS durante 2 horas a 37 °C.

Elisa de captura para la detección de complejos inmunitarios. Para la detección de complejos inmunitarios constituidos por anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena, la microplaca de 96 pozos (Nunc™MaxiSorp™) se incubó con 50 µl de anticuerpos antiinsulínicos purificados del suero de los conejos previamente inmunizados (denominados anticuerpos policlonales de captura). Los anticuerpos de captura anti-insulina regular y anti-glargina (sometidos previamente a titulación) se diluyeron 1/1.200 y los anti-NPH en 1/100 de solución tampón carbonato bicarbonato 0,05 mM, pH 9,6. Se incubó durante 1 hora a 37 °C antes y después de la incubación a 4 °C durante 16 horas y se lavó cuatro veces con PBS-T (Scharlau, Barcelona, España). Como agente bloqueador se usó leche descremada al 5 % en PBS-T, se incubó durante 1 hora a 37 °C y se lavó. Los complejos inmunitarios de control (formados in vitro en una concentración de 10,3 µg/µl) y 50µl de las muestras de suero en estudio se incubaron en una dilución de 1/100 en PBS y leche descremada al 3 % durante 1 hora a 37 °C. Después del lavado, la placa se incubó con 50 µl de anticuerpo anti-IgG conjugado con peroxidasa (Invitrogen®) en una dilución de 1:25000 en PBS-T a 37 °C durante 1 hora, y de nuevo se lavó para retirar el exceso de reactivo y se adicionaron 50 µl de TMB (Invitrogen®) por pozo. La reacción se detuvo pasados 30 minutos con 50 µl de HCL 1N. La microplaca se leyó a 450 nm en un lector de placas Tecan GENios™ Microplate Reader (Tecan, Suiza). Cada ensayo se realizó por duplicado.

Para evaluar la especificidad del ELISA, se realizaron cuatro ensayos: i) se evaluó el sistema de inmunodetección en ausencia de anticuerpo de captura sensibilizando la placa con BSA; ii) se evaluó el reconocimiento del anticuerpo secundario (anti-IgG humana) por parte del anticuerpo de captura en ausencia de la muestra de suero; iii) se evaluó si el sistema de inmunodetección reconocía tanto la molécula de insulina como la del anticuerpo antiinsulínico de manera individual (no como parte de un complejo inmunitario), y iv) se evaluó el sistema de captura en ausencia de anti-IgG humana.

Formación in vitro de complejos inmunitarios de anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena. Con el fin de establecer un control positivo que permitiera comprobar que el sistema de captura estandarizado era capaz de detectar los complejos inmunitarios constituidos por anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena, se planteó su formación in vitro. Para ello se incubaron 366,8 µg de las IgG del suero de un paciente diabético (previamente depuradas con ácido caprílico y precipitadas con sulfato de amonio) con 69,12 µg de cada insulina (la formación de complejos fue independiente para cada insulina analizada). Los volúmenes de IgG e insulina incubados para la formación de los complejos se establecieron partiendo de sus molaridades, de tal manera que por cada molécula de IgG hubiera dos moléculas de insulina. Se incubó en agitación constante durante 1 hora a 37 °C antes después de la incubación a 4 °C durante 16 horas. La confirmación de la formación in vitro de los complejos inmunitarios se hizo mediante dos corridas electroforéticas de geles de poliacrilamida al 12,5 % en condiciones no desnaturizantes y reductoras, y sus respectivos Western blot para la detección de insulina e IgG humana.

Electroforesis en condiciones desnaturizantes y no desnaturizantes. Para evidenciar la formación in vitro de complejos inmunitarios de anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena, se corrieron cuatro geles de poliacrilamida al 12,5 % (dos en condiciones no desnaturizantes y dos en condiciones desnaturizantes y reductoras). En cada pozo se colocaron 10 µl de muestra que correspondían a 103 µg de cada uno de los complejos formados in vitro por los anticuerpos antiinsulínicos y la insulina regular, la NPH y la glargina y 3 µl de solución de carga de manera individual. Una réplica de los geles no desnaturizantes y una de los geles desnaturizantes y reductores se tiñeron con una solución de azul de Coomassie® R-250 (Merck, Alemania) disuelto en metanol y ácido acético (Merck, Alemania) durante 20 minutos y se decoloró con metanol al 40 %.

Las corridas electroforéticas se llevaron a cabo en cámaras de electroforesis Mini-PROTEAN® (Bio-Rad®, CA, USA). Las muestras corridas en condiciones no desnaturizantes se mezclaron con solución de carga no desnaturizante (0,5 M de Tris-HCl, pH 6,8, glicerol, 0,5% (p/v), azul de bromofenol y agua destilada) y las muestras corridas en condiciones desnaturizantes y reductoras se mezclaron con solución Laemli (0,5 M Tris-HCl, pH 6,8, glicerol, 10 % (p/v) SDS, 0,5 % (p/v)), azul de bromofenol (Merck, Alemania) y beta-mercaptoetanol (Merck, Alemania) y se hirvieron durante 5 minutos. Los geles de electroforesis en condiciones desnaturizantes y reductoras se corrieron a 100 V durante una hora a temperatura ambiente. Los geles en condiciones nativas se corrieron a 150 V durante 2 horas en cámara de electroforesis Mini-PROTEAN® Tetra Cell (Bio-Rad®, CA, USA).

Western blot para insulina e IgG. Para confirmar la presencia de los complejos inmunitarios formados in vitro, las réplicas del gel de poliacrilamida al 12,5 %, corrido

en condiciones no desnaturizantes y en condiciones desnaturizantes y reductoras, se transfirieron a membranas de nitrocelulosa (Trans-Blot® Transfer Medium, Pure Nitrocellulose Membrane, 0.45 mm; Bio-Rad®) durante 3,5 horas a 10 V, utilizando el sistema de transferencia Trans-Blot® SD Semi-Dry Electrophoretic Transfer Cell (Bio-Rad®, CA, USA). Las membranas se bloquearon con leche descremada al 5 % en PBS-T durante 1 hora a 37 °C. Se lavaron cuatro veces con PBS-T y, posteriormente, se incubaron a 37 °C durante 1 hora con la mezcla de los sueros anti-insulinas exógenas de conejo (anti-regular, anti-NPH y anti-glargina) producidos en el laboratorio durante el desarrollo de este trabajo en una dilución de 1/100 en leche al 3 % y PBS-T; a continuación se lavaron para retirar el exceso de anticuerpo y se incubaron durante 1 hora con anti-IgG de conejo conjugado con peroxidasa (Invitrogen®, CA, USA) en una dilución de 1/5000 en leche al 3 % y PBS-T, y se lavaron y se revelaron con carbazol y peróxido de hidrógeno como sustrato; una vez aparecidas las bandas, las membranas se volvieron a lavar y se capturaron las imágenes fotográficas. Para continuar con el proceso de confirmación, las membranas se incubaron durante 1 hora con anti-IgG humana conjugada con peroxidasa (Invitrogen®, CA, USA) en una dilución de 1/10.000 en leche al 3 % y PBS-T; posteriormente, se lavaron para retirar el exceso de anticuerpo y se revelaron con carbazol y peróxido de hidrógeno y, una vez aparecidas las bandas, las membranas se volvieron a lavar para capturar las imágenes fotográficas.

Análisis de datos

Las densidades ópticas obtenidas del control negativo utilizado en este protocolo (solo diluyente, sin suero, expresado como un promedio del duplicado), se restaron de aquellas obtenidas de las muestras de suero de los pacientes con diabetes tipo 2 y de aquellos con niveles normales de glucemia. Para determinar el valor de absorbancia a partir del cual se debe considerar la posible presencia de anticuerpos antiinsulínicos (punto de corte), se usó el promedio de las densidades ópticas obtenidas por los sueros de los voluntarios sin diabetes tipo 2 (controles negativos) frente a cada formulación, más dos desviaciones estándar (DE). Para compensar la variabilidad entre las placas, las densidades ópticas de las muestras de los pacientes con diabetes tipo 2 bajo tratamiento con insulina, se normalizaron con el promedio de aquellas de las muestras de los controles después de calcular el índice de reconocimiento, definido como el cociente de las densidades ópticas obtenidas de cada suero de los pacientes con diabetes tipo 2 (DOd) sobre la media de las de los sueros de los controles (DOc), en las que los valores superiores a 1 sugieren la presencia de anticuerpos antiinsulínicos y los menores a 1 indican la ausencia de dichos anticuerpos. Se estableció un rango de incertidumbre entre 0,8 y 1,2.

$$IR = DOd/DOc$$

Los datos se analizaron usando el programa estadístico GraphPad Prism®, versión 5.0 (GraphPad Software, USA). Se utilizó estadística descriptiva no paramétrica para detallar las características de los grupos experimentales. Mediante la prueba Anova de una vía se compararon los grupos experimentales, y la prueba de Bonferroni se usó para los índices de reconocimiento, los niveles de glucemia en ayunas y después de ingerir alimento y para el %HbA1C. Los resultados se consideraron significativos cuando p fue menor de 0,05.

Consideraciones éticas

Según las categorías establecidas en el Artículo 11 de la Resolución 008430 de 1993, del Ministerio de Salud, este trabajo de investigación se clasificó como investigación de riesgo mínimo, ya que se emplearon datos obtenidos a través de procedimientos comunes como exámenes de laboratorio y de tratamientos rutinarios como la extracción de sangre por punción venosa en adultos en buen estado de salud, con frecuencia máxima de dos veces a la semana, y la administración de insulina como medicamento de uso común con dosis y vías de administración medicamente establecidas. El profesional a cargo explicó a todos los participantes el procedimiento al que se les sometería y estos firmaron el consentimiento informado. La formación de anticuerpos antiinsulínicos en conejos de laboratorio se indujo siguiendo las pautas estrictas para el cuidado y la manipulación de los animales; además, se observó un adecuado manejo del material de riesgo biológico. El trabajo contó con el aval del Comité de Ética de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional (Acta 08 del 12 de diciembre de 2011).

Resultados

Caracterización de los grupos experimentales. Con el ánimo de caracterizar los grupos experimentales definidos para la detección de anticuerpos antiinsulínicos, los 29 pacientes con diabetes tipo 2 se clasificaron en tres grupos según su tratamiento: i) insulina regular y NPH, ii) NPH y iii) glargina. Se analizaron los datos obtenidos de sus historias clínicas y los parámetros bioquímicos evaluados en sus muestras de suero. En primera instancia, se analizó la edad, el sexo y el índice de masa corporal (IMC), y no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la edad y el sexo, aunque sí un aumento en el IMC, siendo este mayor en el grupo tratado con insulina regular y NPH y menor en los tratados con NPH (Tabla 1), aunque sin una diferencia estadísticamente significativa. Al evaluar las variables relacionadas con el diagnóstico y el tratamiento de la diabetes: tiempo de diagnóstico, tiempo del tratamiento con insulina y dosis diaria, se encontró que el grupo tratado con la mezcla de insulina regular y NPH registró los valores más altos en las variables mencionadas (Tabla 1) sin ser esta asociación estadísticamente significativa. Al analizar los parámetros bioquímicos: porcentaje de

Tabla 1. Características generales y parámetros metabólicos de los pacientes con diabetes tipo 2 según su tratamiento con insulina

Variables	Tratamiento			
	Total	Regular y NPH	NPH	Glargina
	n= 29	n= 10	n=9	n=10
Edad (años)	54,6 (16,3)*	58,0 (21,3)	49,4 (17,3)	55,7 (8,0)
Sexo (M/F)	17/12	6/4	5/4	6/4
Índice de masa corporal (Kg/m ²)	28,3 (4,7)	25,8 (3,3)	31,5 (5,9)	28,0 (2,9)
Diagnóstico de diabetes (años)	14,0 (9,0)	19,4 (10,9)	9,4 (7,0)	12,8 (5,8)
Tiempo de tratamiento con insulina (años)	6,0 (4,6)	10,4 (4,0)	3,5 (2,7)	4,1 (5,0)
Dosis total de insulina (UI/d)	38,5 (17,2)	46,1 (24,0)	36,8 (13,0)	27,8 (9,9)
HbA1C (%)	9,1 (2,2)	9,2 (2,4)	8,8 (1,8)	9,2 (2,4)
Glucemia pre (mg/dl)	165,6 (92,9)	184,2 (143,2)	142,4 (35,9)	167,7 (65,2)
Glucemia post (mg/dl)	248,4 (116,9)	239,0 (142,7)	213 (91,8)	289,1 (107,2)

*Los datos representan la media ± la desviación estándar

hemoglobina glicosilada (%HbA1C), glucemia en ayunas (glucemia pre) y 120 minutos después de la ingestión de alimentos (glucemia post), no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos (Tabla 1). El porcentaje de hemoglobina glicosilada fue mayor a 8 en todos los grupos, lo que permitió clasificar a los pacientes como no controlados.

Inmunodetección y caracterización de la reactividad de los anticuerpos antiinsulínicos. Con el fin de detectar los anticuerpos antiinsulínicos y caracterizar su reactividad frente a tres formulaciones comerciales de insulina humana, se evaluó en cada muestra de suero la presencia de anticuerpos antiinsulínicos mediante ELISA indirecto. Para establecer a partir de qué densidad óptica se registraba el reconocimiento positivo de anticuerpos antiinsulínicos, se estableció un punto de corte para cada formulación correspondiente al promedio de las densidades ópticas obtenidas de 10 sueros de los controles, más la suma de dos desviaciones estándar. El punto de corte para los sueros reactivos frente a las insulinas regular, NPH y glargina fue de 0,270, 0,346 y 0,256, respectivamente (Figura 1 A-C). Según los resultados, en 20 de los sueros de los 29 pacientes con diabetes tipo 2 en tratamiento con insulina, se reconoció al menos una de las insulinas evaluadas, lo cual sugirió la presencia de anticuerpos antiinsulínicos en 68,9 % de los pacientes. Además, se encontró que siete sueros (70 %) del grupo tratado con la mezcla de insulina regular y NPH reconocieron la insulina regular y nueve (90 %), la insulina NPH (Figura 1 A y B, respectivamente), evidenciando un reconocimiento preferencial de la insulina NPH. Por otro lado, en el grupo tratado con NPH, siete sueros (77,7 %) reconocieron esta misma formulación (Figura 1B) y en el grupo tratado con glargina, cuatro sueros (40 %) reconocieron la insulina glargina (Figura 1 C).

Para caracterizar la reactividad de los anticuerpos antiinsulínicos frente a las tres insulinas analizadas y asociarla con el tratamiento que recibían los pacientes, se normalizaron las densidades ópticas de cada voluntario

diabético con el promedio de aquellas de los sueros de los controles calculando el índice de reconocimiento. El reconocimiento de la insulina NPH fue mayor y altamente significativo en los individuos tratados con la combinación de insulina regular e insulina NPH (Figura 1D). Llama la atención que esto no sucedió en el grupo tratado con NPH y, aunque se observó un reconocimiento preferencial por este tipo de insulina, los datos obtenidos no fueron estadísticamente significativos (Figura 1 E). Al analizar los índices de reconocimiento obtenidos para cada formulación, se observó el reconocimiento cruzado de la insulina NPH y la insulina regular en cinco sueros (55 %) de los tratados y la glargina en dos sueros (22,2 %), aunque este no fue significativo (Figura 1 E). A pesar de que el grupo tratado con glargina presentó índices de reconocimiento más bajos que los obtenidos en los demás grupos experimentales, se evidenció un leve, aunque no significativo, reconocimiento de la NPH y la insulina regular, en tanto que fue muy bajo para la glargina (Figura 1 F).

Evaluación del perfil de las subclases de IgG de los anticuerpos antiinsulínicos en pacientes con diabetes tipo 2. Como parte de la caracterización de los anticuerpos antiinsulínicos, se evaluó el perfil de subclases de IgG para cada insulina mediante un ELISA indirecto. Los resultados obtenidos se analizaron calculando los índices de reconocimiento de las subclases de IgG para cada insulina (regular, NPH y glargina). Para analizar el efecto del tratamiento con insulina sobre el perfil de las subclases de IgG, los datos obtenidos se graficaron según el tratamiento que estuvieran recibiendo los pacientes (Figura 2), lo que permitió observar que los anticuerpos antiinsulínicos presentes en los sueros del grupo tratado con la mezcla de insulinas regular y NPH fueron predominantemente de la subclase IgG3 (Figura 2 D).

Formación in vitro de complejos inmunitarios de anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena. Para evidenciar la presencia de complejos inmunitarios después de la incubación de cada insulina con IgG purificadas, se corrieron

cuatro geles de poliacrilamida al 12,5 %: dos en condiciones no desnaturizantes y dos en condiciones desnaturizantes y reductoras (Figura 3A y 3D, respectivamente). Uno de los geles no desnaturizantes y uno de los desnaturizantes y reductores se tiñeron con azul de Coomassie y ello evidenció una banda a la altura de los 150 kDa compatible con la masa molecular de la inmunoglobulina G (IgG) (Huber, 1980) para el primer caso en los cuatro carriles (carril 1: anticuerpos antiinsulínicos e insulina regular; carril 2: anticuerpos antiinsulínicos y NPH; carril 3: anticuerpos antiinsulínicos y glargina, y carril 4: anticuerpos antiinsulínicos únicamente). Cabe destacar que en el carril 3 se evidenció una banda de 6 kDa, aproximadamente, compatible con la masa molecular de la insulina, en este caso, la glargina (Figura 3A). El hecho de que en el gel no reductor donde se sembraron los complejos formados por los anticuerpos antiinsulínicos y la insulina regular y los anticuerpos antiinsulínicos y la NPH (carriles 1 y 2, respectivamente), solo se evidenció una banda a la altura de los 150 kDa, lo cual sugiere la posible formación de complejos inmunitarios, ya que de no ser así, se esperaría que corrieran la banda de IgG (banda de 150 kDa) y de insulina (banda de 6 kDa) por separado,

como se evidenció en el carril 3, en el cual se colocó el complejo formado por los anticuerpos antiinsulínicos y la glargina (Figura 3A). Aunque en este caso se evidenció la banda de insulina (anticuerpos antiinsulínicos y glargina), no se descarta la formación de complejos inmunitarios. La ausencia de la banda de 6 kDa en los carriles 1 y 2 podría deberse a la salida de la insulina del gel durante la corrida electroforética, sin embargo, esto es poco probable teniendo en cuenta que el tiempo y el voltaje aplicados se estandarizaron para evitar la salida de la insulina del gel.

En el gel corrido en condiciones desnaturizantes y reductoras se observaron tres bandas en los carriles 1 a 3, las primeras a la altura de los 55 y los 25 kDa (Huber, 1980), y la última a la altura de los 6 kDa, aproximadamente, datos compatibles con las masas moleculares de las cadenas pesadas y livianas de la IgG y de la insulina, respectivamente (Figura 3D). En el carril 4 de este gel solo se observaron las primeras bandas a la altura de los 55 y los 25 kDa, resultado que se esperaba, ya que en este carril solo se colocó la IgG. Los resultados obtenidos tanto en el gel no desnaturizante como en el desnaturizante y reductor sugieren la formación de complejos inmunitarios con las insulinas regular y NPH,

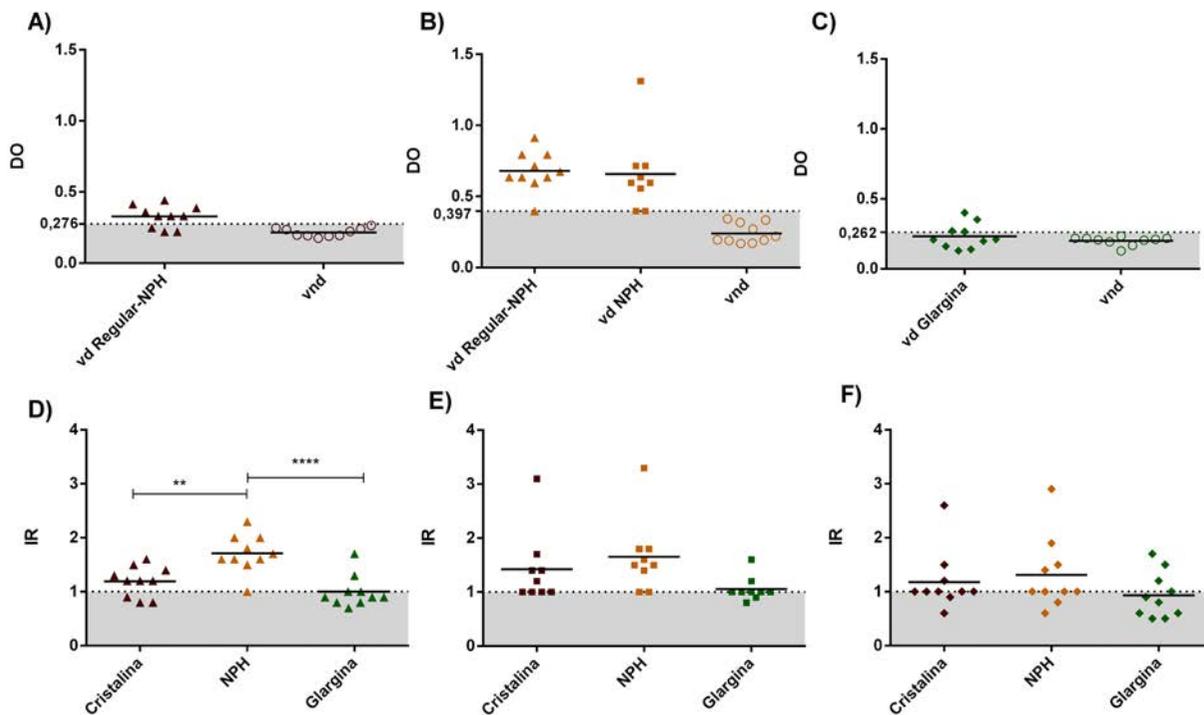


Figura 1. Inmunodetección de anticuerpos antiinsulínicos y caracterización de su reactividad frente a tres formulaciones de insulina exógena humana. Mediante métodos inmunológicos se detectaron anticuerpos antiinsulínicos en sueros de pacientes con diabetes tipo 2 tratados con las insulinas: **A)** regular y NPH, **B)** regular y NPH y NPH, y **C)** glargina, los cuales se evaluaron frente a las insulinas: **A)** regular, **B)** NPH y **C)** glargina. La reactividad de los anticuerpos antiinsulínicos frente a las tres formulaciones evaluadas también se graficó usando el índice de reconocimiento calculado para los pacientes tratados con las insulinas: **D)** regular y NPH, **E)** NPH y **F)** glargina, y se evaluaron frente a las insulinas regular, NPH y glargina tomadas individualmente. Los ensayos se hicieron por duplicado en tres ocasiones y muestran la desviación estándar para cada punto. Las gráficas de la **A** a la **C** muestran la media de las densidades ópticas para cada grupo experimental y el punto de corte para cada insulina evaluada. Las gráficas de la **D** a la **F** muestran la media de los índices de reconocimiento para cada grupo experimental y cada insulina evaluada. Se presenta un ensayo representativo realizado por duplicado, con la media y los valores individuales. Vd: Voluntarios diabéticos; Vnd: voluntarios no diabéticos.

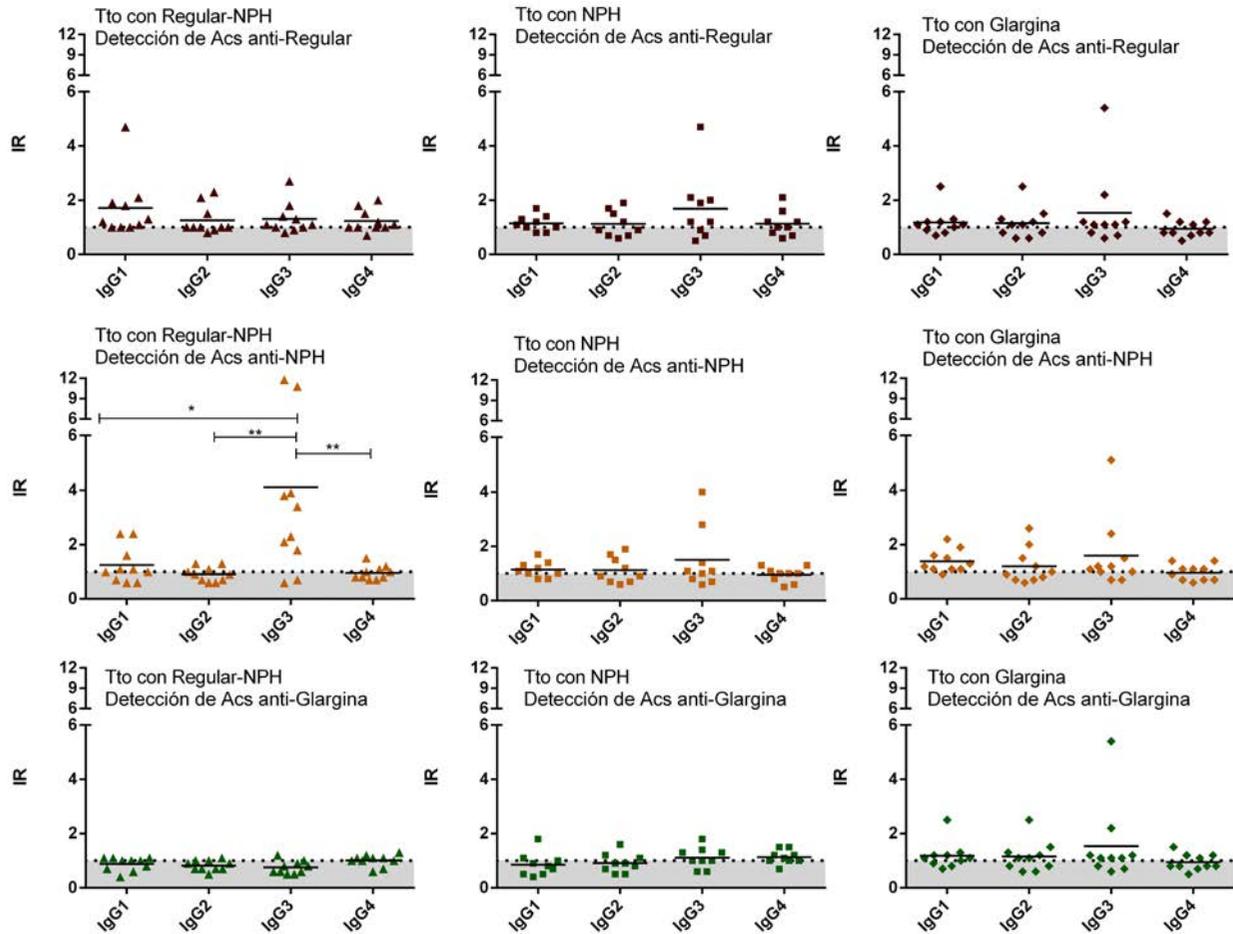


Figura 2. Perfil de las subclases de IgG de los anticuerpos antiinsulínicos según el tratamiento con insulina que recibían los pacientes y para las tres formulaciones de insulina analizadas. **A)** Pacientes en tratamiento con insulina regular y NPH evaluados para la insulina regular. **B)** Pacientes en tratamiento con insulina NPH y evaluados para la insulina regular. **C)** Pacientes en tratamiento con insulina glargina y evaluados para la insulina regular. **D)** Pacientes en tratamiento con insulina regular y NPH evaluados para insulina NPH. **E)** Pacientes en tratamiento con insulina NPH evaluados para insulina NPH. **F)** Pacientes en tratamiento con insulina glargina evaluados para insulina NPH. **G)** Pacientes en tratamiento con insulina regular y NPH evaluados para la insulina glargina. **H)** Pacientes en tratamiento con insulina NPH evaluados para insulina glargina. **I)** Pacientes en tratamiento con insulina glargina evaluados para insulina glargina. Cada punto representa el índice de reconocimiento de una muestra contra la subclase de IgG analizada. Los ensayos se hicieron por duplicado en dos experimentos diferentes. Se muestra la media del grupo y los valores individuales (promedio del duplicado de cada paciente). Tto: tratamiento

ya que en condiciones no desnaturizantes solo se observó la banda a la altura de los 150 kDa, en tanto que en condiciones desnaturizantes (temperatura de ebullición) y reductoras (presencia de β -mercaptoetanol), se observaron tres bandas compatibles con las masas moleculares de la insulina y las cadenas livianas y pesadas de las IgG.

Para confirmar los resultados obtenidos en los geles de electroforesis, los cuales sugerían la formación in vitro de complejos inmunitarios, se transfirieron sus réplicas a membranas de nitrocelulosa y se revelaron en un primer momento con anticuerpos antiinsulínicos producidos en conejo (anti-regular, anti-NPH y anti-glargina), como se muestra en la Figura 3B y 3E, y en un segundo momento se revelaron con anti-IgG humana como se muestra en la figura 3C y 3F, lo cual evidenció la presencia de insulina a

la altura de los 150 kDa en la membrana en condiciones no desnaturizantes (Figura 3B) y a la altura de los 55, 25 y 6 kDa en la membrana y en condiciones desnaturizantes y reductoras, en los carriles 1 a 3 (Figura 3E). Cuando se reveló con anti-IgG humana se intensificaron las bandas observadas a la altura de los 150 kDa en condiciones no desnaturizantes, y a la altura de los 55 y los 25 kDa en condiciones desnaturizantes y reductoras. Estos resultados confirman la formación in vitro de complejos inmunitarios de anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena (en el caso de las tres insulinas analizadas), y sugieren su posible uso como control positivo en el ELISA de captura.

Detección de complejos inmunitarios (anticuerpos anti-insulínicos e insulina exógena) en pacientes con diabetes tipo 2. Aunque la circulación de anticuerpos antiinsulínicos

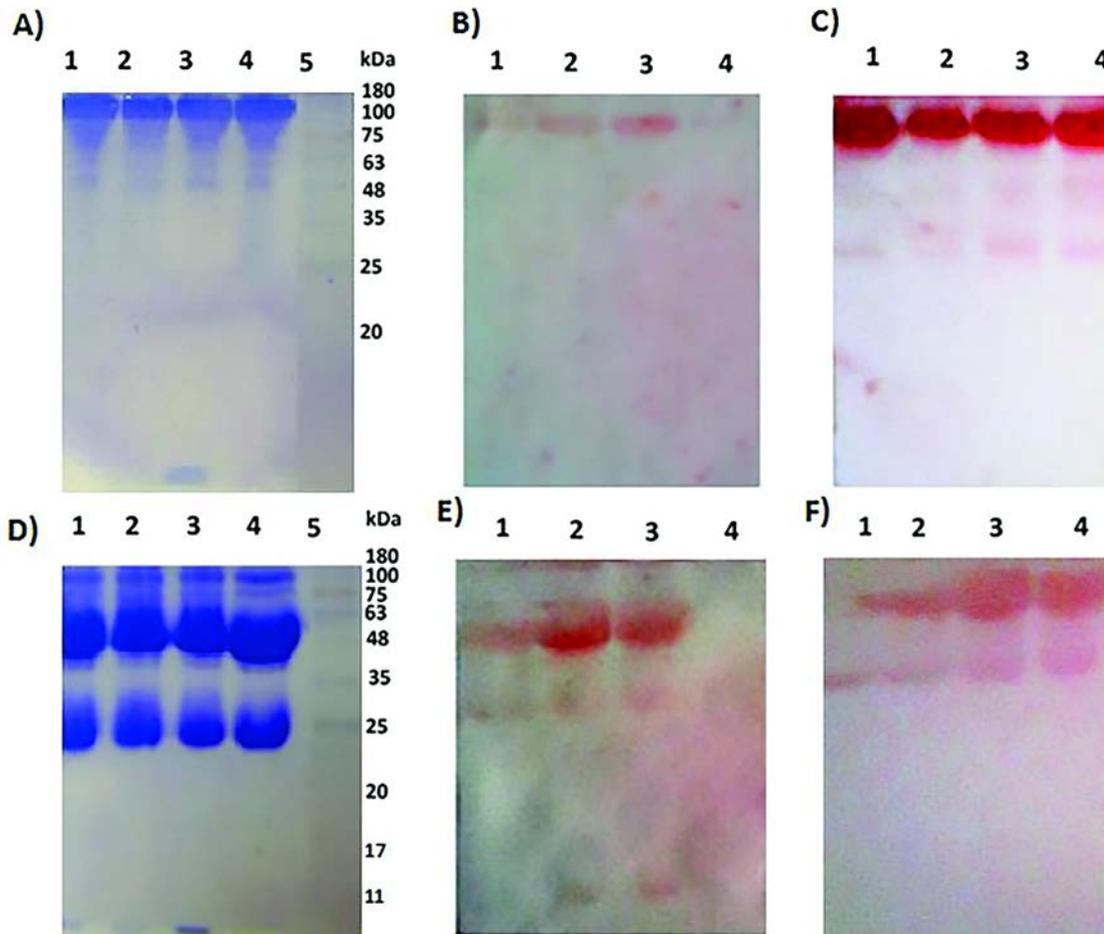


Figura 3. Formación in vitro de complejos inmunitarios de anticuerpos antiinsulínicos-e insulina exógena. La evaluación de los complejos formados in vitro se hizo mediante: **A)** gel de electroforesis al 12,5 % en condiciones no desnaturalizantes; **B)** Western blot para la inmunodetección de insulina en condiciones no desnaturalizantes; **C)** Western blot para la inmunodetección de IgG en condiciones no desnaturalizantes; **D)** gel de electroforesis al 12,5 % en condiciones desnaturalizantes y reductoras; **E)** Western blot para la inmunodetección de insulina en condiciones desnaturalizantes y reductoras, y **F)** Western blot para la inmunodetección de IgG en condiciones desnaturalizantes y reductoras. **Carril 1:** complejos formados in vitro por anticuerpos antiinsulínicos e insulina regular; **carril 2:** por anticuerpos antiinsulínicos e insulina NPH; **carril 3:** por anticuerpos antiinsulínicos e insulina glargina; **carril 4:** anticuerpos antiinsulínicos, y el **carril 5** corresponde al patrón de masa molecular. Las fotografías se tomaron de un ensayo representativo.

y su correspondiente antígeno (insulina exógena) favorecen la formación de complejos inmunitarios que pueden mantenerse en circulación durante largos periodos y acumularse en vasos sanguíneos pequeños, hasta el momento ello no se ha evidenciado como relevante y en muy pocos casos se ha reportado la aparición de microangiopatías y complicaciones secundarias en la diabetes (Irvine, *et al.*, 1978). En este estudio se estandarizó y se evaluó un sistema para la detección de tales complejos inmunitarios mediante ELISA de captura, con el fin de analizar la capacidad de formación de complejos inmunitarios de los anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena. Las muestras de suero se evaluaron en cuatro puntos de tiempo: 1) en ayuno y antes de administrar el tratamiento con insulina (0 minutos); 2) 30 minutos después de administrar la insulina y de haber ingerido alimento (30 minutos); 3) una hora después de administrada la insulina

(60 minutos), y 4) dos horas después de administrada la insulina (120 min). Con el fin de determinar a partir de cuál densidad óptica se registraba la presencia de un complejo inmunitario, se estableció un punto de corte para cada sistema, correspondiente al promedio de las densidades ópticas obtenidas de los diez sueros de los controles más la suma de dos desviaciones estándar. Así, el punto de corte para el sistema de detección de complejos formados por anticuerpos antiinsulínicos e insulina regular, NPH y glargina fue de 0,194 (Figura 4A), 0,178 (Figura 4B y 4C) y 0,165 (Figura 4D), respectivamente. Los resultados obtenidos permitieron establecer que en ninguna de las muestras de los pacientes bajo tratamiento con insulina se detectaron complejos, lo cual puede deberse a que pocos, o ninguno, se forman en condiciones naturales, a la gran efectividad de un proceso natural de depuración, o a la poca sensibilidad del sistema

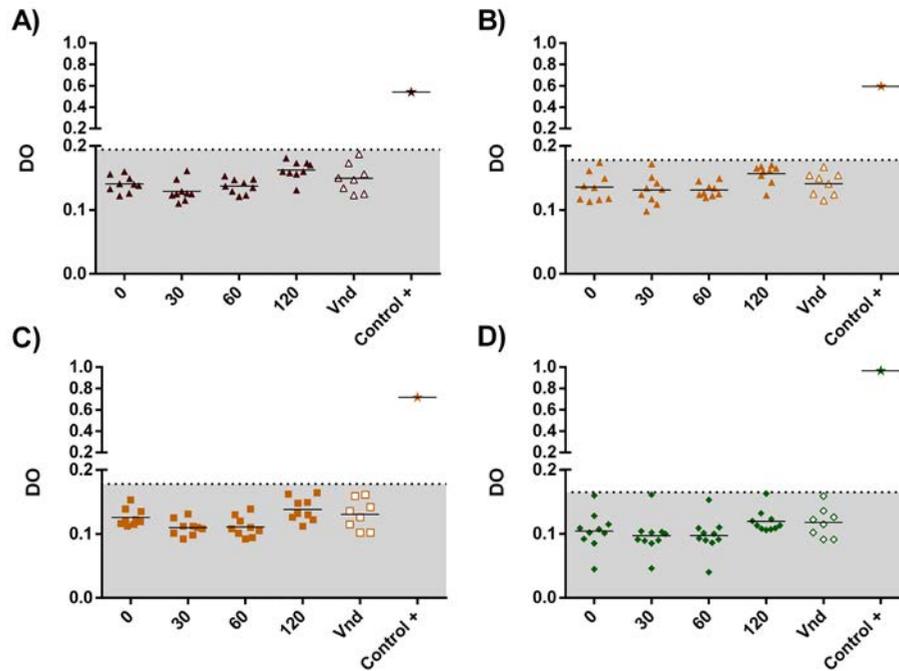


Figura 4. Inmunodetección de complejos inmunitarios antes y después de la administración de insulina exógena. **A)** Grupo en tratamiento con insulinas regular y NPH evaluado mediante la detección de complejos constituidos por anticuerpos antiinsulínicos e insulina regular. **B)** Grupo tratado con insulinas regular y NPH evaluado mediante la detección de complejos constituidos por anticuerpos antiinsulínicos y NPH. **C)** Grupo en tratamiento con insulina NPH evaluado mediante la detección del complejo constituido por anticuerpos antiinsulínicos y NPH. **D)** Grupo en tratamiento con insulina glargina evaluado mediante la detección del complejo constituido por anticuerpos antiinsulínicos y glargina. Las gráficas muestran la media de las densidades ópticas versus el tiempo en el que se tomó la muestra de los pacientes con diabetes tipo 2, así como del grupo de voluntarios no diabéticos y del control positivo (complejos formados in vitro), y la línea de corte para cada sistema de detección. Se presenta un ensayo representativo realizado por duplicado, y la media y los valores individuales. Vnd: voluntarios no diabéticos

de detección empleado en este estudio. Debe señalarse que más allá de otorgarle relevancia a los complejos inmunitarios, en este estudio se pretendió demostrar si hay algún tipo de insulina exógena que se relacione más con la formación de dichos complejos, los que, sometidos al posterior análisis de avidéz y afinidad, permitirían comprender mejor los casos de poca eficacia de la insulina exógena, así como la relación entre dichos complejos y la hipoglucemia (fulminante en algunos casos) (Zhao, *et al.*, 2010; Itoh, *et al.*, 2011; Koyama, *et al.*, 2005)

Análisis de los valores de glucemia e insulinemia antes y después de la administración de insulina exógena. Se tomó una muestra de sangre de cada paciente diabético en cuatro puntos de tiempo: 1) en ayuno y antes de administrar el tratamiento con insulina; 2) 30 minutos después de la administración de la insulina y de haber ingerido alimento; 3) 60 minutos después de administrada la insulina, y 4) 120 minutos después de administrada la insulina.

Los niveles de glucemia cuantificados en las cuatro muestras tomadas del grupo tratado con las insulinas regular y NPH registraron un leve aumento en los niveles de glucosa a los 30 minutos de administrado el alimento y disminuyeron levemente a los 120 minutos (Figura 5A). Estos niveles aumentaron con los niveles de insulina pasados 30

minutos y se mantuvieron hasta los 120 minutos (Figura 5D); fueron compatibles con la farmacocinética descrita para la insulina regular (acción rápida) y la insulina NPH (acción intermedia) (Eyzaguirre, *et al.*, 2006).

La curva de glucosa del grupo en tratamiento con NPH registró la mayor concentración a los 60 minutos, la cual declinó brevemente al terminar los 120 minutos (Figura 5B). Estos resultados se asociaron con el inicio de la acción que ha sido reportado para la insulina NPH (insulina de acción intermedia). La curva de insulina para la mayoría de los pacientes del grupo tuvo un perfil similar, cuyo valor máximo se registró en los primeros 60 minutos y se mantuvo hasta los 120 minutos (Figura 5E). Estos datos se asocian con la farmacocinética de la insulina NPH, cuya acción se inicia una hora después de la administración con pico entre las 4 y las 10 horas (Eyzaguirre, *et al.*, 2006).

Los niveles de glucosa más altos de la curva para el grupo tratado con glargina se detectaron aproximadamente a los 60 minutos y comenzaron a declinar levemente al llegar a los 120 minutos (Figura 5C), datos que se asocian con los niveles de insulina, los cuales se mantuvieron constantes pasados los 60 minutos en la mayoría de los individuos de este grupo (Figura 5F). Aunque no se obtuvieron datos después de los 120 minutos de la administración de la insulina, el

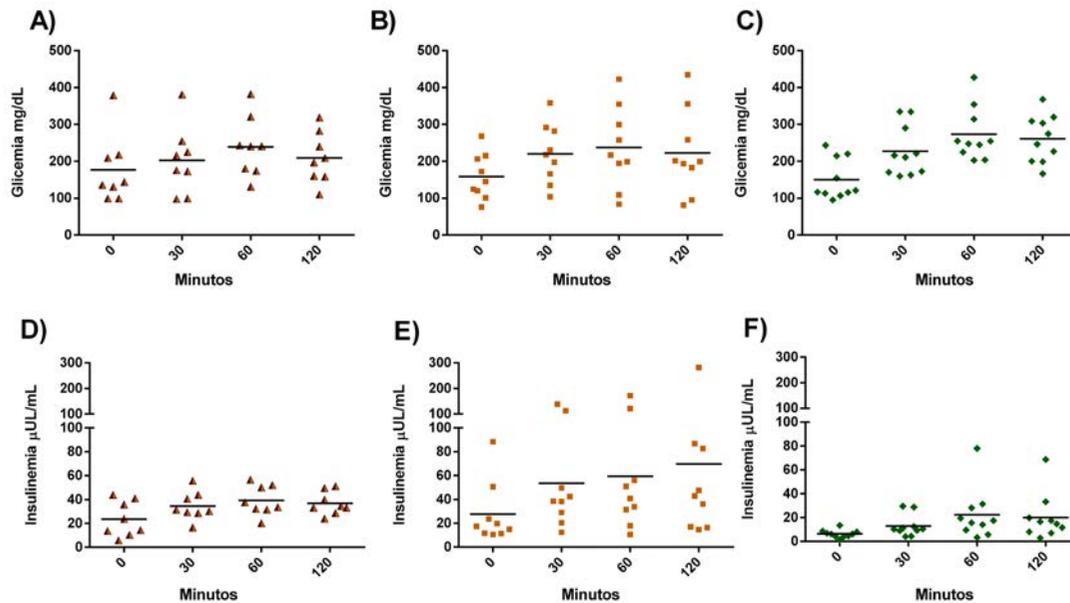


Figura 5. Glucemia e insulinemia antes y después de la administración de insulina exógena. Se cuantificaron los niveles de glucemia e insulinemia en las muestras de suero tomadas en cuatro puntos de tiempo: 1) en ayuno y antes de administrar la insulina (minuto 0); 2) 30 minutos después de administrar la insulina y de haber ingerido alimento (30 minutos); 3) 60 minutos después de administrar la insulina (60 minutos), y 4) 120 minutos después de administrar la insulina (120 minutos). **A y D)** Grupo tratado con las insulinas regular y NPH. **B y E)** Grupo tratado con la insulina NPH. **C y F)** Grupo tratado con la insulina glargina. Las gráficas muestran la media y los valores individuales.

perfil de la gráfica corresponde a la farmacocinética de la insulina glargina, cuya acción es prolongada y se inicia a la hora y media sin presentar oscilaciones (Vajo, et al., 2001).

Discusión

Según los resultados obtenidos, el 68,9 % de los sueros de pacientes con diabetes tipo 2 bajo tratamiento con insulina reconocieron, como mínimo, una de las insulinas analizadas, lo cual sugiere la presencia de anticuerpos antiinsulínicos. Estos datos contrastan con los obtenidos en grupos experimentales de pacientes con diabetes tipo 1 tratados con insulinas humanas recombinantes, en quienes se reportan prevalencias entre 14 y 44 % de anticuerpos antiinsulínicos (Scherthaner, et al., 1983; Heding, et al., 1984). Las diferencias encontradas podrían atribuirse a características propias de la técnica o a las de la población analizada en cada estudio. Los datos reportados en estudios previos se obtuvieron empleando el radioinmunoensayo, técnica capaz de detectar títulos de anticuerpos antiinsulínicos más bajos que el ELISA (Dib, et al., 1994; Sodoyez, et al., 1988). Podría plantearse, asimismo, que las diferencias entre este estudio y los reportes previos estarían relacionadas con la etiología de la diabetes de tipo 1 y la de tipo 2, ya que los estudios anteriores se hicieron en pacientes con diabetes tipo 1 en tanto que en este se trataba de pacientes con la de tipo 2.

Cabe mencionar que nuestros resultados evidenciaron un reconocimiento elevado de los sueros de los pacientes tratados con NPH (ya fuera mezclada con insulina regular o sola), y uno muy bajo de los sueros de los pacientes tratados con glargina frente a las insulinas analizadas, lo

cual sugeriría un mayor potencial inmunogénico de la insulina NPH comparada con la glargina. En el caso de la insulina NPH, la presencia de moléculas de protamina (un péptido catiónico de 5.000 daltons rico en arginina) en su formulación podría ser una de las variables favorecedoras de su perfil inmunogénico. La protamina se ha relacionado con la producción de inmunoglobulinas IgG e IgE después de la administración intravenosa de una dosis única (Nyhan, et al., 1996; Weiss, et al., 1989). En cuanto al bajo reconocimiento de los anticuerpos antiinsulínicos por la glargina, se ha sugerido que modificaciones en la secuencia aminoacídica de la insulina, como la adición de dos argininas en las posiciones 31 y 32 de la cadena B y el reemplazo de ácido aspártico por una glicina en la posición 21 de la cadena A, disminuyen su potencial inmunogénico, ya sea directamente (eliminado epítopes inmunogénicos) o indirectamente (modificando su farmacocinética). Los datos aquí obtenidos concuerdan con reportes previos sobre la poca inmunogenicidad de la formulación de la glargina, con la cual los pacientes tratados por más de un año no reflejan un aumento en la producción de anticuerpos antiinsulínicos (Pieber, et al., 2000).

Otro dato interesante es la diferencia entre el reconocimiento de los sueros de los individuos tratados con la combinación de insulina regular y NPH (mayor y altamente significativo) y los sueros de los individuos tratados con la insulina NPH (menor y no significativo) frente a la insulina NPH, lo cual podría deberse a varias situaciones: 1) la formación de nuevos epítopes en la mezcla de insulina regular y NPH que potencializarían la inmunogenicidad de

NPH; 2) el tiempo prolongado del tratamiento con insulina del grupo tratado con regular y NPH, ya que cuanto mayor es la exposición al antígeno (insulina exógena) mayor es la probabilidad de que aumente la afinidad y, por ende, la especificidad de los anticuerpos antiinsulínicos, y 3) la mayor dosis de insulina administrada en este grupo, situación que condiciona la respuesta inmunitaria frente a este potencial antígeno (Ratanji, *et al.*, 2014).

En cuanto al perfil de subclases de IgG, los anticuerpos antiinsulínicos presentes en los sueros del grupo tratado con la mezcla de insulina regular y NPH fueron predominantemente de la subclase IgG3 (Figura 3D). Aunque este resultado coincide con reportes previos, en los cuales se detectó esta subclase en anticuerpos antiinsulínicos (Andersen, 1976; Soto, *et al.*, 1991), es importante mencionar que no se ha reportado la IgG3 como predominante, ya que en los artículos consultados se señala que la subclase IgG1 como la dominante, seguida por la IgG3 y la IgG4 y, en menor concentración, la IgG2 (Andersen, 1976; Koch, *et al.*, 1986). Las diferencias entre los perfiles según la subclase de IgG encontrados en el presente estudio y los de reportes previos podrían estar relacionadas con las diferencias en la etiología de la diabetes mellitus de tipo 1 y la de tipo 2, teniendo en cuenta que el perfil de IgG reportado anteriormente se evaluó en pacientes con diabetes tipo 1 y en este estudio se evaluó en pacientes con diabetes tipo 2. Asimismo, llama la atención que el único grupo experimental en el que se observó una prevalencia de la subclase IgG3 fue el grupo tratado con la mezcla de insulina regular y NPH, lo cual podría estar relacionado con la posible formación de neoepítopes en dicha mezcla o con características propias de este grupo experimental. Entre las propiedades de la subclase IgG3 se ha descrito su producción como respuesta al estímulo de antígenos proteínicos (Devey, 1988) y su gran eficiencia en la activación de la vía C1 del complemento (Jefferis, *et al.*, 1990). En cuanto a la importancia clínica de los niveles altos de IgG3, esta se ha reportado como la subclase predominante para los anticuerpos anti-Rh conjuntamente con la IgG1 en la enfermedad hemolítica del recién nacido, asociada con una mayor gravedad de la enfermedad, dada su capacidad de activar eficientemente el complemento (Urbaniak, *et al.*, 1980). Teniendo en cuenta lo descrito, la presencia de anticuerpos antiinsulínicos con la subclase IgG3 podría potenciar la respuesta inmunitaria frente a la insulina NPH en individuos tratados con esta y con la regular. La prevalencia de IgG3 en los sueros del grupo tratado con la mezcla de insulina regular y NPH es interesante debido a las características biológicas de esta subclase, por lo cual sugerimos evaluarla en un grupo experimental con mayor número de individuos, que permita confirmar la prevalencia de este fenómeno en la población tratada con insulina regular y NPH.

La ausencia de complejos inmunitarios en las muestras de suero de los grupos experimentales es compatible con estudios previos en los que los niveles del complejo de

anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena en sueros de pacientes bajo tratamiento con insulina no han sido diferentes a los observados en los sueros de pacientes con diabetes tipo 2 sin tratamiento o en los de los controles. La ausencia de complejos inmunitarios en las muestras evaluadas puede deberse a su formación inexistente o escasa en condiciones naturales, o a la gran efectividad del proceso natural de depuración. Sin embargo, no puede descartarse que dichos complejos sí se estén formando y puedan estar localizados o precipitados en lugares que no se analizaron en este estudio, como tampoco que luego de haberse formado hayan sido eliminados. Según los resultados obtenidos en el presente estudio puede sugerirse que la administración de la insulina no tiene un ningún papel, o muy poco, en la formación de complejos inmunitarios en pacientes con diabetes tipo 2 (Ratanji, *et al.*, 2014). Esto contrasta con los resultados de un estudio en 237 pacientes con diabetes tipo 2 tratados con insulina durante más de un año, en quienes la presencia de los complejos inmunitarios se correlacionó con los niveles de anticuerpos antiinsulínicos pero no con las microangiopatías (Di Mario, *et al.*, 1983). En este sentido, los datos aquí reportados son novedosos, ya que evalúan la presencia de complejos inmunitarios constituidos por anticuerpos antiinsulínicos e insulina exógena de manera individual frente a cada insulina analizada gracias al uso de anticuerpos de captura específicos para cada formulación (anti-regular, anti-NPH y anti-glargina). Además, debe tenerse en cuenta que, hasta el momento, la formación de complejos inmunitarios con insulinas humanas recombinantes y análogos de la insulina no se ha estudiado suficientemente.

Conclusión

Los resultados del estudio permiten concluir que existen diferencias en el perfil inmunogénico humoral (reactividad frente a la subclase de IgG) de las tres insulinas exógena evaluadas, y sugerir que las modificaciones en la estructura proteínica de las insulinas, tales como los cambios en la secuencia de aminoácidos (glargina) o en su formulación o la presencia de excipientes (la protamina en la insulina NPH), inducen variaciones en el potencial inmunogénico de cada proteína terapéutica. Aunque la presencia de anticuerpos antiinsulínicos no se asoció con alteraciones de los parámetros metabólicos analizados en este estudio, los resultados obtenidos sugieren la importancia clínica de los anticuerpos antiinsulínicos, dada la prevalencia de la subclase IgG3 en el grupo tratado con las insulinas regular y NPH, subclase de inmunoglobulina que tiene la capacidad de activar eficientemente el complemento y favorecer la activación de los monocitos, potencializando de este modo la respuesta inmunitaria. Se requieren estudios posteriores que exploren el potencial biológico de estos hallazgos.

Agradecimientos

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a los integrantes de los grupos de Investigación en Inmunotoxicología y de Farmacología de la Medicina Tradicional

y Popular (FaMeTra), así como a la Fundación Instituto de Inmunología de Colombia (FIDIC), por su colaboración en la realización de la fase experimental de este trabajo.

Contribución de los autores

Yohana Domínguez Romero; Investigadora/estudiante de maestría a cargo del trabajo experimental; análisis y discusión de resultados y, redacción del artículo. Jorge Arturo Santa: Investigador; atención y selección de pacientes diabéticos. Luisa Fernanda Bohórquez: Investigadora; responsable de la atención y selección de pacientes diabéticos; análisis de resultados, revisión del artículo. Lucy Gabriela Delgado Murcia; Investigadora proponente del trabajo de investigación; análisis y discusión de resultados, revisión y aportes en la redacción del artículo; líder de la línea de inmunogenicidad de productos biotecnológicos y directora del Grupo de Investigación en Inmunotoxicología.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- American Diabetes Association (ADA).** (2014) Standards of Medical Care in Diabetes. *Diabetes Care*, **37** (Supplement 1): S14-S80.
- Asociación Latinoamericana de Diabetes (ALAD).** (2013). Guías ALAD de diagnóstico control y tratamiento de la diabetes mellitus tipo 2. Fecha de consulta: 1 de junio de 2018. Disponible en: https://issuu.com/alad-diabetes/docs/guias_alad_2013
- Andersen, O. O.** (1976). Clinical significance of anti-insulin-antibodies. *Acta Endocrinologica*, **205**: 231-40.
- Berson, S. A., Yalow, R. S., Bauman, A., Rothschild, M. A., & Newerly, K.** (1956). Insulin-I131 metabolism in human subjects: demonstration of insulin binding globulin in the circulation of insulin treated subjects. *The Journal of Clinical Investigation*, **35** (2): 170-190.
- Chen, J.-W., Frystyk, J., Lauritzen, T., & Christiansen, J. S.** (2005). Impact of insulin antibodies on insulin aspart pharmacokinetics and pharmacodynamics after 12-week treatment with multiple daily injections of biphasic insulin aspart 30 in patients with type 1 diabetes. *European Journal of Endocrinology*, **153** (6): 907-913.
- Comisión de regulación en salud.** (2011). Actualización de Plan Obligatorio de Salud. Bogotá. Pag.115
- Devey, M.** (1988). Clinical Aspects of IgG Subclasses and Therapeutic Implications. *Immunology*, **65** (2): 327.
- Di Mario, U., Ventriglia, L., Iavicoli, M., Guy, K., & Andreani, D.** (1983). The correlation between insulin antibodies and circulating immune complexes in diabetics with and without microangiopathy. *Clinical And Experimental Immunology*, **52** (3): 575-580.
- Dib, S. A., Freire, M. B., Miranda, W. L., & Russo, E. M.** (1994). Detection of insulin antibodies by radioassay and ELISA: interrelation and correlation with metabolic control in type I diabetes. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, **27** (5): 1167-1180.
- Domínguez Y.** (2014). Inmunodetección de anticuerpos anti-insulina libres en suero Y unidos a la molécula de insulina en pacientes insulino-dependientes. Universidad Nacional de Colombia. Tesis. 46-48.
- Eyzaguirre, F., & Codner, E.** (2006). [Insulin analogues: searching for a physiological replacement]. *Revista Medica de Chile*, **134** (2): 239-50.
- Fineberg, S. E., Kawabata, T. T., Finco-Kent, D., Fountaine, R. J., Finch, G. L., & Krasner, A. S.** (2007). Immunological responses to exogenous insulin. *Endocrine Reviews*, **28** (6): 625-652.
- Francis, A. J., Hanning, I., & Alberti, K. G. M. M.** (1985). The influence of insulin antibody levels on the plasma profiles and action of subcutaneously injected human and bovine short acting insulins. *Diabetologia*, **28** (6): 330-334.
- Hattori, N., & Shimatsu, A.** (2013). Treatment with insulin glargine causes anti-insulin antibody production more frequently than other insulin analogs in patients with diabetes mellitus. *Endocrine Reviews*, **34** (3).
- Heding, L. G., Marshall, M. O., Persson, B., Dahlquist, G., Thalme, B., Lindgren, F. Kaad, P. H.** (1984). Immunogenicity of monocomponent human and porcine insulin in newly diagnosed Type 1 (insulin-dependent) diabetic children. *Diabetologia*, **27**: 96-98.
- Huber, R.** (1980). Spatial structure of immunoglobulin molecules. *Klinische Wochenschrift*, **58** (22): 1217-1231
- International Diabetes Federation.** 2017. IDF Diabetes Atlas 2017. Fecha de consulta: 6 de junio de 2018. Disponible en: <http://www.diabetesatlas.org>
- Irvine, W., Di Mario, U., Guy, K., Iavicoli, M., Pozzilli, P., Lumbroso, B., & Andreani, D.** (1978). Immune complexes and diabetic microangiopathy. *Journal of Clinical & Laboratory Immunology*, **1** (3): 187-191.
- Ishizuka, T., Ogawa, S., Mori, T., Nako, K., Nakamichi, T., Oka, Y., & Ito, S.** (2009). Characteristics of the antibodies of two patients who developed daytime hyperglycemia and morning hypoglycemia because of insulin antibodies. *Diabetes Research and Clinical Practice*, **84** (2): 21e-23e.
- Itoh, A., Saisho, Y., Mitsuishi, M., Oikawa, Y., Kawai, T., Tanaka, M.** (2011). Insulin glulisine may ameliorate nocturnal hypoglycemia related to insulin antibody - A case report. *Diabetes Research and Clinical Practice*, **94**: e53-e54; discussion: e55.
- Jefferis, R., & Kumararatne, D. S.** (1990). Selective IgG subclass deficiency: quantification and clinical relevance. *Clinical and Experimental Immunology*, **81** (3): 357-367.
- Koch, M., François-Gérard, C., Sodoyez-Goffaux, F., & Sodoyez, J. C.** (1986). Semi-quantitative assessment of anti-insulin total IgG and IgG sub-classes in insulin-immunized patients using a highly sensitive immunochemical micro-method. *Diabetologia*, **29** (10): 720-726.
- Koyama, R., Nakanishi, K., Kato, M., Yamashita, S., Kuwahara, H., & Katori, H.** (2005). Hypoglycemia and hyperglycemia due to insulin antibodies against therapeutic human insulin: Treatment with double filtration plasmapheresis and prednisolone. *American Journal of the Medical Sciences*, **329** (5): 259-264.
- Lahtela, J. T., Knip, M., Paul, R., Anttonen, J., & Salmi, J.** (1997). Severe antibody-mediated human insulin resistance: Successful treatment with the insulin analog lispro: A case report. *Diabetes Care*, **20** (1): 71-73.

- Nyhan, D. P., Shampaine, E. L., Hirshman, C. A., Hamilton, R. G., Frank, S. M., Baumgartner, W. A., & Adkinson, N. F.** (1996). Single doses of intravenous protamine result in the formation of protamine-specific IgE and IgG antibodies. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, **97** (4): 991-997.
- Ochoa R.** (2012). Técnicas inmunoenzimáticas para ensayos clínicos de vacunas y estudios inmunoepidemiológicos. La Habana. Finlay Ediciones. Pág. 14.
- Pieber, T. R., Eugène-Jolchine, I., & Derobert, E.** (2000). Efficacy and safety of HOE 901 versus NPH insulin in patients with type 1 diabetes. *Diabetes Care*, **23** (2): 157-162.
- Ratanji, K. D., Derrick, J. P., Dearman, R. J., & Kimber, I.** (2014). Immunogenicity of therapeutic proteins: Influence of aggregation. *Journal of Immunotoxicology*. **11** (2): 99-109.
- Reeves, W. G., & Kelly, U.** (1982). Insulin antibodies induced by bovine insulin therapy. *Clinical and Experimental Immunology*, **50** (1): 163-170.
- Schernthaner, G., Borkenstein, M., Fink, M., Mayr, W. R., Menzel, J., & Schober, E.** (1983). Immunogenicity of human insulin (Novo) or pork monocomponent insulin in HLA-DR-typed insulin-dependent diabetic individuals. *Diabetes Care*, **6** (Suppl. 1): 43-48.
- Segal, T., Webb, E. A., Viner, R., Pusey, C., Wild, G., & Allgrove, J.** (2008). Severe insulin resistance secondary to insulin antibodies: Successful treatment with the immunosuppressant MMF. *Pediatric Diabetes*, **9** (3PART1): 250-254.
- Sodoyez-Goffaux, F., Koch, M., Dozio, N., Brandenburg, D., & Sodoyez, J. C.** (1988). Advantages and pitfalls of radioimmune and enzyme linked immunosorbent assays of insulin antibodies. *Diabetologia*, **31** (9): 694-702.
- Soto A, Deshazo RD, Morgan JE, Mather P, Ibrahim G, Frenz JM, Lauritano AA.** (1991). Total IgG and IgG subclass specific antibody responses to insulin in diabetic patients. *Annals of Allergy*, **67** (5): 499-503.
- Thalange, N., Bereket, A., Jensen, L. B., Hiort, L. C., & Peterkova, V.** (2016). Development of Insulin Detemir/Insulin Aspart Cross-Reacting Antibodies Following Treatment with Insulin Detemir: 104-week Study in Children and Adolescents with Type 1 Diabetes Aged 2--16 Years. *Diabetes Therapy*, **7** (4): 713-724.
- Urbaniak SJ, & MA, G.** (1980). ADCC (K-cell) lysis of human erythrocytes sensitized with rhesus alloantibodies. III. Comparison of IgG anti-D agglutinating and lytic (ADCC) activity and the role of IgG subclasses. *British Journal of Haematology*, **46** (3): 447-53.
- Vajo, Z., Fawcett, J., & Duckworth, W. C.** (2001). Recombinant DNA technology in the treatment of diabetes: Insulin analogs. *Endocrine Reviews*. **22**: 706-717.
- Valla, V.** (2010). Therapeutics of Diabetes Mellitus: Focus on Insulin Analogues and Insulin Pumps. *Experimental Diabetes Research*, **2010**: 1-14.
- Weiss, M. E., Nyhan, D. P., Peng, Z. K., Horrow, J. C., Lowenstein, E., & Hirshman, C. A.** (1989). Association of protamine IgE and IgG antibodies with life-threatening reactions to intravenous protamine. *Anesthesia and Analgesia*, **3** (4): 3-5.
- Yanai, H., Adachi, H., & Hamasaki, H.** (2011). Diabetic ketosis caused by the insulin analog aspart-induced anti-insulin antibody: Successful treatment with the newest insulin analog glulisine. *Diabetes Care*. **34**: 108-e108.
- Zhao, T. Y., Li, F., & Xiong, Z. Y.** (2010). Frequent reoccurrence of hypoglycemia in a type 2 diabetic patient with insulin antibodies. *Molecular Diagnosis and Therapy*, **14** (4): 237-241.

Thermodynamic properties, electronic and crystallographic structure, and magnetic response of the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ material

✉ Crispulo E. Deluque Toro¹, ✉ Ariday S. Mosquera Polo¹, ✉ Jorge I. Villa Hernández²,
✉ David A. Landínez Téllez², ✉ Jairo Roa-Rojas^{2,*}

¹Grupo de Nuevos Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

²Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia

Abstract

In this work we used the Wien2k code, within the framework of the Kohn-Sham Density Functional Theory (DFT), applying the Full-Potential Linearized Augmented Plane Wave method (FP-LAPW) and adopting the Generalized Gradient approximation (GGA) for the exchange-correlation energy due to Perdew, Burke, and Ernzerhof, as well as the Local Density approximation (LDA) for the calculation of the Density of States and band structure of the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ double perovskite. For calculations, we considered the *Fmm* (#225) space group, which was experimentally obtained from X-ray diffraction measurements and Rietveld refinement. The experimental lattice parameter was 8.018 Å, which is 99.2% in agreement with the theoretical prediction from the minimization of energy through the Murnaghan state equation. From the measurements of magnetic susceptibility as a function of temperature and the adjustment with the Curie law, we obtained a value for the effective magnetic moment of 10.01 μ_B , which is close to the theoretical expected from Hund's Rule (10.60 μ_B). An energy gap of 3.3 eV between the valence band and the conduction band revealed the insulator character of the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ complex perovskite for the spin up configuration, but a semiconductor feature was observed for the spin down polarization, with an energy gap of 0.77 eV. The thermodynamic properties were calculated from the state equation by using the Debye quasi-harmonic model. A specific heat behavior of $C_V \approx C_P$ was found at temperatures below $T = 500$ K, with Dulong-Petit limit values doubling those reported for perovskite materials. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Perovskite material; electronic structure; crystalline structure; thermodynamic properties.

Propiedades termodinámicas, estructuras electrónica y cristalográfica y respuesta magnética del material $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$

Resumen

En el presente trabajo se utilizó el código Wien2k, en el marco de la teoría del funcional de la densidad de Kohn-Sham, aplicando el método de ondas planas aumentadas y linealizadas (*full-potential linearized augmented plane wave*, FP-LAPW) y adoptando la aproximación de gradiente generalizado (GGA) de Perdew, Burke y Ernzerhof para la energía de intercambio y correlación, así como la aproximación de densidad local (*local density approximation*, LDA) para el cálculo de la densidad de estados y la estructura de bandas de la perovskita doble $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$. Para los cálculos se consideró el grupo *Fmm* (#225), experimentalmente obtenido a partir de mediciones de difracción de rayos X y del método de refinamiento de Rietveld. El parámetro de red experimental fue de 8.018 Å, el cual concuerda en un 99,2 % con las predicciones teóricas efectuadas a partir de la minimización de la energía mediante la ecuación de estado de Murnaghan. A partir de mediciones de susceptibilidad magnética en función de la temperatura y del ajuste con la ley de Curie, se obtuvo el valor del momento magnético efectivo 10,01 μ_B . Este valor es muy cercano del esperado teóricamente a partir de las reglas de Hund (10,60 μ_B). La brecha de energía determinada entre las bandas de valencia y de conducción fue de 3,3 eV, lo que revela el carácter aislante de la perovskita compleja $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ para la configuración de espín hacia arriba, en tanto que se observó el carácter semiconductor para la polarización de espín hacia abajo, con una brecha de energía de 0,77 eV. Las propiedades termodinámicas se calcularon a partir de la ecuación de estado usando el modelo cuasi-armónico de Debye. Un comportamiento del calor específico, con $C_V \approx C_P$, se encontró a temperaturas inferiores a $T = 500$ K, con valores del límite de Dulong-Petit que doblaban los que se han reportado para materiales del tipo de la perovskita. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: material tipo perovskita; estructura electrónica; estructura cristalina; propiedades termodinámicas.

*Corresponding autor:

Jairo Roa Rojas, jroar@unal.edu.co; **Received:** April 28, 2018; **Accepted:** June 25, 2018; **Editor:** Ángela Camacho Beltrán

Introduction

Perovskite materials (SHNO) represent a great percentage of systems which are actually investigated by the physics and chemistry of solids. In general, perovskites is represented by the ideal formula ABX_3 , where A is an alkaline earth element, B represents a transition metal or rare earth element and X, usually is the oxygen (Hazen, 1988). The modifications of atomic radii of A and B introduce structural distortions and new crystalline phases while inclusions of rare earth elements give the possibility to produce materials with exotic electric and magnetic properties (Kruth & West, 2001; Llamosa, *et al.*, 2009). Partial substitutions of the A and B cations give rise to complex materials such as the double perovskites with generic formula $A_2BB'O_6$ (Triana, *et al.*, 2012) and other more complex perovskites (Moreno, *et al.*, 2008). Its chemical configuration offers multiple chances to combine different elements, as well as the possibility to synthesize new materials involving a great variety of physical properties. Depending on magnetic and electric characteristics of B and B' it is relatively easy to create new perovskite systems with half-metallic properties (Erten, *et al.*, 2011), magnetoelectric response (Molegraaf, *et al.*, 2009) or magnetic ordering (Lee & Marianetti, 2018), which offer promissory perspectives in the new field of spintronics technology (Pilo, *et al.*, 2017). In this paper, we propose the synthesis and characterization of the Sr_2HoNbO_6 ceramic material. We describe the crystalline structure of this double perovskite and perform morphological, magnetic, and electronic analyses. Furthermore, we present the results of our measurements of the magnetic response as a function of temperature. Moreover, considering that in recent years the density functional theory (DFT) has become a good tool to study electronic properties in perovskite-like material (Bonilla, *et al.*, 2008; Landínez-Téllez, *et al.*, 2013), we conducted a study of the electronic properties of these materials in order to establish the type of hybridization between the orbitals of HoO_6 and NbO_6 octahedra present in the structure. This calculation is the greatest motivation of this work and the experimental corroboration of the theoretical predictions with regard to the energy gap.

Experiments. Samples of SHNO were prepared by the solid-state reaction technique. Stoichiometric ratios of precursor powders $SrCO_3$, Ho_2O_3 , and Nb_2O_5 (purity 99,90%) were finely ground and thoroughly mixed. The precursor powder was calcined at 1100 °C for 148 h in ambient atmosphere. Then, the calcined mixture was again crushed, finely ground and pressed at 6 ton/cm² pressures to form a disc (10 mm diameter, 2 mm thickness). This disc was sintered at 1300 °C for 17 h and furnace-cooled to room temperature. The structural characterization was carried out by analyzing the X-ray diffraction (XRD) data obtained from a Panalytical® X-Pert PRO MPD diffractometer ($CuK\alpha=1,540598 \text{ \AA}$). Refinements of the experimental data were performed through the GSAS code. The XRD pattern of the sample was recorded for crystallographic

phase characterization. The morphological characterization of samples was systematically effectuated from scanning electron microscopy (SEM), by using VEGA 3 equipment. The field cooling measurement of the magnetic susceptibility as a function of temperature was carried out with an MPMS® Quantum Design SQUID.

Theoretical calculations. We used the Wien2k program (Blaha, *et al.*, 2001) within the framework of the Kohn-Sham Density Functional Theory (DFT) (Hohenberg & Khon, 1964; Khon & Sham, 1965), applied the Full-Potential Linear Augmented Plane Wave method (FP-LAPW) and adopted the Generalized Gradient (GGA) approximation for the exchange-correlation energy (Perdew, *et al.*, 1996). The self-consistent process in the numeric package Wien2k allows the total energy calculation for constituent elements and alloys. Taking the experimental unit cell data as input, all the structures studied in this work were fully relaxed with respect to their lattice parameters and the internal degrees of freedom compatible with the space group symmetry of the crystal structure. The resulting energies versus volume functions were fitted to the equation of state by Murnaghan (Murnaghan, 1944) in order to obtain the minimum energy value, the bulk modulus, its pressure derivative and the equilibrium lattice parameters and associated volume. The muffin-tin radius of the elements was 2,5; 2,19; 1,8 and 1,6 (in u.a.) Sr, Ho, Nb and O, respectively, angular momentum up to $l = 10$ inside the muffin-tin sphere, a maximum vector in the reciprocal space of $G_{max} = 12,0$, $R_{MKAX} = 8$, and a mesh of 1500 points in the first Brillouin zone (equivalent to a maximum of 56 k points in the irreducible Brillouin zone). Finally, the convergence criteria for the self-consistent calculation were 0.0001 Ry for the total energies, 0.0005 u.a. in the charge and 1.0 mRy/u.a. in the internal forces. Spin polarization was included in the calculations. The thermal expansion of the crystal by the dependence of volume and the temperature on equilibrium, the Debye temperature, the specific heat at constant volume and the pressure, as well as the Grüneisen parameter as a function of temperature, were predicted from the Debye quasi-harmonic model (Blanco, *et al.*, 2004; Deluque-Toro, *et al.*, 2018).

Results and discussion

Crystalline structure. Figure 1a shows the XRD pattern for the SHNO material, which consists of strong peaks characteristic of a primitive cubic perovskite plus a few weak line reflections arising from the super-lattice resulting in the crystallization of this material in a cubic double perovskite Fmm space group (#225) (Howard, *et al.*, 2003; Madueño, *et al.*, 2006). No evidence of distortions from the cubic symmetry was observed in the XRD pattern. The basic perovskite composition is ABO_3 , where A is a large ion suitable for the 12-coordinated cube-octahedral sites and B is a smaller ion suitable for the 6-coordinated octahedral site (Lufaso, *et al.*, 2006). Cubic complex perovskite with mixed species on a site (particularly the B site) may be

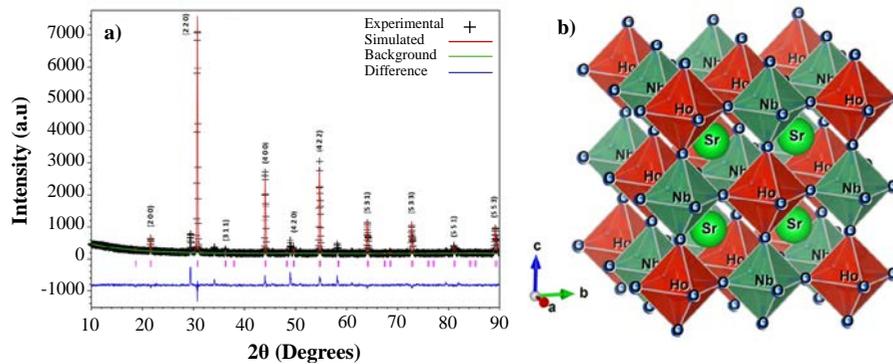


Figure 1. a) XRD pattern for the complex perovskite $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$. Symbols represent experimental diffraction data and the base line is the difference between experimental and simulated patterns (continuous line). b) Structure of the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ cubic complex perovskite constructed from the Rietveld refinement of XRD experimental data.

represented by multiples of this formula unit and a larger unit cell, e.g., $\text{A}_2\text{BB}'\text{O}_6$ (Corredor, *et al.*, 2011). Thus, in the SHNO composition, the Sr^{2+} with the largest ionic radius (1,13 Å) occupies position A of the cubic complex perovskite, Ho^{3+} (ionic radius 0,97 Å) and Nb^{5+} (ionic radius 0,70 Å) cations occupy the B and B' positions. The ionic radii were calculated by using the SPUds software (Triana, *et al.*, 2011). Due to the ordering of B and B' on the octahedral site of the ABO_3 unit cell, there is a doubling in the lattice parameter on the basic cubic-perovskite unit-cell. Thus, the whole XRD pattern of SHNO can be indexed in the $\text{A}_2\text{BB}'\text{O}_6$ cubic structure with the cell edge $a=2a_p$, where a_p represents the cell lattice of the cubic perovskite. The presence of the superstructure reflection lines (311), (531), (533) and (551) in the XRD pattern of SHNO is the signature of an ordered cubic complex perovskite structure. In a substitutional solid solution $\text{A}_2\text{BB}'\text{O}_6$, there is a random arrangement of B and B' on equivalent lattice positions in the crystal structure. Upon stable heat treatment, the random solid solution rearranges into a structure in which B and B' occupy the same set of positions but in a regular way; such a structure is described as a superstructure (Howard, *et al.*, 2003).

In the superstructure, the position occupied by B and B' are no longer equivalent and this feature is exhibited in the XRD pattern of the material by the presence of superstructure reflection lines. For a double cubic perovskite of the formula $\text{A}_2\text{BB}'\text{O}_6$ the intensity, in particular, the (111) superstructure reflection is proportional to the difference in the scattering power of the B and B' atoms, when all the atoms are situated in the ideal position (Howard, *et al.*, 2003). A disordered arrangement of B and B' should result in zero intensity. Therefore, Ho^{3+} and Nb^{5+} cation ordering in SHNO in B and B' positions is clearly distinguished by the presence of the significant intensity of (311), (531), (533) and (551) superstructural reflection lines. The lattice parameter of SHNO, obtained from the XRD data, was $a=8,018(0)$ Å.

In the study and description of crystallographic structures, the concept of "positions" is fundamental (Wondratschek, 2006). The so-called Wyckoff positions for this structure

were experimentally determined to be $\text{Sr}^{2+}=8c$, $\text{Ho}^{3+}=4a$, $\text{Nb}^{5+}=4b$, and $\text{O}=24e$. In this notation, a, b, c, and e are the Wyckoff letters that determine all the points x for which the site-symmetry groups are conjugate subgroups of the Fmm (Deluque-Toro, *et al.*, 2014). These letters constitute just a coding frame for the Wyckoff positions starting with "a" at the bottom position and continuing in alphabetical order (Wondratschek, 2006). The number of equivalent points per unit cell, which accompanies the letter of Wyckoff, is known as the multiplicity of the Wyckoff position and is related to the possible coordinates. In the case of the Fmm (#225) space group, the Wyckoff letter "a" has multiplicity value of 4 and the coordinate is (0,0,0). In the same way, "b" coordinate is $(\frac{1}{2},0,0)$ and its multiplicity is 4. On the other hand, "c" has a multiplicity of 8 and its coordinate is $(\frac{1}{4},\frac{1}{4},\frac{1}{4})$. Finally, "e" has a multiplicity of 24, with coordinate (0,2678, 0, 0).

The tolerance factor calculated from the experimental data is $\tau=0.9232$, which is in accordance with expected regime values for the cubic perovskite structures (Triana, *et al.*, 2015). From the refinement analysis, the octahedral distribution in the structure of the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ material was constructed as shown in Figure 1b where the structure of the SHNO double perovskite constructed from the data of Rietveld refinement is shown. As expected from the discussion above, the cationic ordering of the Ho^{3+} and Nb^{5+} in the B and B' sites of the cubic double perovskite can be observed clearly. On the other hand, no tilting or rotation of the HoO_6 and NbO_6 octahedra is observed in the perfect cubic structure.

Microgranular morphology. The Secondary Electrons Image in Figure 2 for the SHNO reveals a qualitative approximation to the surface microstructure.

Strongly coupled particles are observed in the surface morphology, which is a characteristic of good sinterization in the polycrystalline sample. The picture evidences the formation of micrometric clusters of nanometric grains. It is clear that the grains could end up having a few tens of nm, forming groups with the appearance of clusters of several sizes in μm . The particle size D was calculated using the Scherrer

equation, which is based on the widening of the maximum intensity peak of the XRD pattern due to the particle size exclusively, and defined by the ratio $D=K\lambda/\beta(\theta)\cos\theta$, where K is the Scherrer constant given by $K=2\sqrt{\frac{2\ln 2}{\pi}}$, $\lambda=1,540598$ Å is the radiation length and $\beta(\theta)=\Delta(2\theta)$ represents the half-widening of the diffraction profile. The calculated particle size for the SHNO was $D=83,2$ nm. As D depends on the nucleation and growth rate, then, the value obtained for the SHNO material is attributed to the decomposition reaction toward oxides, which may be responsible of the refinement of the particle size D . Given that the solid-state reaction destroys the original morphologies of the precursor oxides, fine particles with similar size distributions can be obtained. These fine particles might be combined once and again to form agglomerates with size distributions as shown in figure 2. Since the increase of the annealing temperature or the sintering time increases the particle size D of the material, the grain morphology changes from the common plate-like form observed in ceramics to a spherical-like form.

Magnetic response. The magnetic properties of SHNO have been investigated by measuring the DC magnetic susceptibility in the temperature range from 50 to 300 K and on the application of a 500 Oe magnetic field intensity. Figure 3 shows the temperature dependence of the inverse of the DC magnetic susceptibility as a function of temperature for SHNO.

The magnetic susceptibility data in this figure can be well fitted with the Curie law: $\chi = \chi_0 + C/T$, where $C = N\mu_{eff}^2/3k_B$ is the Curie constant, N is Avogadro's number, μ_{eff} is the effective magnetic moment ($\mu_{eff} = P_{eff}\mu_B$), represents the effective Bohr magneton number, μ_B is the Bohr magneton, k_B is the Boltzmann constant, and χ_0 is the temperature independent susceptibility term. The value for this term is $\chi_0 = 0.00945$ emu/mol.Oe. The Curie constant, estimated from the fitting in figure 3, is $C = 12.55892$ emu.K/mol.Oe. The effective magnetic moment due to the Ho^{3+} ion, calculated from the Curie constant, is $\mu_{eff} = 10.01\mu_B$. This value corresponds 94.4% with the expected $P_{eff} = g[J(J + 1)]^{1/2}$ for an isolated Ho^{+3} cation with a $4f^{11}5d^06s^2$ configuration, calculated by Hund's rule, where g represents the Landé factor and $J=S+L$, S and L being the spin and orbital angular momenta. This difference may be attributed to the crystal field effects of the trivalent Ho^{+3} cation, which explain the magnetic susceptibility in SHNO.

Electronic structure. In order to obtain the most accurate results for the theoretical calculations of the density of states, we determined the optimal lattice parameters corresponding to the minimal energy value. Figure 4a shows the energy as a function of volume and the respective fitting to the Murnaghan state equation (Murnaghan, 1944). Each one of the points constitutes an individual calculation and the line corresponds to a fitting with the Murnaghan state equation, carried out by using the concept of the least-square fitting method (Murnaghan, 1944). The minimum of the energy was obtained for $-46521,912456$ Ry, the equilibrium

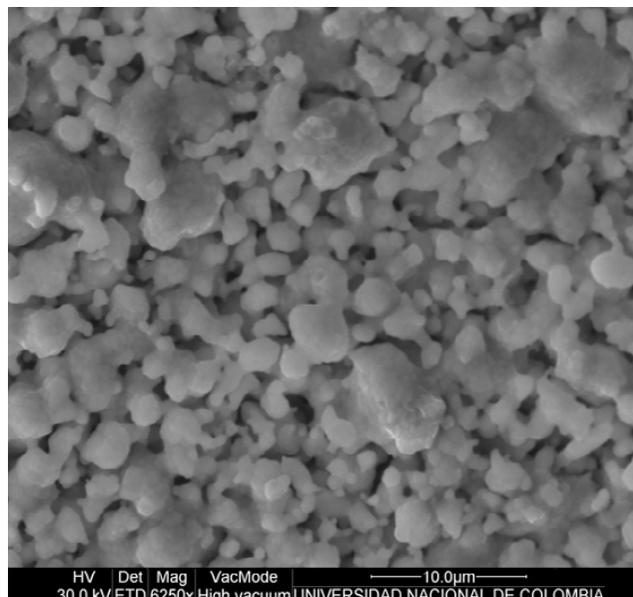


Figure 2. Surface microstructure of the SHNO material

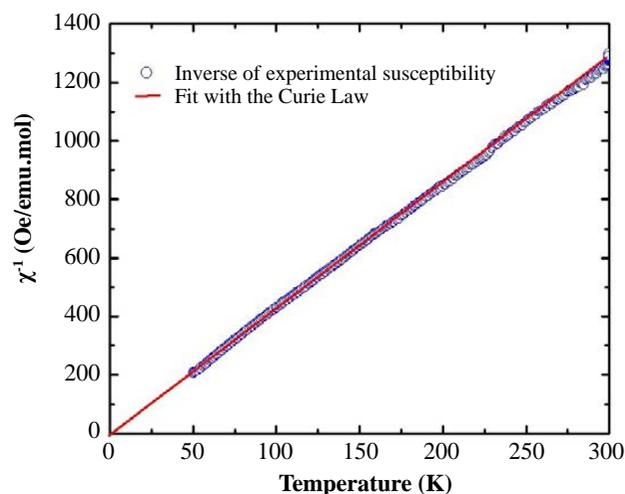


Figure 3. Inverse DC magnetic susceptibility as a function of temperature for SHNO (data points) and Curie fitting of the paramagnetic characteristic (solid line)

volume was $529,147244$ Å³, and the volume modulus, $B_0 = 137,6$ GPa. The theoretical value of the lattice parameter was $8,088$ Å, which is 99,2% in agreement with the experimental result.

Figure 4b shows the band structure for both spin up and spin down configurations. $E=0$ eV corresponds to the Fermi level. It can be seen that these materials evidence insulator behavior with gap energy through the Fermi level from $-1,3$ eV up to $2,1$ eV (width: $3,3$ eV) for the spin-up orientation. On the other hand, for the spin-down configuration, this energy gap remains with a particular characteristic: Two isolated bands appear for $E=0$ eV and $E=1,1$ eV. In order to clarify the electronic structure of this material close to the

Fermi level, we calculated the density of the states taking into account the angular momenta and spin polarization. As exemplified in Figure 5a, there is no substantial contribution of the Sr^{2+} orbitals in any of the bands, the valence or the conduction near the Fermi level. Likewise, their orbitals in the conduction band occur above $E = 2,5$ eV and reveal very low density values. It is clear from the results that the greatest contribution of the electronic states in the valence band is due to the 2p-O orbitals close to de Fermi level for both spin-up and spin-down polarizations. These states correspond to the bands located in the regime of energies between $-5,4$ eV and $-1,3$ eV and they define the value of the energy gap in the valence band. Moreover, as observed in Figure 5b, it is remarkable that the 4d-Nb orbitals are

the biggest contributors to the states corresponding to the valence band above $E=2,5$ eV for the spin-up and spin-down configurations. As expected, for the characteristic of the non-magnetic material, the 4d-Nb⁵⁺ orbitals remain in a low spin configuration, so no d_{eg} states in the conduction band next to the Fermi level nor any of the available states in this regime are of the d_{t2g} type. These states delimit the gap energy in the conduction band and their distribution is the reason why the effective magnetic moment is due solely to the contribution of the electrons 4f-Ho³⁺.

Finally, as shown in Figure 5c, the greatest contribution of states to the valence band was attributed to the 4f-Ho orbitals for the spin-down polarization, while there were no states available in this band for the spin-up orientation. An

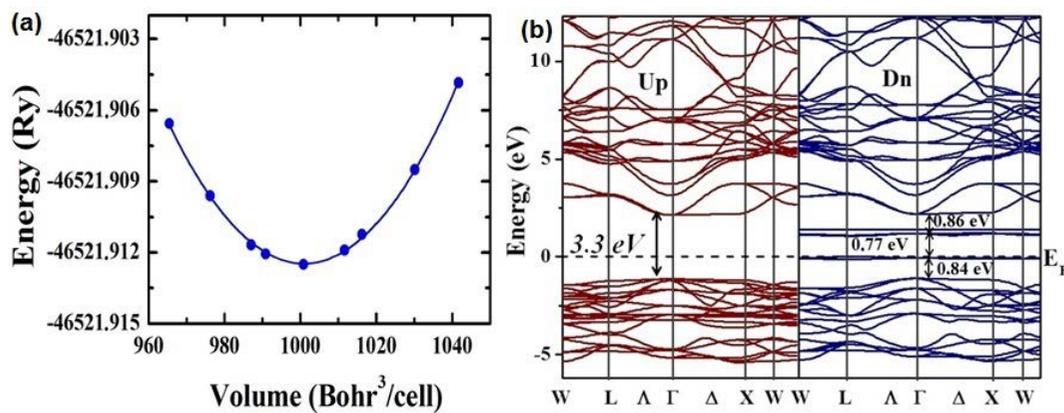


Figure 4. a) Minimization of the total energy as a function of volume for $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ considering the Fmm space group. b) Band structure calculated for the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ by considering electronic polarization

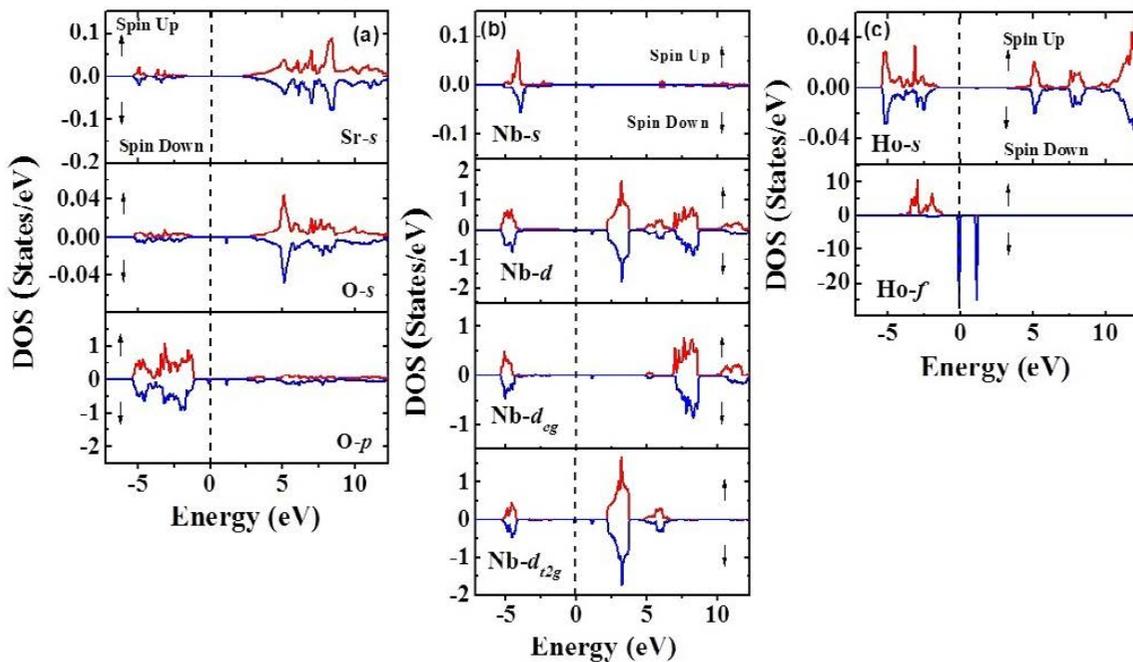


Figure 4. a) Minimization of the total energy as a function of volume for $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ considering the Fmm space group. b) Band structure calculated for the $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ by considering electronic polarization

interesting and unusual feature is observed near the Fermi level for the 4f-Ho orbitals in the spin-down configuration; just on the Fermi level, between -0.2 eV and 0.1 eV, and above the Fermi level, between 0.9 eV and 1.3 eV, there are two peaks with high densities of states and short energies amid the energy gap. The magnetic moment obtained from the asymmetry of the calculated spin-up and spin-down density of states around the Fermi level was calculated to be $4.0 \mu_B$. This value corresponds to 40% when compared to that expected from the Hund's rules for the isolated Ho^{3+} cation (Kittel, 1997). This circumstance is attributed to the exchange and correlation potential applied, which do not contain corrections due to the existence of 4d-Nb orbitals. Our results are consistent with a recent report of GGA calculations for this material, with exactly the same magnetic moment value of $4.0 \mu_B$, attributed mostly to the contribution of the 4f- Ho^{3+} orbitals and an insulating behavior determined from calculations of the band structure and the density of states (Khandy & Gupta, 2018).

Thermodynamical properties. We analyzed the effects of temperature and pressure on the thermodynamic properties of the SHNO material from the state equation under the considerations of the quasi-harmonic approximation of the Debye model as presented below. Figure 6 shows the results of specific heat at constant volume, C_v (a), and at constant pressures, C_p (b), as functions of temperature. As can be seen in the figures, the temperature was varied between 0 K and 1500 K for eight applied pressure values, from 0 to

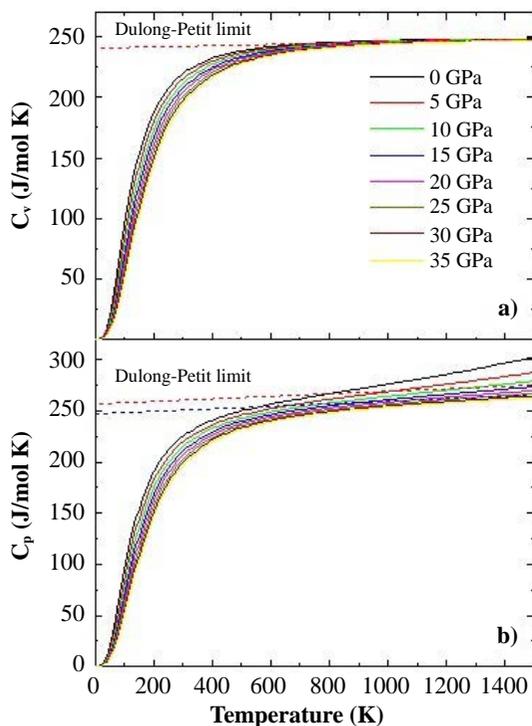


Figure 6. Specific heat C_v (a) and C_p (b) calculated by using the quasi-harmonic Debye model for the SHNO material from the Murnaghan state equation.

35 GPa. Figure 7 shows that below $T=500$ K for all applied pressure values, $C_v \approx C_p$. In Figure 6(a) the trend of specific heat towards the Dulong-Petit limit, which is the specific heat value independent of temperature, is clearer than in Figure 6(b). As the temperature increases from this Dulong-Petit limit value, each of the atoms in the material absorbs the same amount of energy proportional to this temperature increase.

In Figure 7 we present the results of the calculations of the Debye temperature (a), the thermal expansion (b), and the Grüneisen coefficient (c) as functions of the temperature. We calculated the dependence of $\Theta_D(T)$ (as a function of temperature) plotting isobar curves as shown in Figure 7(a). The result in Figure 7(a) shows that the Debye temperature increased substantially with increasing pressure, from 494.33 K for $P = 0$ GPa to 692.87 K for $P=35$ GPa (at $T=0$ K), because as the pressure increases, all the velocities of the elastic waves also increase gradually and their increase directly affects the Debye temperature. Likewise, a mild non-linear decreasing behavior of $\Theta_D(T)$ can be observed with increasing temperature for applied pressures. This decrease

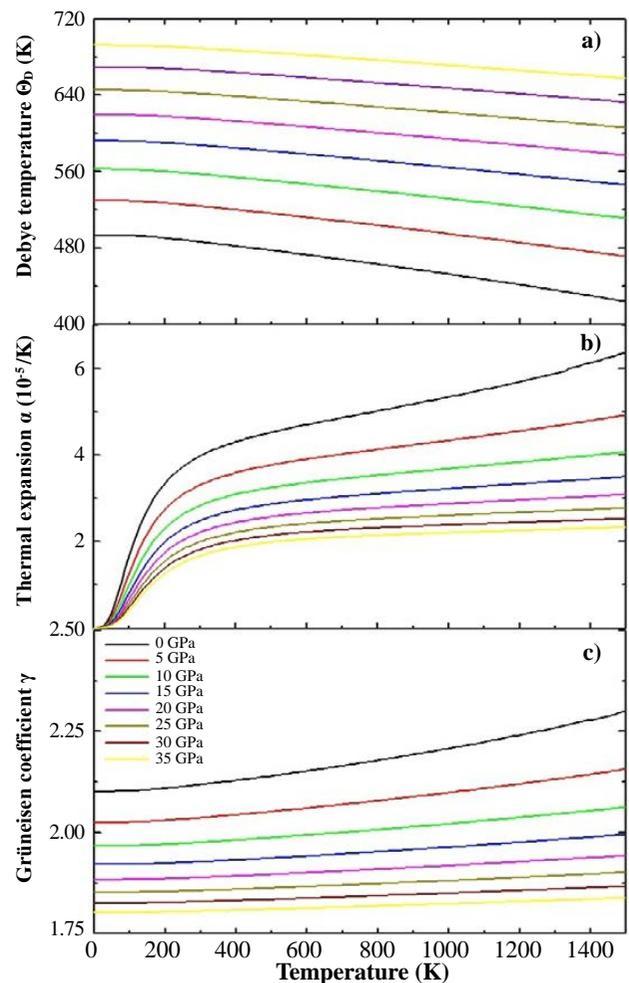


Figure 7. Debye temperature (a), thermal expansion coefficient (b), and Grüneisen coefficient (c) for the SHNO calculated by the application of the quasi-harmonic Debye model

in the Debye temperature as a function of temperature is characteristic of perovskite-type materials (Anderson, 1998). Interpreting the Debye temperature as the highest temperature that can be achieved as a result of a single normal vibration, it can be argued that the effect of pressure is the increase of cation-anion vibration frequencies while the effect of temperature is the expansive distortion of the structure, increasing the wavelength of the vibrations, decreasing the frequency and, consequently, the Debye temperature.

Figure 7(b) shows the dependence of the thermal expansion coefficient, α , with temperature and pressure. In the figure, $\alpha(T)$ decreases drastically with increasing pressure. On the other hand, it can be seen that at low temperatures (between 0 K and 300 K) $\alpha(T)$ grows rapidly with temperature, and above 300 K it grows smoothly, following an approximately linear behavior. In spite of the SHNO cubic structure, its perovskite-type character confers it an anisometric structure and, therefore, very great differences of the thermal expansion must be present along the different crystallographic directions. This behavior can be associated with the structural distortions to which the perovskite-type materials are sensitive because both temperature and pressure can give rise to inclinations and/or rotations of the HoO_6 and NbO_6 octahedrons, elongation of the structure in certain crystallographic directions, and eventual contractions in other directions.

Thus, the type of response in $\alpha(T)$ is associated with the type of distortion or transition occurring because of the application of temperature and pressure to the material. This circumstance could slightly divert any experimental results with respect to the theoretical result of Figure 7(b). On the other hand, the relatively low value of $\alpha(T)$ is characteristic of ceramic materials (Dedova, *et al.*, 2016).

There was an aspect that we did not consider in the calculations: as the temperature increases, structural phase transitions can occur and the material could lose its cubic structure. Finally, the Grüneisen parameter, shown in Figure 7(c), shows a gradual decrease with the increase in applied pressure (for example, from 2.10 for $P=0$ GPa to 1.80 for $P=35$ GPa, at $T=0$ K). This behavior was observed for all the temperatures considered in the calculations. On the other hand, the Grüneisen coefficient exhibited a smooth and non-linear increase as temperature increased. These characteristics, observed in the Grüneisen parameter as a function of pressure and temperature, are related to the alteration in the vibration frequency of a crystalline lattice according to the discussion presented above in relation to the coefficient of thermal expansion (Kim, *et al.*, 2017).

Conclusions

We obtained $\text{Sr}_2\text{HoNbO}_6$ samples with a double cubic structure (Fmm space group) using the solid state reaction technique. Rietveld refinement of the XRD experimental data showed the occurrence of a superstructure with the presence of Ho^{3+} and Nb^{5+} cations interspersed along the

crystallographic axes of the cell. The theoretical lattice parameters calculated from the minimization of energy with respect to the cell volume were in agreement with the experimental values determined by the Rietveld refinement of the XRD patterns. SEM images revealed the micrometric character of the granular surface with evidence of clusters constituted by nanometric crystallites. The measurements of magnetic susceptibility as a function of temperature indicated the paramagnetic feature of this complex perovskite material. The effective magnetic moment obtained from the Curie analysis of the paramagnetic behavior in curves of magnetic susceptibility as a function of temperature was 94.4% in agreement with the expected effective magnetic moment calculated from Hund rules. Calculations of the band and electronic structures suggest that this material behaves as an insulator for both spin-up and spin-down polarizations, with a gap energy of $E=3,3$ eV. On the other hand, an anomaly due to the 4f-Ho orbitals took place for the spin-down configuration, and two intra-bands with high states/eV and a localized energy regime were observed in the middle of the gap. For this spin polarization, the band structure suggests that this material behaves as a semiconductor. The calculations of the thermodynamic properties from the state equation by means of the quasi-harmonic approximation of the Debye model showed that the effects of the interatomic vibrations gave rise to a specific heat that decreases with the applied pressure and evidenced a Dulong-Petit limit relatively high (240,63 J/mol.K) compared to other results reported for simple perovskite-type materials. Likewise, we conclude that $C_v \approx C_p$ mainly due to the low value of the coefficient of thermal expansion. The Debye temperature showed an increasing dependence on the pressure and a decreasing one with the temperature. By contrast, both the coefficient of thermal expansion and the Grüneisen parameter decreased with the pressure and increased slightly as a function of temperature. Except for the high specificity of the Dulong-Petit heat value, the behavior observed in the thermodynamic properties was, in general, characteristic of the perovskite-like ceramic materials. We emphasize that the thermodynamic properties depend fundamentally on the value of the Grüneisen parameter, which is very sensitive both to the numerical errors in the derivation and to the smoothness of the energy equation. For this reason, it would be highly advisable to obtain experimental results of the thermodynamic properties in order to establish more objectively the microscopic mechanisms that originate them.

Acknowledgments

This work was partially financed by *División de Investigación, sede Bototá, Universidad Nacional de Colombia, and Fonciencias, Universidad del Magdalena.*

Authors' contributions

C.E. Deluque Toro, A.S. Mosquera Polo, and J. Roa-Rojas carried out the DFT and thermodynamic properties calculations. D.A. Landínez Téllez and J.I. Villa Hernández

performed the synthesis of samples and the experimental measurements. J. Roa-Rojas analyzed the theoretical and experimental results, drafted, proofread, and reviewed the final document.

Conflict of interests

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

References

- Anderson O.L.** (1998). Thermoelastic properties of MgSiO₃ perovskite using the Debye approach. *Amer. Mineral.* **83**: 23-35.
- Blaha P., Schwarz K., Madsen G.K.H., Kvasnicka D., Luitz J.** (2001). WIEN2k, An Aug-mented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties. Karlheinz Schwarz, Techn. Universität Wien, Austria. ISBN 3-9501031-1-2.
- Blanco, M.A., Francisco, E., Luaña, V.** (2004). GIBBS: Isothermal-isobaric thermodynamics of solids from energy curves using a quasi-harmonic Debye model. *Comp. Phys. Commun.* **158**: 57-72.
- Bonilla M., Landínez-Téllez D.A., Arbey-Rodríguez J., Albino-Aguilar J., Roa-Rojas J.** (2008). Study of half-metallic behavior in Sr₂CoWO₆ perovskite by ab initio DFT calculations. *J. Magn. Magn. Mater.* **320**: e397-e399.
- Corredor L.T., Landínez-Téllez D.A., Pimentel Jr. J., Pureur P., Roa-Rojas J.** (2011). Magnetic, Structural and Morphological Characterization of Sr₂GdRuO₆ Double Perovskite. *J. Mod. Phys.* **2**: 154-157.
- Dedova E.S., Shadrin V.S., Petrushina M.Y., Kulkov S.N.** (2016). The Study on Thermal Expansion of Ceramic Composites with Addition of ZrW₂O₈. *Mater. Sci. Engin.* **116**: 012030(1)- 012030(5).
- Deluque-Toro C.E., Arbey-Rodríguez M.J., Landínez-Téllez D.A., Moreno-Salazar N.O., Roa-Rojas J.** (2014). First principles study of the structural and electronic properties of double perovskite Ba₂YTaO₆ in cubic and tetragonal phases. *Phys. B.* **455**: 18-21.
- Deluque-Toro C.E., Landínez-Téllez D.A., Roa-Rojas J.** (2018). Ab-initio analysis of magnetic, structural, electronic and thermodynamic properties of the Ba₂TiMnO₆ manganite. *DYNA.* **85**: 27-36.
- Erten O., Meetei O.N., Mukherjee A., Randeria M., Trivedi N., Woodward P.** (2011). Theory of Half-Metallic Ferromagnetism in Double Perovskites. *Phys. Rev. Lett.* **107**: 257201(1)-257201(4).
- Hazen R.M.** (1988). Perovskites. *Sci. Am.* **258**: 74-81.
- Hohenberg P., Khon W.** (1964). Inhomogeneous electron gas. *Phys. Rev.* **136**: B864-B871.
- Howard C.H., Kennedy B.J., Woodward P.M.** (2003). Ordered double perovskites – a group-theoretical analysis. *Acta Cryst. B.* **59**: 463-471.
- Khandy S.A., Gupta D.C.** (2018). Electronic structure, magnetism and thermoelectric properties of double perovskite Sr₂HoNbO₆. *J. Magn. Magn. Mater.* **458**: 176-182
- Khon W., Sham L.S.** (1965). Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects. *Phys. Rev.* **140**: A1133-A1138.
- Kim J., Chen X., Shih P.-C., Yang H.** (2017). Porous Perovskite-Type Lanthanum Cobaltite as Electrocatalysts toward Oxygen Evolution Reaction. *Sustainable Chem. Eng.* **5**: 10910-10917.
- Kittel C.** (1997). Introduction to Solid State Physics, 6th Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York. p. 482
- Kruth A., West A.R.** (2001). Electrical properties of the oxygen-deficient perovskites, Ca₂Mn_{2-x}Nb_xO₇; 0 ≤ x ≤ 1.2, with Mn valence varying from +2.0 to +4.0. *J. Mater. Chem.* **11**: 153-159.
- Landínez-Téllez D.A., Llamasa D.P., Deluque-Toro C.E., Gil-Rebaza A.V., Roa-Rojas J.** (2013). Structural, magnetic, multiferroic and electronic properties of Sr₂ZrMnO₆ double perovskite. *J. Mol. Struct.* **1034**: 233-237.
- Lee A.T., Marianetti C.A.** (2018). Structural and metal-insulator transitions in rhenium-based double perovskites via orbital ordering. *Phys. Rev. B.* **97**: 045102(1)-045102(5).
- Llamasa D.P., Landínez-Téllez D.A., Roa-Rojas J.** (2009). Magnetic and structural behavior of Sr₂ZrMnO₆ double perovskite. *Phys B.* **404**: 2726-2729.
- Lufaso M.W., Barnes P.W., Woodward P.M.** (2006). Structure prediction of ordered and disordered multiple octahedral cation perovskites using SPuDS. *Acta Cryst. B.* **62**: 397-410.
- Madueño Q., Landínez-Téllez D.A., Roa-Rojas J.** (2006). Production and characterization of Ba₂NdSbO₆ complex perovskite as a substrate for YBa₂Cu₃O_{7-d} superconducting films. *Mod. Phys. Lett. B.* **20**: 427-437.
- Molegraaf H.J.A., Hoffman J., Vaz C.A.F., Gariglio S., van der Marel D., Ahn C.H., Triscone J.-M.** (2009). Magnetoelectric Effects in Complex Oxides with Competing Ground States. *Adv. Mater.* **21**: 3470-3474.
- Moreno L.C., Valencia J.S., Landínez-Téllez D.A., Arbey-Rodríguez J., Martínez M.L., Roa-Rojas J., Fajardo F.** (2008). Preparation and structural study of LaMnO₃ magnetic material. *J. Magn. Magn. Mater.* **320**: e19-e21.
- Murnaghan, F.D.** (1944). The Compressibility of Media under Extreme Pressures. *Proceedings of National Academy of Sciences, USA.* **30**: 244-247.
- Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M.** (1996). Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Phys. Rev. Lett.* **77**: 3865-3868.
- Pilo J., Miranda A., Trejo A., Carvajal E., Cruz-Irisson M.** (2017). Bidimensional perovskite systems for spintronic applications. *J. Mol. Model.* **23**: 322-325.
- Qiang L., Duo-Hui H., Qi-Long C., Fan-Hou W.** (2013). Phase transition and thermodynamic properties of BiFeO₃ from first-principles calculations. *Chin. Phys. B.* **22**: 037101(1)-037101(4).
- Triana C.A., Corredor L.T., Landínez-Téllez D.A., Roa-Rojas J.** (2011). High temperature-induced phase transitions in Sr₂GdRuO₆ complex perovskite. *Mater. Res. Bull.* **46**: 2478-2483.
- Triana C.A., Landínez-Téllez D.A., Arbey-Rodríguez J., Fajardo F., Roa-Rojas J.** (2012). Electronic, crystal structure and morphological properties of the Sr₂DyRuO₆ double perovskite. *Mater. Lett.* **82**: 116-119.
- Triana C.A., Landínez-Téllez D.A., Roa-Rojas J.** (2015). General study on the crystal, electronic and band structures, the morphological characterization, and the magnetic properties of the Sr₂DyRuO₆ complex perovskite. *Mater. Charact.* **99**: 128.
- Wondratschek, W.** 2006. International Tables for Crystallography A, Chapter 8.3, p. 732-740.

Bioeconomía: el futuro sostenible

Elizabeth Hodson de Jaramillo

Facultad de Ciencias, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, D.C., Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro de número a la
Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 20 de junio de 2018

Resumen

La actividad humana intensiva y los modelos de desarrollo convencionales basados en los combustibles fósiles han ocasionado graves impactos en el entorno. Debido a ello, el mundo enfrenta una serie de grandes desafíos ambientales, económicos y sociales que deben ser atendidos si queremos garantizar un futuro con bienestar para todos y enfrentar el cambio climático progresivo, la vulnerabilidad de algunas regiones, la reducción de la biodiversidad, la seguridad alimentaria y nutricional, el agotamiento del agua y el suelo, y las desigualdades sociales. En ese sentido, es claro que continuar con el mismo modelo de desarrollo no es una opción y, por lo tanto, es indispensable adaptar los patrones económicos y sociales si se desea cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas. En el presente documento se plantea el modelo de la bioeconomía como propuesta integral de un desarrollo con sostenibilidad ambiental, social y económica. Lo que diferencia este nuevo modelo económico de otros es el hecho de la incorporación del conocimiento y de avances científicos y tecnológicos para el desarrollo de nuevas alternativas y senderos productivos que impulsen la aplicación de nuevas tecnologías en el aprovechamiento sostenible de los recursos y procesos biológicos, con el fin de proveer bienes y servicios en todos los sectores económicos con el fin de migrar de la insostenible economía basada en combustibles fósiles a la economía de la biomasa renovable. Para que sea exitosa, la adopción de este modelo requiere de voluntad política para la adopción de decisiones, así como de un sólido compromiso de los científicos y de todos los miembros de la sociedad. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Bioeconomía; Economía circular; Sostenibilidad; Biotecnología; Bioindustria.

Bioeconomy: A sustainable future

Abstract

Conventional fossil fuel-based development models and intensive human activity have caused severe impacts on the environment. As a result, the world faces a series of major environmental, economic and social challenges that must be addressed if future welfare for all is to be guaranteed. Renewed initiatives are necessary to face the progressive climate change and the vulnerability of some regions, biodiversity reduction, food and nutritional security, depletion of water and soil resources, as well as social inequities. It is clear that continuing with the same development model is not an option, and that it is essential to adjust the economic and social patterns in order to comply with the United Nations Sustainable Development Objectives (SDOs). This document presents the bioeconomy model as a comprehensive development proposal with environmental, social and economic sustainability. What makes this new economic model different is the incorporation of knowledge for the definition of new alternatives and productive paths, fostering the production and the intensive use of knowledge related to biological resources, processes and principles, and the sustainable supply of goods and services in all economic sectors thus migrating from the unsustainable oil-based economy to the biomass economy. In order to be successful, the adoption of this model requires decisive political determination as well as strong commitment from the scientists and all members of society. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Bioeconomy; Circular economy; Sustainability; Biotechnology; Bioindustry.

Introducción

El mundo enfrenta una serie de grandes desafíos ambientales, económicos y sociales que deben ser atendidos si se quiere asegurar un futuro con bienestar. Con la adopción de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) y la puesta en marcha de la Agenda 2030 en respuesta al cambio climático progresivo y la vulnerabilidad de algunas

regiones, los recursos naturales finitos, la seguridad alimentaria y nutricional, así como las desigualdades sociales, la comunidad mundial (representada en los 197 estados que

Correspondencia:

Elizabeth Hodson de Jaramillo, ehodson8@outlook.com

Recibido: 27 de abril de 2018

Aceptado: 7 de junio de 2018

Editor: Sandra Baena Garzón

respaldaron dichos objetivos), ha reconocido el imperativo ético y social de promover un futuro con sostenibilidad social, ambiental y económica. El trasfondo general de dicha respuesta es la necesidad de evolucionar hacia un nuevo sistema económico basado en la integración del conocimiento para el uso sostenible de los recursos biológicos mediante el aprovechamiento de todos los productos y subproductos de los procesos relacionados con recursos biológicos, reduciendo tanto la generación de residuos, de desechos y de contaminación, así como la emisión de gases de efecto invernadero, todo ello en busca de una ‘descarbonización’ de la economía. Con el fin de diseñar procesos más eficientes basados en el precepto de “más con menos”, se debe trabajar en el desarrollo de sistemas de uso integral y completo de la biomasa, como es el caso de las biorrefinerías, y definir cadenas de biomasa que incluyan el uso de residuos y subproductos de los sectores rural e industrial. Bajo estos postulados, desde finales del siglo XX fue surgiendo y tomando cada vez más fuerza en el mundo el concepto de la bioeconomía, también conocida como economía de base biológica, o economía bio-basada, que es la transformación del conocimiento de las ciencias de la vida en productos nuevos, sostenibles, ecoeficientes y competitivos, por lo que constituye una alternativa importante para la sostenibilidad del planeta. Se trata de un proceso disruptivo de transformación social altamente dinámico y complejo, con perspectivas de políticas a largo plazo y de cambios sociales.

La sostenibilidad como responsabilidad social

La actividad humana ha venido deteriorando las condiciones del entorno y ocasionando efectos negativos en diversos ámbitos: en el ambiente, la biodiversidad, y los recursos de agua y suelo. Por esta razón, la búsqueda de alternativas para enfrentar esta situación constituye una responsabilidad ética y social. Con el fin de cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible y contribuir al mejoramiento del planeta, es necesario promover una transición hacia una economía más sostenible, para lo cual se requieren desarrollos innovadores en los sectores primarios que generen más tecnologías y métodos eficientes para incrementar la productividad agrícola, forestal y acuícola sin amenazar la capacidad de carga del planeta ni su biodiversidad (Lewandowski, 2018). Los nueve billones de habitantes que se estima vivirán en el planeta en el 2050, requerirán alimentos, agua limpia y energías renovables aunque decrezca progresivamente el área de suelo fértil para la agricultura debido al pastoreo intensivo, la salinización, la desertificación y el crecimiento urbano, entre otros factores, y deban atenderse las limitaciones que el cambio climático ya ha impuesto en algunas regiones (Jiménez-Sánchez & Philp, 2015). Todo ello representa grandes desafíos interconectados de forma compleja y exige nuevos enfoques y paradigmas sociales, económicos y ambientales (Aguilar, *et al.*, 2018).

El desarrollo de este nuevo paradigma de la bioeconomía permite responder a las demandas de la sociedad en cuanto a alimentos, ambiente, mitigación y adaptación al cambio

climático, promoción de la resiliencia y gestión sostenible de recursos vitales del planeta como la biodiversidad, los suelos fértiles, el agua limpia y suficiente (Global Bioeconomy Summit-GBS, 2015a). Para lograr un máximo beneficio, deben articularse todos los sectores de la bioeconomía, pues todos son interdependientes, para, de esta manera, alcanzar la seguridad alimentaria, una mejor nutrición y salud pública, y procesos industriales más limpios y eficientes que contribuyan significativamente a la mitigación del cambio climático (Lokko, *et al.*, 2018). Los beneficios potenciales de la transición hacia una bioeconomía incluyen la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, una gestión de recursos más sensata y la mejoría de la seguridad alimentaria. Un efecto adicional sería la generación de empleos en zonas rurales y urbanas, y la creación de mercados agrícolas diferentes a los de los alimentos y que se basen en la bioenergía y la valorización de productos, subproductos y residuos agrícolas y agroindustriales, lo que representaría una fuente de actividades y de ingresos alternativos propicios para las áreas rurales. El desafío consiste en incrementar la escala de actividades y, paralelamente, responder a los objetivos de desarrollo sostenible introduciendo cambios radicales para enfrentar retos sociales tales como el cambio climático, la escasez de recursos naturales y la contaminación ambiental (McCormik & Kautto, 2013).

Simultáneamente con la situación variable del petróleo en el mercado mundial, la desaceleración del rendimiento agrícola y los efectos del cambio climático, deben mejorarse los niveles vida en varias partes del mundo, principalmente en Asia, Suramérica y África sin que necesariamente vaya ligado a un incremento del consumo de carnes, especialmente, pues ello implica un mayor requerimiento de pienso, forraje y agua, y contribuye a la deforestación y a la emisión de gases de efecto invernadero (Jiménez-Sánchez & Philp, 2015). Como ejemplo de la situación variable en algunos patrones de consumo, se presenta un incremento en la demanda de proteína animal en varios países que han incrementado su poder adquisitivo y duplicado su riqueza, en los cuales, se encuentra que las emisiones de gases han incrementado hasta en un 80 % (Philp, 2018).

Estas situaciones han permitido que aumente la conciencia sobre la fragilidad de la biosfera y sobre la urgente necesidad de adoptar modelos de consumo y producción sostenibles, basados en un modelo en cascada, o circular, de la bioeconomía. Se trata de una economía que usa la biomasa en lugar de los recursos fósiles para producir alimentos y otros bienes no alimentarios, bioproductos para uso industrial, así como farmacéuticos y agrícolas, entre otros. El enfoque de la bioeconomía aspira a copiar los fundamentos de la inteligencia biológica, en la cual un ser vivo constituye una maquinaria capaz de procesar una serie de compuestos (principalmente de origen orgánico) para transformarlos en energía, biomasa y otros subproductos.

Lo que hace a esta máquina tan especial, es que tanto las materias primas como los productos finales se integran en los ciclos naturales de sus componentes (fundamentalmente el carbono), de manera que no se generan residuos netos, ya que estos son reutilizados como materia prima por otros sistemas biológicos, cerrando así el ciclo. Precisamente por sus características y su potencial de influir en el desarrollo de productos y procesos circulares para el bienestar de la población, la biotecnología se puede considerar como uno de los soportes fundamentales de la bioeconomía.

El aprovechamiento sostenible de recursos biológicos renovables se centra en los tres pilares de la bioeconomía: la producción de alimentos y piensos, la obtención de bio-productos (preferencialmente con valor agregado) y la producción de bioenergía, e incluye varias industrias y sectores: agrícolas, forestales, pesqueros, de alimentos humanos y animales, de producción de pulpa y papel, así como parte de las industrias química, biotecnológica y de energía. Su estrategia resalta la oportunidad de lograr el crecimiento económico y al mismo tiempo garantizar la seguridad de los recursos biológicos y su uso eficaz y sostenible (Cristobal, *et al.*, 2016). A partir de los recursos renovables se pueden enfrentar algunos de los retos de la sostenibilidad, incluido el manejo del agua y del suelo, el uso eficiente de nutrientes y el desarrollo socioeconómico. Esto se refiere a la seguridad alimentaria y nutricional (SAN) a través de la producción sostenible de alimentos, a la reducción de producción de residuos mediante un uso adecuado de los productos y procesos considerando la reducción, la reutilización y el reciclaje de los componentes de las cadenas de valor, así como a la promoción en la eficiencia del uso de recursos en la producción de biomasa, y al aprovechamiento por parte de la sociedad de todos los componentes de estas cadenas o redes de valor. Esta sostenibilidad debe mantenerse a través de toda la cadena de suministro, con el fin de ofrecer seguridad alimentaria, un suministro suficiente de materia prima y energía, la reducción de la huella ambiental, así como la promoción de una economía rural saludable y viable. Es indispensable reducir la generación de residuos y promover el reciclaje eficiente de los que se generen, contando con ciclos cerrados de producción y reutilización de subproductos (Lokko, *et al.*, 2018).

Conceptos generales y fundamentos de la bioeconomía

La bioeconomía se basa en la transición de la dependencia de combustibles fósiles a una situación donde la agricultura no solo contribuya a la seguridad alimentaria sino también a la producción de biomasa como materia prima renovable para la industria, la generación de energía y otros usos. No hay una sola forma de bioeconomía sino muchas que se ajustan a las condiciones y las posibilidades de cada situación. La bioeconomía se define de maneras muy distintas alrededor del mundo y la terminología empleada también difiere, pero, en el fondo, las políticas en bioeconomía abarcan o engloban la innovación y la sostenibilidad, así como el crecimiento

de la economía y el empleo. Un concepto compartido a nivel global es el de la aplicación de la investigación, el desarrollo y la innovación tecnológica para la producción y el aprovechamiento de los recursos, y los procesos y principios biológicos innovadores, con el fin de suministrar bienes y servicios de forma sostenible a todos los sectores de la sociedad, el comercio y la industria (**Global Bioeconomy Summit - GBS**, 2015a). Los elementos centrales de la bioeconomía son los recursos, los procesos y los principios biológicos, así como todas las tecnologías (convencionales y modernas) asociadas con su conocimiento, desarrollo, transformación o regeneración (Rodríguez, *et al.*, 2017). Los aspectos comunes a las diversas definiciones de la bioeconomía son su relación con el conocimiento y la ciencia, la tecnología y la innovación, con la aplicación de biotecnologías y la reducción de la dependencia con respecto a los combustibles fósiles, así como el valor agregado de los productos, y los conceptos de sostenibilidad y ecoeficiencia.

La siguiente es la definición global recientemente ajustada en la Cumbre Mundial de Bioeconomía 2018 (**Global Bioeconomy Summit - GBS**, 2018): “la bioeconomía es la producción, utilización y conservación de recursos biológicos, incluido el conocimiento relacionado, la ciencia, la tecnología y la innovación, para suministrar información, productos, procesos y servicios en todos los sectores económicos, en busca de una economía sostenible”. Se trata de un proceso de transformación social dinámico y complejo que requiere de políticas a largo plazo. La visión de una bioeconomía sostenible es la ‘biologización’ de la economía con nuevos procesos y productos industriales de base biológica (‘biobasados’), lo que conlleva cambios en el comportamiento de los consumidores. En el fondo, es una estrategia de crecimiento sostenible que establece la armonía ecológica y económica (El-Chichakli, 2016). Abarca los sectores de la agricultura, la ganadería, los forestales, la pesquería y la acuicultura, así como las industrias relacionadas con su procesamiento: alimenticia, del papel, textil, de la construcción, química y biofarmacéutica, entre otras. Las tecnologías convergentes y habilitantes como las biológicas, la nanotecnología y las de la información, son cruciales para los procesos de base biológica, así como los principios de la ingeniería y la aplicación industrial (**Consejo Alemán de Bioeconomía**, 2018). El viraje hacia una economía basada en la biomasa en sustitución de los combustibles fósiles representa un cambio significativo en los sistemas socioeconómicos, agrícolas, energéticos y tecnológicos convencionales (McCormik & Kautto, 2013). La bioeconomía apalanca innovaciones en las ciencias de la vida y en las bioindustrias para alcanzar un crecimiento ecológico y social sostenible, así como la generación de empleo con base en esta utilización sostenible de los recursos biológicos (**Global Bioeconomy Summit - GBS**, 2015b). Por naturaleza, la bioeconomía utiliza la biomasa renovable para obtener una variedad de productos, incluidos los alimentos para humanos y animales, nuevos bioproductos industriales,

bioenergía y servicios ecológicos. Está por descubrirse todo un arsenal de nuevos productos y de funciones: fármacos, enzimas de interés medicinal e industrial, elementos para la resistencia y la tolerancia de condiciones adversas, la reducción de la toxicidad y las alergias, entre otros muchos (Aguilar, *et al.*, 2018).

Este nuevo campo ha recibido múltiples nombres, bioeconomía, economía circular, crecimiento verde o economía verde, entre otros, utilizados por diversos sectores con objetivos, ámbitos y características propias, aunque todos ellos parten del mismo enfoque y comparten los objetivos de sostenibilidad social, ambiental y económica. La economía circular se refiere a una economía eficaz y eficiente en el uso de los recursos/ biomasa con baja emisión de carbono para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador, en donde los subproductos de un proceso dado son utilizados como materia prima de otro proceso subsiguiente, es decir no se producen residuos y se mantiene el valor de los diversos componentes del sistema durante el mayor tiempo posible. La bioeconomía y la economía circular evidentemente convergen en sus objetivos y deben fortalecer sus complementariedades y sinergias para integrarse en las agendas de desarrollo sostenible y para enfrentar el cambio climático (Aguilar, *et al.*, 2018). La búsqueda de una visión integral global sobre el uso de los recursos biológicos lleva necesariamente a una mayor inclusión de aspectos económicos en la economía circular y a una mayor visibilidad de la sostenibilidad en la bioeconomía. Así como el aspecto circular es inherente a la biología, la bioeconomía circular es una parte integral de la economía circular y la bioeconomía.

Orígenes y desarrollo de la bioeconomía basada en el conocimiento

Europa ha sido tradicionalmente líder y pionera en diversos campos de las biociencias y las tecnologías relacionadas. Las bases de la bioeconomía se originaron a partir de las agendas estratégicas tempranas de la Comisión Europea, hacia 1993, las cuales destacaban la necesidad de invertir en conocimiento y resaltaban el papel de la ciencia en la innovación y el crecimiento económico. Se puede considerar que la bioeconomía es uno de los sectores económicos más antiguos de la humanidad, aunque las ciencias de la vida y la biotecnología lo están transformando en uno de los más innovadores (McCormik & Kautto, 2013). Con el desarrollo de los programas de biotecnología y ciencias biológicas, que sirvieron de marco para establecer una sólida cooperación transnacional en la Unión Europea, se obtuvo un incremento de la participación de la industria que permitió fortalecer tanto la excelencia científica como el aprovechamiento industrial de los resultados (Patermann & Aguilar, 2018). Por su parte, la **Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD)** publicó el documento “Biotecnología para el crecimiento y desarrollo sostenibles”, en el que, por primera vez a nivel global, se planteó el concepto de una bioeconomía como “un concepto que utiliza recursos

biológicos renovables, bioprocesos eficientes y alianzas eco-industriales para obtener bioproductos, empleos e ingresos sostenibles”. En dicho documento se introdujeron conceptos como que los beneficios ambientales eran un elemento motivador para la bioeconomía pero no suficiente para su aceptación social. También se planteó que las biotecnologías no siempre suministran la mejor solución técnica, pero que cuando lo hacen, los beneficios ambientales y económicos son evidentes. El documento también aborda temas como la revitalización de las economías rurales, la necesidad de una mayor integración y de nuevos conocimientos, así como de una clara articulación de políticas y de la convergencia de varios sectores, planteamientos que actualmente son las bases de muchas de las estrategias en bioeconomía en el mundo (**Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos - OECD**, 2004).

El Quinto Programa Marco de la Unión Europea (1998-2002) fue el punto de inflexión para definir las que denominó “acciones clave” enfocadas en requerimientos socioeconómicos y en objetivos de políticas de la Unión Europea. La “fábrica celular” (*Cell Factory*) fue una de las acciones seleccionadas con el objetivo de aprovechar la capacidad de la célula como fábrica y obtener nuevos medicamentos, productos alimenticios con propiedades nutritivas mejoradas, técnicas de degradación de compuestos recalcitrantes y enzimas industriales capaces de reemplazar procesos químicos menos amigables ambientalmente, entre otros bioproductos con alto valor agregado (Patermann & Aguilar, 2018). Los desafíos incluían promover el avance de tecnologías innovadoras a través de la investigación orientada según la misión, la utilización industrial de los resultados y el establecimiento de alianzas entre los sectores productivos y los de investigación. Los productos esperados eran de interés socioeconómico y se relacionaban con el diagnóstico y los tratamientos en salud, con la sostenibilidad ambiental y con el mejoramiento en la calidad de los alimentos, la agroindustria y la química fina. Las destrezas desarrolladas con estos esfuerzos iniciales, y el fortalecimiento de capacidades en ciencia, tecnología e innovación fueron el cimiento para iniciar hacia el 2005 la “Bioeconomía basada en el conocimiento” (*Knowledge-based Bio-Economy*, KBBE), acorde con la búsqueda de economías dinámicas y competitivas mediante industrias de alta tecnología que requieren de inversiones en innovación y mano de obra altamente calificada (Lewandowsky, 2018). Las experiencias y las expectativas de la sociedad por los resultados obtenidos en esta etapa, aunadas al interés en responder a los desafíos de seguridad alimentaria, energía, agua, producción sostenible y cambio climático y simultáneamente reducir la huella ambiental de la actividad humana, llevaron a la formulación de la estrategia en bioeconomía de la Unión Europea en el 2012, expresada en el documento “Innovación para el crecimiento sostenible: una bioeconomía para Europa” (Patermann & Aguilar, 2018). Dicha estrategia enfatiza la necesidad de una aproximación integral basada en el uso de nuevas tecnologías y en el

fortalecimiento de la cooperación entre la ciencia y la industria, así como con los responsables de las políticas y las decisiones en los gobiernos (Malyska & Jacobi, 2018).

Además de las iniciativas de la Unión Europea, surgieron simultáneamente otras en varios países, y diversas organizaciones internacionales formularon sus planteamientos sobre la bioeconomía. Una serie de factores convergieron para impulsar este enfoque: i) la acumulación de nuevo conocimiento sobre los recursos biológicos, plantas, animales y microorganismos, y sus procesos (secuenciamiento del ADN, desarrollo de las llamadas “ómicas”); ii) la oportunidad de combinar las ciencias biológicas con nuevos conocimientos en áreas convergentes como la informática, la nanotecnología y la biología sintética, entre otras; iii) el reconocimiento mundial de que los recursos biológicos ofrecen ventajas únicas frente a los recursos fósiles, pues son renovables, neutrales en cuanto a las emisiones de carbono, tienen circularidad (pueden reutilizarse y usarse en múltiples formas) y menor toxicidad, así como múltiples funciones, y iv) la afinidad de la bioeconomía con la sostenibilidad, pues, aunque por ser de base biológica un proceso no se convierte automáticamente en sostenible, sí es más factible que tenga un uso sostenible. Es claro que la sostenibilidad se determina por el ciclo de vida del proceso y el producto, no por colocarle una etiqueta (Patermann & Aguilar, 2018). Hay otros factores y condiciones que estimularon la adopción del enfoque de la bioeconomía a nivel global, pero la participación de actores clave se requiere para impulsar la innovación y la transferencia de tecnología definiendo agendas de innovación y hojas de ruta claras con apoyo financiero privado y público para facilitar el intercambio de opiniones y la adopción conjunta de prioridades, requerimientos y proyecciones. Por ejemplo, el grupo de trabajo conjunto de Estados Unidos y la Unión Europea en biotecnología, el cual se concreta en la *US-EU Task Force on Biotechnology Research*, ha venido desarrollando una serie de actividades desde 1990 y promoviendo el estudio científico en el campo de los biomateriales y la biorrefinería.

En septiembre del 2005 se realizó en Bruselas la Conferencia en Bio-Economía Basada en el Conocimiento (*Knowledge Based Bio-Economy*) en cuyas deliberaciones políticas y estratégicas participaron varios países (Canadá, Estados Unidos de América, Brasil, Argentina, Sur África, India, Rusia, Australia y Nueva Zelanda), y en las mismas fechas, se llevó a cabo una conferencia en bioeconomía en China. En estos países el concepto de bioeconomía continúa vigente y se expresa en estrategias nacionales explícitas. En los años siguientes el concepto se fue consolidando con apoyo del 7° Programa Marco de la Unión Europea hasta llegar a la formulación de la estrategia política en bioeconomía en febrero de 2012 (Patermann & Aguilar, 2018).

Los métodos y el componente de ciencia, tecnología e innovación

Los sectores industriales que derivan su materia prima o sus componentes fundamentales de los recursos naturales

constituyen la economía de base biológica o bioeconomía. Para contribuir al avance de los países en desarrollo y brindar estímulos a la industria de base biológica, es conveniente el uso de las biotecnologías en los diversos pasos de la cadena de valor, de manera que se asegure la sostenibilidad del sector y se reduzcan los impactos ambientales negativos que podrían presentarse. Los ejemplos en la agroindustria incluyen los ‘bioinsumos’, las nuevas tecnologías de procesamiento, el manejo de productos perecederos, los empaques biodegradables y las mejoras en la competitividad y la productividad. El papel de las biotecnologías va mucho más allá del crecimiento industrial, ya que abre oportunidades para avanzar en los objetivos de desarrollo sostenible (Lokko, *et al.*, 2018). El conocimiento científico y los desarrollos tecnológicos deben transformarse en productos o servicios beneficiosos para el sector productivo, la agricultura, la bioenergía y el desarrollo de nuevos bioproductos, para lo cual debe estimularse la capacidad de emprendimiento y favorecer la articulación entre la academia, la empresa privada y el sector financiero (Aguilar, *et al.*, 2018). Los avances en ciencia y tecnología, específicamente en biotecnología, son de relevancia sustancial para el desarrollo de la bioeconomía. Hay una enorme cantidad de información valiosa para la agricultura, el ambiente y la medicina que debe analizarse; en ese sentido, los expertos en bioinformática tienen un gran reto frente a las colecciones de megadatos y los bancos de datos en cuanto a su clasificación provechosa para investigadores y otros usuarios.

Los avances de la bioeconomía se han facilitado por el incremento del conocimiento y la experiencia técnica en torno a los procesos biológicos y sus aplicaciones prácticas. El desarrollo de la bioeconomía requiere de excelencia científica y de capacidades de transformación que permitan ampliar las fronteras para la utilización sostenible de toda la gama de recursos biológicos disponibles (Rodríguez, *et al.*, 2017). Asimismo, se necesita el respaldo de una sólida base de conocimiento, de capacidades tecnológicas y de un enfoque de innovación que permita obtener más con menos mediante el incremento de la productividad y la eficiencia de los recursos. Es necesario mejorar la eficiencia y reducir el uso de insumos como el agua, los fertilizantes, la energía en transporte, así como la generación de residuos (Aguilar, *et al.*, 2018). La clave para la inserción de la bioeconomía en los procesos de desarrollo es que los avances científicos y tecnológicos se implementen en los procesos productivos fortaleciendo las cadenas y las redes de valor. Una cadena de valor en bioeconomía incluye desde la producción primaria de los recursos biológicos (biomasa), su procesamiento y su transformación en bienes de mayor valor y su introducción en el mercado, lo cual involucra diversos sectores y aglutina numerosas disciplinas y actores. Por esto, la bioeconomía es un campo muy amplio de investigación, desarrollo e innovación que debe apoyarse en la colaboración entre las diversas disciplinas, incluidas las ciencias agrícolas y las

naturales, la economía y las ciencias sociales, entre otras, con un enfoque sistémico que permita facilitar la transición a una economía innovadora.

Las economías de muchos países en desarrollo se basan en la agricultura y otros recursos naturales renovables. La innovación es crítica para incrementar la productividad en la agricultura sostenible y en el sector agroalimentario, así como para la creación de empleos en sistemas productivos agrícolas, de procesamiento y en investigación y desarrollo (Sarkar, *et al.*, 2018). Los avances biotecnológicos ofrecen innumerables alternativas para el mejoramiento de plantas, animales y microorganismos, y el desarrollo de soluciones que permitan atender los requerimientos de seguridad alimentaria y nutricional, de intensificación sostenible de la producción agrícola, así como para enfrentar los retos que presenta la adaptación de cultivos al cambio climático, con beneficios significativos tanto para el consumidor como para el ambiente; puede, asimismo, transformar las estrategias necesarias para conservar la biodiversidad (Hodson, *et al.*, 2017). En general, la biotecnología ofrece oportunidades únicas para el desarrollo sostenible y, de hecho, ha innovado las prácticas industriales y agrícolas mejorando la diversidad y la calidad de productos que tienen mejor aceptación en el mercado internacional por provenir de este contexto de sostenibilidad. La transición a una economía baja en carbono y preferiblemente circular, y la mayor conciencia del público en torno a la sostenibilidad, han llevado a incrementar la demanda por productos y procesos con base biológica. En el sector agrícola las aplicaciones biotecnológicas han permitido incrementar la productividad, diversificar y dar valor agregado a los productos y, paralelamente, reducir el impacto ambiental (Lokko, *et al.*, 2018).

El desarrollo de metodologías para detectar y controlar amenazas bióticas y abióticas en la producción agrícola y para incrementar la resiliencia de los sistemas y gestionar de forma sostenible los recursos de agua y suelo es una prioridad para los investigadores (Sarkar, *et al.*, 2018). Puesto que la agricultura utiliza alrededor de un 70 % del agua dulce del planeta, cualquier medida para reducir y hacer su uso más eficiente resulta de gran impacto social y económico. La comprensión de la tolerancia al estrés, principalmente las sequías y las inundaciones en los cultivos, es una prioridad actual en la investigación agrícola y para ello se están desarrollando plantas transgénicas, o estudios de biología sintética y de edición de genes (Hodson, *et al.*, 2017). Un problema apremiante es la sobreexplotación de algunos ecosistemas, lo que, sumado a los cambios climáticos, puede llevar a la reducción de la productividad en algunas regiones; debe recordarse, además, que en respuesta a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, no es conveniente ampliar la frontera agrícola, sino más bien incrementar la productividad de los sistemas existentes con mayor eficiencia. La FAO plantea que mínimo un 90 % del incremento en la producción agrícola debe provenir de mayores rendimientos basados en el mejoramiento de los cultivos y de mejores y más eficientes

prácticas de producción, lo cual solamente puede lograrse con el mejoramiento de variedades. La investigación y el desarrollo han permitido desarrollar variedades de cultivos muy especializados, con nuevos rasgos que les permitan responder a las limitaciones, o agregar valor a los bioproductos y procesos subsecuentes haciendo más eficiente el uso del agua y de insumos (Malyska & Jacobi, 2018). Aumentar la producción en una unidad de tierra cultivable presenta enormes beneficios ambientales y económicos porque el mayor rendimiento por superficie reduce la demanda global de suelo agrícola.

Los métodos cuantitativos y cualitativos con enfoques de alto rendimiento, como la proteómica, los análisis de expresión y secuenciación, y la tecnología de la información (megadatos), constituyen avances que facilitan y aceleran los ciclos de mejoramiento. Además de la eficiencia en el uso de insumos, la protección frente a las plagas y enfermedades, incluidas las emergentes debidas al cambio climático, y las mejoras en la composición nutricional, entre las múltiples aplicaciones de las agrobiotecnologías se encuentran los sistemas de biodegradación de residuos de la industria agroalimentaria, la biorremediación y la obtención de bioinsumos, incluidos biofertilizantes (micorrizas y fijadores de nitrógeno), así como bioplaguicidas para el control biológico, y bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Hodson, *et al.*, 2017). Los estudios moleculares y genómicos también son esenciales para entender y replicar los comportamientos y procesos desarrollados por los organismos a lo largo de miles de millones de años de evolución, por ejemplo, para adaptarse a diferentes condiciones ambientales (Rodríguez, *et al.*, 2017). Una de las tecnologías más promisorias en este contexto es la que permite la edición de genomas (*genome-edited crops*, GEP), por sus amplias posibilidades de atender diversas limitantes de producción; es el caso del sistema de edición de genes mediante la tecnología CRISPR (*clustered regularly interspaced short palindromic repeats*) aplicada a la proteína Cas9 para la obtención de resistencia o tolerancia a plagas y enfermedades en aras de mejorar la calidad nutricional de los productos o buscar mecanismos de tolerancia a factores abióticos (sequías, inundaciones, salinidad) relacionados con el cambio climático. Esta tecnología presenta varias ventajas comparada con otros sistemas de mejoramiento molecular por su relativa simplicidad, así como por ser altamente específica y confiable para la edición de genes en células vegetales, animales y microbianas (Hodson, *et al.*, 2017).

Es fundamental contar con material para los programas de mejoramiento, ya sea de los cultivos o de especies silvestres. El uso de herramientas moleculares avanzadas como la tecnología de secuenciación masiva NGS (*next generation sequencing*), ha permitido hacer más rápido y eficiente el proceso de evaluación y cribado de secuencias de genomas completos y de secuenciación del ARN. Esta técnica permite estudiar más detalladamente la genómica y la posgenómica (transcriptómica, proteómica, metabolómica) de los cultivos,

así como los patrones de expresión de genes completos, y hace posible detectar líneas con rasgos de interés para enfrentar condiciones extremas. (Sarkar, *et al.*, 2018). Como complemento de todo lo anterior, la agricultura de precisión es un apoyo valioso para aumentar la eficiencia en el uso de insumos, minimizando las entradas y maximizando la producción.

Otro de los enfoques principales de los desarrollos en bioeconomía son las biorrefinerías para la obtención de bioenergía que permita la sustitución gradual de los combustibles fósiles por bioproductos renovables, o la obtención de bioproductos. Los productos y procesos biotecnológicos son, en principio y por definición, más limpios que los procesos petroquímicos o termoquímicos. En este campo, ha habido una serie de avances en los sistemas de transformación de biomasa. Los biocombustibles iniciales, denominados de primera generación, se obtenían a partir de cultivos alimenticios como el trigo, la remolacha azucarera y las plantas oleaginosas; los llamados de segunda generación se basan en el uso de biomasa no alimenticia, como el material lignocelulósico, incluidos los residuos de las cosechas de cereales y otros cultivos, y los de tercera generación se derivan de cultivos de algas. Los principales productores de biocombustibles líquidos son los Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea (McCormik & Kautto, 2013). La genómica (incluida la metagenómica), por su parte, también tiene un gran potencial para la biotecnología industrial y la producción de base biológica de combustibles, químicos y plásticos. La mayor presión para la sustitución de productos derivados del petróleo no se deriva de la escasez, porque actualmente no hay carencia, sino de las presiones políticas y sociales relacionadas con la sostenibilidad, el cambio climático y la seguridad energética. La genómica y la biología sintética han tenido avances importantes generando “fábricas microbianas” que producen diversos compuestos y bioproductos, incluidos monómeros plásticos, biocombustibles y precursores de compuestos de importancia industrial (Jiménez-Sánchez & Philp, 2015). En cuanto a la biología sintética, se han intensificado los trabajos que buscan la obtención de combustibles y otros compuestos de tipo aromático a partir de lignocelulosa, principalmente la proveniente de cultivos no alimentarios y de residuos agrícolas y forestales.

A partir de la biomasa y utilizando los avances biotecnológicos, se están produciendo compuestos básicos, como el ácido acrílico o el succínico, o materiales innovadores, como los biopolímeros o las fibras ecológicamente amigables, que permiten responder a la creciente demanda social de productos naturales, saludables y sostenibles. Esto representa una gran oportunidad para que los países en desarrollo puedan procesar y valorizar su gran riqueza y abundancia de biomasa, y transformarse de proveedores de materia prima en proveedores de productos procesados (Global Bioeconomy Summit - GBS, 2015b). Se trata de procesos de innovación basados en la adición de conocimiento y

tecnologías en múltiples sectores. Por ejemplo, las enzimas, un componente primordial de la bioeconomía, especialmente en países industrializados, han permitido el desarrollo de microorganismos más eficientes y productivos mediante el uso de las llamadas tecnologías del ADN recombinante y la ingeniería de proteínas. Las más comúnmente empleadas se utilizan como agentes blanqueadores, desengrasantes y como detergentes. Su uso también ha permitido aumentar la eficiencia de los procesos de digestibilidad del alimento animal reduciendo la generación de residuos y, por lo tanto, la contaminación (Lokko, *et al.*, 2018). Ha habido un notable desarrollo de la industria de procesamiento de alimentos y gran número de empresas se dedican a su producción (isomerasas, pectinasas, transaminasas, amilasas, galactosidasas, y proteasas como la quimosina), o a la obtención de productos de gran valor agregado, como la bromelina (proteasa utilizada en las industrias cárnica, vinícola, cervecera, cosmética y farmacéutica).

En cuanto a los recursos marinos, la denominada bioeconomía azul, son una importante fuente de recursos de biomasa para las industrias de la alimentación y la energía, con una amplia serie de cadenas de valor, por lo que son fuente de empleo y oportunidades de desarrollo industrial, así como de bienestar de la población, dado que la pesquería y la acuicultura contribuyen a la seguridad alimentaria y nutricional. La contribución de la bioeconomía azul con productos biotecnológicos como las enzimas, los biofármacos, los productos de aseo y cosmética e, incluso, las bioenergías a partir de residuos marinos o de algas, será mayor en la medida en que avancen las tecnologías actualmente en estudio (Bell, *et al.*, 2018). Una de las graves crisis que amenaza especialmente la vida y la sanidad de los océanos es la contaminación con plásticos y desechos de envases y empaques no degradables. Los desarrollos tecnológicos han permitido que actualmente se cuente con la posibilidad de usar bioplásticos biodegradables en la mayoría de las industrias que usan material plástico convencional. Los bioplásticos, con propiedades similares a los convencionales, reducen la dependencia de combustibles fósiles y la huella de carbono (European Bioplastics, 2018).

El ideal de la bioeconomía es que no haya residuos. En este sentido, y, asociado al concepto de biorrefinería, también debe mencionarse la posibilidad de cerrar ciclos mediante la utilización productiva de la biomasa de desecho derivada de procesos de producción y consumo (Rodríguez, *et al.*, 2017). En el mundo hoy hay numerosos consorcios que exploran el potencial de esta biomasa para transformarla, no solamente en bioenergía y compostaje, sino también en productos de alto valor agregado como los polihidroxialcanoatos (PHA), polímeros biodegradables con diversos usos, como el de los bioplásticos. El desarrollo de nuevas y avanzadas tecnologías de procesamiento de la biomasa de residuos permitirá, en algún momento, que este material no sea enviado a los rellenos sanitarios sino que se utilice como materia prima de procesos circulares de

elaboración de valiosos e innovadores productos (Bell, *et al.*, 2018). Para los residuos agroindustriales se utilizan diversos sistemas de procesamiento y valorización que permiten la recuperación de compuestos bioactivos y componentes alimenticios (fibras dietéticas, pigmentos oligosacáridos, flavonoides, carotenoides, pectinas), así como la obtención de enzimas, antibióticos, hongos comestibles, ácidos orgánicos y biocombustibles, y el uso del compostaje como fertilizante y para la recuperación de suelos.

En relación con consideraciones de salud humana, aunque el tema no se aborda en el presente documento, es necesario destacar que la industria médica y de cuidado de la salud es uno de los sectores más activos en la bioeconomía mundial y que su aprovechamiento de los avances en la tecnología del ADN recombinante ha tenido un importante papel en el desarrollo de nuevos productos, tratamientos, vacunas, servicios diagnósticos y biofármacos, los cuales incluyen la insulina (a partir de la década de 1980), los anticuerpos monoclonales para diagnóstico o terapias, el interferón, la eritropoyetina, y los moduladores enzimáticos, entre otros (Lokko, *et al.*, 2018).

Transición a una bioeconomía sostenible a nivel global

Actualmente, más de 40 países promueven activamente la bioeconomía, con el fin de responder a los retos del desarrollo sostenible. Los gobiernos deben reflexionar sobre el amplio potencial de los recursos biológicos y del alcance de sus múltiples aplicaciones. Para que el enfoque bioeconómico se convierta en el motor de la transformación hacia la sostenibilidad en un contexto de economía circular, es indispensable un enfoque más sistemático, intersectorial e internacional. Las políticas bioeconómicas no pueden estar fragmentadas en esferas tecnológicas separadas, sino que las estrategias de investigación, desarrollo e innovación deben articular en forma integrada los sectores de la agricultura forestal y marina, de la salud y los alimentos, de las biotecnologías y las tecnologías convergentes, las energías renovables y la conservación y manejo ambientales, todo ello combinado con la sistematización de la información y la digitalización (Global Bioeconomy Summit - GBS, 2015b).

En consonancia con el Acuerdo de París del 2015, numerosos países buscan responder a la reducción de emisiones y la sostenibilidad mediante la creación de empleos y el crecimiento económico con inversión y tecnologías bajas en carbono. La transición de las fuentes de energía y los materiales no renovables hacia la de recursos renovables va a requerir tiempo, pues son numerosos los obstáculos técnicos, sociales y políticos. En el proceso hay que responder a muy diversos desafíos: además de considerar la seguridad energética, la seguridad alimentaria y nutricional y la del agua, también se debe atender al cambio climático (Philp, 2018). En este contexto, la bioeconomía se ha convertido en parte integral de las estrategias de desarrollo en muchos países del mundo. En general, las estrategias de los países se fundamentan en una agricultura más eficiente para incrementar la producción de alimentos y la de biomasa

para la producción de biocombustibles y otros bioproductos. Al adoptar este enfoque, se hace necesario reconciliar la agricultura y las necesidades de la industria frente a la biomasa y la tierra (Jiménez-Sánchez & Philp, 2015). La tendencia mundial hacia la bioeconomía se despliega en diversas dimensiones dependiendo de las condiciones naturales, sociales y políticas. El desarrollo de bioeconomías inteligentes y sensatas necesita de sólidos conceptos científicos, de soporte a largo plazo en la innovación centrada en la misión, y de un equilibrio sensato entre el impulso de la ciencia y la demanda social y del mercado.

El concepto de bioeconomía se ha venido promoviendo alrededor del mundo desde 1997; entre otros, lo ha impulsado la *American Association for the Advancement of Science*, y en el 2012 la administración Obama presentó su estrategia oficial llamada "Plan Nacional de Bioeconomía" (*National Bioeconomy Blueprint*) en las áreas de investigación, desarrollo e innovación de las ciencias biológicas para generar actividad económica y beneficio público en diversos campos como el de los nuevos fármacos, el rendimiento de los cultivos, la producción de biocombustibles novedosos y de productos químicos de base biológica, entre otros (Lewandowski, 2018).

Según la última actualización del informe del Consejo Alemán de Bioeconomía sobre estrategias nacionales de bioeconomía alrededor del mundo (Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR, 2018), la bioeconomía ha cobrado mayor impulso a nivel global. En los inicios del 2018, cerca de 50 países incluían estrategias de bioeconomía en sus planes de desarrollo, y se han establecido estrategias sub-regionales. Es claro que hay una búsqueda afanosa de armonizar la humanidad con la naturaleza y, paralelamente, promover la innovación en industrias que generen oportunidades de desarrollo y de empleo. El punto clave es que la transición hacia una bioeconomía sostenible requiere de la articulación de políticas y de la colaboración científica internacional (Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR, 2018). Todas estas estrategias se encuentran alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible en busca del crecimiento económico doméstico, la protección ambiental, la competitividad y el empleo que promuevan la inclusión social.

La bioeconomía está recibiendo cada vez mayor atención a nivel regional. A continuación se presenta el listado de los países que cuentan con políticas definidas o estrategias en bioeconomía, incluidos los últimos tres años (Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR, 2018). Estas estrategias son variadas y su énfasis se centra en la industrialización de biomasa, la bioenergía, las aplicaciones biotecnológicas; la bioindustria; la economía verde, y la economía azul o economía de los océanos.

Estrategias transnacionales: Unión Europea, Países Nórdicos, OECD, y el Foro Global para la Alimentación y la Agricultura (GFFA).

Estados Miembros del G7 (incluidos también por regiones): Canadá, Francia, Alemania, Japón, Reino Unido y Estados Unidos de América.

Países BRICS: Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica, todos ellos cuentan con estrategias concretas.

Asia y el Pacífico: Australia, China, India, Indonesia, Japón, Malasia, Nueva Zelanda, Corea del Sur, Rusia, Sri Lanka, Tailandia y Filipinas.

Europa: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Países Bajos, Noruega, Portugal, Reino Unido, Suecia y Países Nórdicos del Oeste (Islandia, Islas Feroe, Groenlandia).

África: Kenia, Mozambique, Isla Mauricio, Ghana, Malí, Namibia, Nigeria, Senegal, Sudáfrica, Tanzania, Uganda.

América: Canadá, Estados Unidos de América, Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México, Paraguay, Uruguay (No explícito con actividades relacionadas, Chile, Ecuador, Perú).

Llama la atención que los documentos de políticas y estrategias anteriores al 2015 utilizaban diferentes términos y definiciones, como economía biobasada, bioindustria, y economía verde, entre otros, en tanto que en los documentos oficiales de los últimos años el término bioeconomía prevalece claramente. La mayoría de estos documentos hacen énfasis en su carácter transformativo, y se enfocan en la producción y el aprovechamiento de los recursos biológicos para generar, preferentemente, bioproductos de alto valor agregado.

Uno de los ejemplos destacados es la bioeconomía europea, que en el 2013 representaba cerca de 17 millones de empleos, con un volumen de negocios de más de 2 trillones de euros (€2 x 10¹⁸), cifras que se resumen en las figuras 1 y 2. Actualmente, esta genera cerca de 18 millones de empleos en varias industrias bien establecidas, siendo el mayor el de los empleos en el sector agrícola, seguido por la agroindustria y la industria de alimentos, en tanto que económicamente el mayor volumen se concentra en la producción de alimentos, seguida por la agricultura y las industrias forestales y de pulpa y papel (El-Chichakli, *et al.*, 2016; Lewandowski, 2018). Si bien la economía de base biológica en Europa contribuye a reemplazar combustibles fósiles, no se trata solamente de esto. También se busca desarrollar nuevos sectores emergentes, como el de biomateriales y la denominada química verde, y encontrar nuevos usos competitivos para los recursos naturales y liderar la creación de nuevos mercados mediante la adición de conocimiento (Bell, *et al.*, 2018).

La Unión Europea viene realizando grandes inversiones en tecnologías emergentes, como la biología sintética, la ingeniería metabólica o la química fina de bioproductos, con el fin de incorporar estos avances en el desarrollo de la economía de base biológica. Se buscan, por ejemplo, procesos para la utilización del CO₂ emitido por las industrias, lo que podría ser un nuevo elemento crítico para la economía circular, así como una tecnología trascendente para la mitigación del cambio climático. Los potenciales avances tecnológicos podrían llevar a reducciones mundiales de CO₂ del orden de 500 a 1.000 millones de toneladas por

año (Lewandowski, 2018). Un ejemplo de estos desarrollos tecnológicos es el proyecto BISIGODOS (<http://www.bisigodos.eu/>) de biorresinas y químicos obtenidos de biorrefinerías de algas, cuyo objetivo es la obtención de bioproductos de alto valor agregado (como bioresinas para revestimientos, tipografía, alimentos, cosméticos y adhesivos), aminoácidos y otros compuestos a partir del cultivo de algas alimentadas directamente con el CO₂ proveniente de las emisiones industriales (cemento, acerías, plantas térmicas, etc.), y con luz solar y algunos nutrientes. El proceso utiliza la radiación solar, los nutrientes y la biomasa de microalgas marinas y se basa en la tecnología desarrollada por Biofuel Systems (BFS) para la producción de bioaceite (Bell, *et al.*, 2018). En este mismo sentido, organizaciones como la Fraunhofer de Europa desarrollan y transfieren tecnologías a nivel global. En Latinoamérica se desarrollan actividades en Chile y Brasil.

Bioeconomía en Latinoamérica y el Caribe

En Latinoamérica y el Caribe el concepto de bioeconomía se ha venido consolidando, y se promueve como modelo alternativo para el desarrollo sostenible y el crecimiento verde. La extraordinaria riqueza en biodiversidad de esta región del mundo y su gran capacidad de producción de biomasa, ofrecen un enorme potencial para la producción y transformación de productos y representa una coyuntura estratégica para promover la diversificación productiva agrícola y agroindustrial. Para ello, es necesario potenciar las capacidades regionales y fortalecer la cooperación científica en biotecnología y otras tecnologías habilitantes (nanotecnología, tecnologías informáticas), promover actividades en bioenergías y la adición de valor a la producción primaria, así como diversificar la base de las economías regionales. Paralelamente, es necesario encausar acciones de reducción de las emisiones y de mitigación y adaptación al cambio climático a lo largo de las cadenas de valor (Rodríguez, *et al.*, 2017). Si bien la región es muy heterogénea, en términos generales cuenta con un buen potencial subutilizado de recursos de infraestructura y de personal capacitado de alto nivel.

No todos los países cuentan con políticas o estrategias explícitas en bioeconomía, aunque algunos, como Argentina, Brasil, Colombia y Ecuador, han manifestado su interés en formularlas. Colombia, Paraguay y Uruguay han iniciado actividades en la bioeconomía basada en el conocimiento (bioprospección, tecnologías agrícolas), en tanto que agencias de cooperación internacional como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de las Naciones Unidas (CEPAL), vienen promoviendo la articulación y la cooperación para el desarrollo de la bioeconomía en aspectos de políticas y alianzas entre el sector privado y la investigación (Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR, 2018). En el caso de Centroamérica, se considera que el potencial de la bioeconomía está ligado directamente con la producción agrícola y con la investigación, el desarrollo

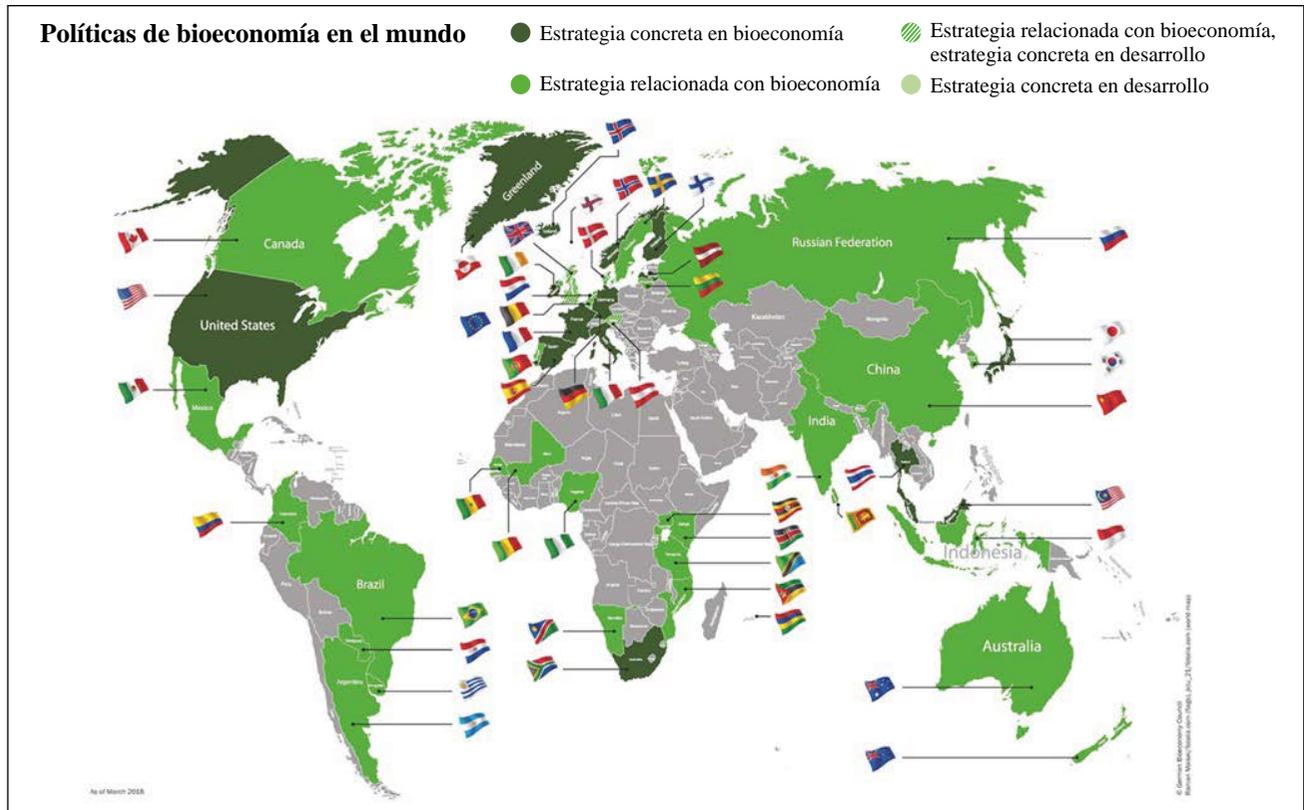
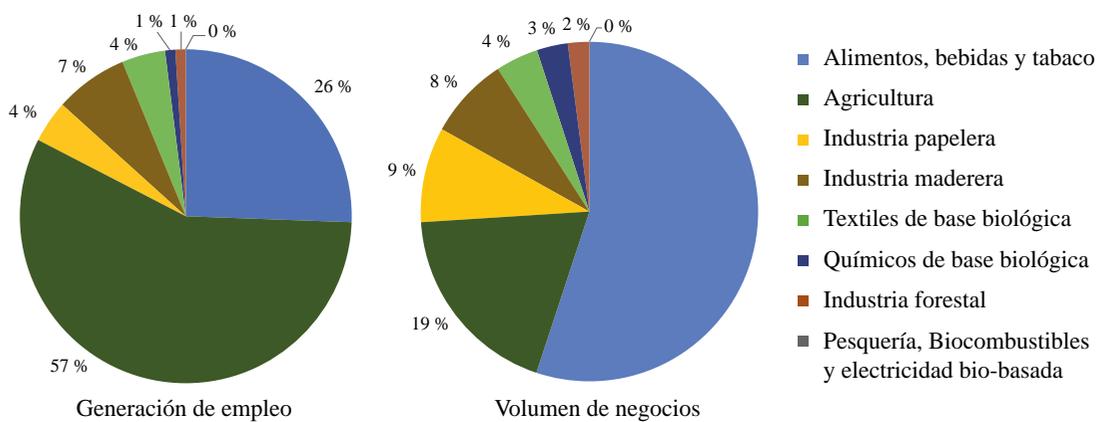


Figura 1. Políticas y estrategias en bioeconomía en el mundo hasta 2017. Fuente: Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR, 2017. (<http://bioekonomierat.de/en/international0/>)



Sector	Empleos (millones) Total: 17 millones	Volumen de negocios en billones € Total: 2 trillones € (2 x 1018)
Alimentos, bebidas y tabaco	4,3	1,12 Trillones (1,12 x 1018)
Agricultura	9,7	380
Industria papelera	0,6	178
Industria maderera	1,1	153
Textiles de base biológica	0,7	78
Químicos de base biológica	0,2	52
Industria forestal	0,1	35
Pesquería, Biocombustibles y electricidad bio-basada	<0,1	<10

Figura 2. Bioeconomía en la Unión Europea: generación de empleo y volumen de negocios en el 2013. Fuente: elaboración propia a partir de datos de *El-Chichakli, et al., 2016* y *Ronzon, et al., 2015*

y la innovación, y algunos grupos han venido trabajando en productos tradicionales nativos subutilizados con potencial de interés. Se considera que es preciso mantener y promover la capacidad de suministro de recursos naturales de estos países, incluidas el agua y la biodiversidad, así como los recursos que permiten ofrecer servicios ecosistémicos, todo ello enmarcado en las actividades de adaptación y mitigación del cambio climático, cuyos efectos se han venido manifestando abiertamente en los últimos años, en especial en el Caribe (Vega & Madrigal, 2017)

Como base para iniciar la cooperación regional, entre el 2011 y el 2013 se desarrolló un proyecto del Programa 7 de la Comisión Europea “ALCUE-KBBE: hacia una bioeconomía basada en el bioconocimiento en América Latina en asociación con Europa”, cuyo objetivo fue establecer una plataforma de cooperación internacional entre la Unión Europea y Latinoamérica y el Caribe en investigación, desarrollo e innovación tecnológica en temas de bioeconomía, en el cual participaron 12 países. El proceso se inició con un análisis comparativo a partir del cual se identificaron cuatro grandes áreas prioritarias para la región: i) bioenergía; ii) procesos y productos biotecnológicos; iii) valorización de la biodiversidad y servicios ecosistémicos, y iv) ecointensificación. Durante los tres años del proyecto se analizaron meticulosamente los recursos naturales renovables de la región, las capacidades en investigación, desarrollo e innovación, la infraestructura disponible, el marco político, normativo e institucional en la región, y se hicieron estudios de caso de experiencias exitosas. En forma complementaria, se analizaron las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas en un ejercicio transformativo que permitió la detección de acciones estratégicas para la región. Como parte de los resultados del proyecto se publicó el libro “Hacia una bioeconomía en América Latina y el Caribe en asociación con Europa” (Hodson, 2014), entre cuyas conclusiones se destaca que no hay una definición única para la bioeconomía sino que cada región, país o subregión necesita establecer su propia definición y sus delimitaciones con base en las condiciones relevantes, en sus políticas y prioridades y en sus objetivos socioeconómicos, ambientales e institucionales.

Es interesante anotar que tres de los países de la región se ubican entre los primeros cinco que utilizan cultivos genéticamente modificados y son proveedores mundiales de grano (James, 2016). Asimismo, la región genera prácticas agrícolas ecoeficientes, como la agricultura de precisión, la de no labranza, el manejo integrado de plagas y de nutrientes y el uso de enfoques de agricultura orgánica. Por otra parte, la región es líder en la producción de bioenergía (siendo Argentina, Brasil y Colombia los países más avanzados en este campo), y hay esfuerzos ampliamente conocidos para institucionalizar la valorización de la biodiversidad (Rodríguez, et al., 2017). Los esfuerzos de cooperación con la Unión Europea han continuado, principalmente a través del proyecto ALCUE-NET, con el cual se buscó fortalecer

la red de cooperación, especialmente con la organización de talleres en áreas temáticas transversales como la biodiversidad, la energía y la bioeconomía. Este programa finalizó en noviembre de 2017 y actualmente se continúa la colaboración a través del Programa Horizonte 2020.

Ha habido avances muy interesantes en algunos de los países de la región. Por ejemplo, en Argentina se ha planteado un proceso nacional para el desarrollo de una estrategia marco de bioeconomía a nivel regional vinculada al concepto de territorios inteligentes (Rodríguez, 2018). El gobierno argentino publicó en el 2017 su documento “Bioeconomía argentina”, que presenta el plan de acción para el desarrollo de la bioeconomía en ese país, y, posteriormente, un programa que destaca la necesidad de implementar estrategias en políticas y acciones definidas. Por su parte, la Bolsa de Cereales ha destacado la importancia de los sectores de energía y alimentos, recomendando el desarrollo de políticas en biotecnología para promover su aplicación en la producción de alimentos, en el sector farmacéutico y en la protección ambiental. También el gobierno de Brasil ha promovido desarrollos en bioeconomía por más de cinco décadas con políticas, leyes y estrategias. El enfoque principal ha sido el uso sostenible de la biodiversidad, la biotecnología y la producción de biocombustibles (Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR, 2018). En ese país se destacan dos iniciativas exitosas en el marco de la asociación con la *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária* (Embrapa): Embrapa Agroenergía, cuyo objetivo es desarrollar soluciones tecnológicas con un fuerte componente industrial para que las empresas desarrollen las últimas fases de escalamiento y mercado. Hoy cuentan con 34 tecnologías en estado intermedio de desarrollo (<https://www.embrapa.br/agroenergia/vitrine>), y Red Passitec de biodiversidad y ciencia para desarrollar tecnologías destinadas al uso funcional de especies silvestres de pasifloras en toda la cadena de suministro y valor. En el 2013 liberaron una variedad de *Passiflora setacea*, la BRS-PC (*Pearl Passion Fruit*), que en cuatro años se convirtió en el principal ingreso de las familias de la región de Piripau en el Distrito Federal (Torres, 2018):

En cuanto a la bioeconomía en Colombia, desde hace varios años se percibe gran interés en diversas instancias del gobierno para acoger el concepto de desarrollo basado en la bioeconomía, y se han elaborado diversos documentos en biotecnología, gestión de la biodiversidad, innovación e industria. En el Foro Económico Mundial 2016, Colombia lanzó su estrategia de nueva economía basada en la agroindustria, los servicios y el turismo como motores del crecimiento. Además, la dinámica en torno a la conservación de la biodiversidad y el estudio de la vulnerabilidad ante el cambio climático se imponen cada vez más, por lo que se considera que el enfoque de la bioeconomía puede cumplir con un triple propósito al integrar sostenibilidad ambiental, social y económica. En este sentido, está en desarrollo la iniciativa “Misión de Crecimiento Verde” del Departamento

Nacional de Planeación, la cual finalizará a mediados del 2018 y busca formular la “Política de crecimiento verde” incluyendo la bioeconomía e involucrando de manera estratégica al sector privado. Entre los objetivos de dicha política está asegurar el uso sostenible del capital natural y de los servicios de los ecosistemas, posicionar la bioeconomía como un sector competitivo, y asegurar la inclusión social y el bienestar (Gómez, 2018). Por otra parte, el Programa de Colombia-Bio, liderado por Colciencias, busca “contribuir a un desarrollo sostenible y socialmente inclusivo.”

Con el fin de articular e integrar intereses, en abril del 2017 se llevó a cabo el “Foro Nacional de Bioeconomía – Innovación territorial sostenible” con la participación, entre otros, de los directores de Corpoica, del Instituto Alexander von Humboldt, Fedepalma, ColombiaBio y el Codirector del Banco de la República. En él se determinaron los siguientes senderos productivos para la bioeconomía en Colombia: el aprovechamiento de los recursos de la biodiversidad, la eointensificación, la biotecnología para bioproductos, los servicios ecosistémicos, la eficiencia en las cadenas (o redes) de valor, y la eficiencia en biorrefinerías.

En Colombia hay numerosos grupos de investigación y desarrollo con las capacidades necesarias para adelantar actividades que contribuyan a un modelo bioeconómico; el eje central de la mayoría de ellos es la investigación en biotecnología en los sectores agropecuario, de procesamiento de alimentos y de microbiología industrial, fundamentalmente en la producción primaria. Convendría fortalecer sus capacidades para que incorporen en sus trabajos el concepto de la circularidad en las cadenas de valor en su campo y la generación de bioproductos con mayor valor agregado. Un ejemplo interesante son los modelos que han surgido en el sector agropecuario que aplican principios de la bioeconomía a través del desarrollo de bioinsumos que, además de reducir el costo de producción, son claramente más sostenibles. Es innegable que hoy hay en el país numerosas iniciativas a diferentes niveles, desde empresas consolidadas hasta emprendimientos de jóvenes investigadores. Internacionalmente se reconoce la trayectoria en el sector de la bioenergía, y la producción de bioetanol y biodiesel (empresas de caña de azúcar y de aceite), así como las experiencias exitosas en biotecnologías y eointensificación, incluidos los organismos genéticamente modificados, los bioinsumos, la biorremediación y la industria química. En el campo de la biodiversidad aplicada a la salud hay iniciativas en farmacéutica y fitoquímica, biocosmética y otras aplicaciones. Algunas de estas empresas se destacan por sus desarrollos y avances, como EcoFlora, líder en extractos vegetales para la protección de cultivos, la Fundación Laboratorio de Farmacología Vegetal LABFARVE, con la producción de fitoterapéuticos, y Manuelita S.A., con la de biocombustibles. Recientemente, surgió el proyecto Arthrofood de jóvenes emprendedores colombianos, que es la primera granja de producción de grillos para proteína animal en Latinoamérica.

Aspectos políticos y sociales

En los últimos años la bioeconomía se ha establecido a nivel mundial como el cimiento de una economía sostenible y amigable con el planeta. La utilización dirigida de recursos biológicos para propósitos industriales contribuye a reconciliar la ecología con la economía y puede promover un cambio fundamental en los procesos industriales (Schütte, 2018). Los descubrimientos disruptivos en biología molecular en los últimos 50 años han llevado a aplicaciones que han cambiado en forma extraordinaria la sociedad. Asimismo, algunas estrategias bioeconómicas han ido desplazando el enfoque técnico y económico relativamente reduccionista hacia uno más amplio y más integrador de la ciencia, la tecnología, la economía, el ambiente, el desarrollo industrial y rural, los procesos regulatorios y las ciencias sociales (Aguilar, *et al.*, 2018).

Un aspecto de gran importancia es la información y la comprensión de la bioeconomía por parte del público, especialmente los aspectos relacionados con los beneficios, los riesgos y las consideraciones éticas, así como la adopción de patrones sostenibles de consumo y producción. Para avanzar en una bioeconomía competitiva y sostenible, es fundamental impulsar la gobernanza participativa para comprometer a toda la sociedad y a todas las partes relevantes en un diálogo abierto e informado, y comprometer a los gobiernos y la industria en los esfuerzos concertados de impulso a la innovación con metas definidas (McCormik & Kautto, 2013). La aceptación y la adopción de la bioeconomía requieren de una sociedad con “mente biológica” que participe de forma activa y comprometida en los esfuerzos de sostenibilidad y en la protección de los recursos renovables. Para ello es necesario involucrar al público en las discusiones y en la adopción de decisiones en un proceso abierto y ampliamente participativo e inclusivo. El concepto de cascada de valor le confiere a la bioeconomía una naturaleza integradora, con implicaciones para la política pública. Es conveniente evitar la dicotomía entre alimentos y energía. La seguridad alimentaria y la conservación ambiental deben prevalecer por encima de cualquier otra consideración, lo cual va ligado a un razonamiento ético y a las consideraciones sobre el uso recreacional del suelo y los recursos.

El avance adecuado de la bioeconomía exige cumplir con los siguientes cinco supuestos: i) condiciones naturales, que se desprenden de la riqueza de la biodiversidad, los suelos, y condiciones agroclimáticas que potencien la producción de biomasa, bioenergía y bioproductos en forma masiva; ii) recursos laborales y personal capacitado; iii) recursos de conocimiento para fomentar la innovación con las inversiones correspondientes en investigación, desarrollo e innovación; iv) recursos financieros para la inversión en todas las cadenas de valor, especialmente capital de riesgo, y v) infraestructura de apoyo en términos de transporte, información y comunicaciones (Lewandowski, 2018). La adopción exitosa de la bioeconomía requiere un discurso social sobre las formas en que la sociedad puede reconciliar crecimiento económico

y sostenibilidad, para lo cual se necesita de adaptación y ajuste permanente de iniciativas y agendas, así como de una cooperación internacional eficiente (Schütte, 2018).

En la reciente Cumbre Mundial en Bioeconomía (abril de 2018), se definieron temas de relevancia global para las agendas políticas y de investigación, principalmente enfocados en la relación de la bioeconomía con el cambio climático y el impacto en la salud; la digitalización y las tecnologías convergentes ('bio', 'nano', 'info'); la comunicación y la confianza del público en las ciencias y tecnologías transformadoras; la educación interdisciplinaria y el entrenamiento a todos los niveles; la biodiversidad como recurso y base de la bioeconomía; la bioeconomía marina y de océanos; las fuentes innovadoras de financiamiento, y la bioeconomía en las ciudades. Entre las recomendaciones se encuentra el establecimiento de mecanismos internacionales de coordinación y de intercambio de conocimientos con los participantes en esta reunión y con organizaciones de las Naciones Unidas a través de foros sobre el desarrollo sostenible, la biodiversidad y la innovación, especialmente el Acuerdo de París sobre el cambio climático (GBS, 2018).

A pesar de sus ventajas evidentes, y como siempre sucede con cualquier cambio de paradigma, se presentan inquietudes y detractores. Hay autores que consideran la bioeconomía como la "neoliberalización" de la naturaleza, es decir, la prevalencia de los valores del mercado, y como una forma de beneficiar el interés de grandes compañías interesadas en comercializar la innovación y las nuevas tecnologías y no a los pequeños productores (Lewandowski, 2018). Algunos de los debates sobre la bioeconomía y los desarrollos biotecnológicos están atravesados por aspectos éticos, ambientales, económicos, sociales y legales, como los derechos de propiedad intelectual y las implicaciones de las patentes en el costo y la accesibilidad de la tecnología en los países en desarrollo, así como la concientización del público y su aceptación de los desarrollos (Krauss & Kutenkeuler, 2018).

Conclusiones

El enfoque de la bioeconomía permite proponer soluciones nuevas a problemas antiguos. Las soluciones de base biológica con frecuencia suministran beneficios innovadores y únicos, lo cual facilita el consumo sostenible (Global Bioeconomy Summit - GBS, 2018). Los avances recientes en ciencia y tecnología han permitido encontrar nuevas funciones y propiedades de los recursos biológicos. Numerosos países vienen adoptando este modelo, y hay una variada gama de bioeconomías alrededor del mundo cuyo desarrollo depende de los recursos naturales disponibles, las capacidades científicas y las tendencias políticas y sociales, aunque todas coinciden en la adopción de modelos de producción y consumo más sostenibles. Es importante destacar que la adopción del modelo de bioeconomía implica una transición y requiere un cambio conceptual en todos los sectores de la sociedad, así como su compromiso decidido para lograr una participación social incluyente.

Una consideración fundamental es cómo incrementar el flujo de los resultados en ciencia y tecnología a su aplicación social para el bien común, de manera que sean un factor de bienestar para la población y, además, un elemento central que contribuya a la sostenibilidad del planeta. Conviene analizar cuáles son los principales problemas relacionados con la sostenibilidad y definir las acciones prioritarias que permitan enfrentarlos, por ejemplo, las biorrefinerías de desechos para valorizar los residuos, una de cuyas posibilidades es la producción de envases y empaques biodegradables a partir de residuos agrícolas.

La transición de una economía fósil a una economía basada en el conocimiento y en el uso juicioso de los recursos biológicos permite enfrentar varios de los retos sociales y las preocupaciones de desarrollo sostenible y constituye una excelente contribución para avanzar en el logro de los objetivos de desarrollo sostenible, especialmente de los siguientes: el objetivo 2, relativo al hambre y la seguridad alimentaria; el 3, a la salud y el bienestar; el 6, al agua limpia y el saneamiento; el 7, a la energía asequible y no contaminante; el 9, a la promoción de la industrialización inclusiva y sostenible; el 11, a las ciudades y comunidades sostenibles; el 12, a la producción y el consumo responsables; el 13, a la acción por el clima; al 14, a la vida submarina, y el 15, a la vida de los ecosistemas terrestres. Con el aporte a estos objetivos, se mejorarían las condiciones del planeta y, por consiguiente, el bienestar y la sostenibilidad de todas las formas de vida.

Conflicto de intereses

La autora declara que no existe conflicto de intereses en torno al desarrollo de la investigación.

Referencias

- Aguilar, A., Wohlgenuth, R., Twardowski T. (2018) Perspectives on bioeconomy. *New Biotechnology*. **40**: 181-184.
- Bell, J., Paula, L., Dodd, T., Németh, S., Nanou, C., Mega, V., Campos, P. (2018). EU ambition to build the world's leading bioeconomy—Uncertain times demand innovative and sustainable solutions. *New Biotechnology*. **40**: 25-30.
- Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR. (2017). Bioeconomy policies and strategies established by 2017. Diagram prepared by the German Bioeconomy Council (Bioökonomierat – BÖR), Berlin. Fecha de consulta: marzo de 2018. Disponible en: <http://biooekonomierat.de/en/international0/>
- Consejo Alemán de Bioeconomía - BÖR. (2018). Bioeconomy Policy (Part III) Update Report of National Strategies around the World. A report from the German Bioeconomy Council. Fecha de consulta: abril de 2018. Disponible en: http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS_2018_Bioeconomy-Strategies-around-the_World_Part-III.pdf
- Cristóbal, J., Matos, C.T., Aurambout, J.P., Manfredi, S., Kavalov, B. (2016). Environmental sustainability assessment of bioeconomy value chains. *Biomass and Bioenergy*. **89**: 159-171.
- El-Chichakli, B., von Braun, J., Lang, C., Barben, D. (2016). Five cornerstones of a global bioeconomy. *Nature*. **535**: 221-223

- European Bioplastics (s.f.).** (2018). Facts and figures. Fecha de consulta: marzo de 2018. Disponible en: http://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_Facts_and_figures.pdf
- Global Bioeconomy Summit – GBS.** 2015. (2015a). Communiqué Global Bioeconomy Summit 2015. Making bioeconomy work for sustainable development. Berlin. Fecha de consulta: enero de 2018. Disponible en: http://gbs2015.com/fileadmin/gbs2015/Downloads/Communique_final_neu.pdf
- Global Bioeconomy Summit – GBS.** 2015. (2015b). Conference Report. For a Global Sustainable Bioeconomy. Berlin. Fecha de consulta: noviembre de 2017. Disponible en: <http://gbs2015.com/documentation/>
- Global Bioeconomy Summit – GBS.** 2018. (2018a). Communiqué. Global Bioeconomy Summit 2018 - Innovation in the Global Bioeconomy for Sustainable and Inclusive Transformation and Wellbeing. Fecha de consulta: abril de 2018. Disponible en: http://gbs2018.com/fileadmin/gbs2018/Downloads/GBS_2018_Communique.pdf
- Gómez, H.J.** (2018). Avances en la formulación de la política pública para el desarrollo de la bioeconomía en Colombia. Departamento Nacional de Planeación. Seminario Regional CEPAL. Fecha de consulta: febrero de 2018. Disponible en: http://conferencias.cepal.org/bioeconomia_AL/
- Hodson de Jaramillo, E.** (Editor). (2014). Towards a Knowledge Based Bio-Economy in Latin America and the Caribbean. Editorial Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Hodson de Jaramillo, E., Castaño, J., Poveda, G., Roldán, G., Chavarriaga, P.** (2017). Seguridad alimentaria y nutricional en Colombia. En: Retos y oportunidades de la seguridad alimentaria y nutricional en las Américas - El punto de vista de las Academias de Ciencias. Red Interamericana de Academias de Ciencias (IANAS); Red Mundial de Academias de Ciencias (IAP); Ministerio Federal de Educación e Investigación Alemania (BMBF); Academia Nacional de Ciencias de Alemania-Leopoldina. p. 220-249.
- James, C.** (2016). Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2016. ISAAA Brief No. 52. ISAAA: Ithaca, NY. Fecha de consulta: octubre de 2017. Disponible en: <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/52/executivesummary/pdf/B52-ExecSum-English.pdf>
- Jiménez-Sánchez, G. & Philp, J.** (2015). Omics and the bioeconomy. *EMBO Reports*. **16**: 17-20.
- Krauss, J.B. & Kuttenuker, D.** (2018). Intellectual property rights derived from academic research and their role in the modern bioeconomy—A guide for scientists. *New Biotechnology*. **40**: 133-139.
- Lewandowski, I.** (Editor). (2018). Bioeconomy - Shaping the Transition to a Sustainable, Biobased Economy. Springer International Publishing. 164 p. Doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68152-8>
- Lokko, Y., Heijde, M., Schebesta, K., Scholtès, P., Van Montagu, M., Giacca, M.** (2018). Biotechnology and the bioeconomy - Towards inclusive and sustainable industrial development. *New Biotechnology*. **40**: 5-10
- Malyska, A. & Jacobi, J.** (2018). Plant breeding as the cornerstone of a sustainable bioeconomy. *New Biotechnology*. **40**: 129-132.
- McCormik, K. & Kautto, N.** (2013). The Bioeconomy in Europe: An Overview Sustainability. **5** (6): 2589-2608.
- Organisation for Economic Co-operation and Development - OECD.** (2004). Biotechnology for Sustainable Growth and Development. OECD Publications, Paris. Fecha de consulta: noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.oecd.org/sti/biotech/23536372.pdf>
- Patermann, C. & Aguilar, A.** (2018). The origins of the bioeconomy in the European Union. *New Biotechnology*. **40**: 20-24
- Philp, J.** (2018). The bioeconomy, the challenge of the century for policy makers. *New Biotechnology*. **40**: 11-19
- Rodríguez, A.G.** (2018). Bioeconomía en América Latina y el Caribe. Seminario Regional CEPAL. Fecha de consulta: febrero de 2018. Disponible en: http://conferencias.cepal.org/bioeconomia_AL/
- Rodríguez, A.G., Mondaini, A.O., Hirschfeld, M.A.** (2017). Bioeconomía en América Latina y el Caribe. Contexto global y regional y perspectivas. Unidad de Desarrollo Agrícola, División de Desarrollo Productivo y Empresarial de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Serie Desarrollo Productivo CEPAL (215). 94 p.
- Ronzon, T., Santini, F., M'Barek, R.** (2015). The Bioeconomy in the European Union in numbers. Facts and figures on biomass, turnover and employment. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Spain, 4p. Fecha de consulta: febrero de 2018. Disponible en: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/JRC97789%20Factsheet_Bioeconomy_final.pdf
- Sarkar, S.F., Poon, J.S., Lepage, E., Bilecki, L., Girard, B.** (2018). Enabling a sustainable and prosperous future through science and innovation in the bioeconomy at agriculture and agri-food Canada. *New Biotechnology*. **40**: 70-75.
- Schütte, G.** (2018). What kind of innovation policy does the bioeconomy need? *New Biotechnology*. **40**: 82-86.
- Torres, D.A.** (2018). Construyendo Bioeconomía en Brasil – Embrapa. En: Iniciativas exitosas de bioeconomía en América Latina: investigación y desarrollo. Bioeconomía en América Latina y el Caribe. Seminario Regional. CEPAL. Fecha de consulta: febrero de 2018. Disponible en: http://conferencias.cepal.org/bioeconomia_AL/
- Vega M.M. & Madrigal O.Q.** (2017) International Bioeconomy Innovations in Central America. In: Dabbert S., Lewandowski I., Weiss J., Pyka A. (editors). Knowledge-Driven Developments in the Bioeconomy. Economic Complexity and Evolution. Springer, Cham. p. 83-96.

Las perchas para aves como estrategia de restauración en la microcuenca del río La Vega, Tunja, Boyacá

● Carlos Andrés Villate-Suárez*, ● Francisco Cortés-Pérez

Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Resumen

Las perchas para aves son estructuras que pueden influenciar la dispersión de semillas y favorecer la sucesión vegetal. En la microcuenca del río La Vega hay pastizales con fines pecuarios, especies exóticas invasoras y pérdida de vegetación nativa arbórea y arbustiva del área de ribera. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar las perchas artificiales en la ribera del río como estrategia de restauración, y su influencia sobre la dispersión de semillas y el reclutamiento de plántulas. Para tal efecto, se diseñó un experimento con tres tratamientos, T0: sin perchas, T1: con percha artificial y T2: con percha natural. Bajo cada percha se ubicó una trampa para retener las semillas dispersadas y, además, se capturaron aves para obtener sus excretas y determinar las principales especies dispersoras de semillas y las especies vegetales dispersadas. Mediante el test de Mann-Whitney se demostró que el tratamiento con percha artificial favoreció la dispersión de semillas de plantas ornitócoras, pero el reclutamiento de plántulas bajo las perchas no fue significativo. Las principales especies dispersoras fueron *Turdus fuscater* y *Pheucticus aureoventris* y las semillas más dispersadas las de *Acacia melanoxylon*, *Muehlenbeckia tamnifolia* y *Morella pubescens*. En conclusión, las perchas artificiales aumentaron la dispersión de semillas, pero el reclutamiento de especies ornitócoras bajo ellas fue limitada a pesar de la escarificación del suelo realizada como ayuda para eliminar la competencia de las especies de sucesión temprana. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Avifauna; Ecología de la restauración; Dispersión de semillas; Reclutamiento de plántulas; Lluvia de semillas.

Bird perches as restoration strategy in the micro-basin of La Vega River, Tunja, Boyacá

Abstract

Perches for birds are structures that may influence seed dispersal and boost the succession. The riparian areas of La Vega micro-basin are characterized by the presence of exotic species, pastures with livestock purposes, and loss of native vegetation. In this context, the objective of this study was to evaluate the bird perches on the riverbank as a restoration strategy, as well as their influence on seed dispersal and seedling recruitment. To do so, we designed an experiment with three treatments, T0: without perches, T1: with artificial perches, and T2: with natural perches. We placed a trap under each perch to retain dispersed seeds and we captured birds to retrieve the seeds from their feces and determine the main dispersing bird species and the main dispersed vegetal species. The de U Mann-Whitney test showed that the treatment with the artificial perches favored the dispersion of ornitocorous plants seeds. However, seedling recruitment in the plots under the perches was not significant. The main dispersing species were *Turdus fuscater* and *Pheucticus aureoventris* and the most dispersed seeds those of *Acacia melanoxylon*, *Muehlenbeckia tamnifolia*, and *Morella pubescens*. In conclusion, artificial perches increased seed dispersal, but the recruitment under them was limited despite implementing soil scarification to eliminate the competition with early succession species. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Birds; Ecology restoration; Seed dispersal; Seedling recruitment; Seed rain.

Introducción

La ecología de la restauración es la disciplina que se encarga de proporcionar conceptos, modelos, experimentos y métodos de apoyo a la práctica de la restauración ecológica (Society for Ecological Restoration, SER, 2004). Para el caso de trabajos con ecosistemas ribereños, la restauración ecológica busca aumentar la cobertura vegetal nativa, mantener las relaciones ecológicas y mejorar la interacción de

los componentes bióticos y abióticos (Jarro & Montoya, 2004). El bosque de ribera cumple varias funciones ecológicas de importancia crítica (Sievers, *et al.*, 2017), entre

*Correspondencia:

Carlos Andrés Villate-Suárez, cavsoft@hotmail.com

Recibido: 23 de febrero de 2018

Aceptado: 28 de junio de 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

ellas, la regulación de la temperatura, la filtración y la retención de nutrientes (Musetta, *et al.*, 2017) y la reducción de la escorrentía superficial (Chase, *et al.*, 2016); simultáneamente, proporciona el hábitat y facilita el tránsito de organismos silvestres entre parches de vegetación, tanto en ambientes fragmentados como continuos (Derugin, *et al.*, 2016), gracias a que el ancho de estas áreas puede favorecer el establecimiento de fauna (Montilla & Pacheco, 2017).

Las aves son uno de los grupos faunísticos claves en procesos de regeneración de bosques por su papel en la dispersión de semillas (Marthy, *et al.*, 2017), pero algunas especies evitan visitar lugares degradados debido a la poca disponibilidad de frutos, la ausencia de sitios adecuados para descansar y la exposición a la depredación (McClanahan & Wolfe, 1993; Graham & Page, 2012), lo cual puede representar una barrera para la regeneración de los bosques (Holl, 1999; Renjifo, 1999; Wright, *et al.*, 2016).

Dadas las dificultades de las aves en el proceso de dispersión de semillas, las cuales les impiden llegar a lugares alejados de los parches de bosque (Holl, 1998; Holl, *et al.*, 2011), varios autores han propuesto las perchas artificiales como un mecanismo que puede aumentar la llegada de aves dispersoras de semillas en espacios abiertos y así enriquecer el banco de semillas del suelo (Vicente, *et al.*, 2010; Athiê & Dias, 2016). Estas estructuras pueden actuar con mayor eficacia si están cerca al borde de bosque, ya que algunos gremios de aves las utilizan durante el forrajeo, el descanso y el tránsito entre fragmentos (Holl, 1998; Graham & Page, 2012; Hooper, *et al.*, 2005; Vogel, *et al.*, 2016).

La eficacia de las perchas artificiales se ha probado mediante el registro de las aves que se posan en ellas (Velasco & Vargas, 2004; Vogel, *et al.*, 2016), aunque esta no es la única forma de comprobar su utilidad y actualmente se hace énfasis en su finalidad principal de reclutamiento de plántulas bajo ellas (Reid & Holl, 2013). El reclutamiento puede registrarse al inicio y al final del experimento y se le considera un indicador más apropiado de la efectividad de las perchas artificiales (Guidetti, *et al.*, 2016; Reid & Holl, 2013). Existen varios tipos y configuraciones de perchas artificiales (McDonnell & Stiles, 1983; Reis, *et al.*, 2003); generalmente, las más utilizadas por razones de costo, instalación y efectividad son las perchas artificiales de varas cruzadas, que han arrojado mejores resultados en cuanto al número de visitas, de semillas y de plántulas reclutadas bajo ellas, en comparación con las perchas de cables aéreos y plantas enredaderas (Graham & Page, 2012; Dias, *et al.*, 2014; Athiê & Dias, 2016; Vogel, *et al.*, 2016).

En la microcuenca del río La Vega bajo estudio hay problemas como la introducción de especies vegetales invasoras, el uso del suelo con fines agropecuarios y la minería a cielo abierto, actividades que conllevan la pérdida de funciones del ecosistema como la regulación (caudal y sedimentos del río, prevención de erosión e inundaciones) y la disponibilidad del hábitat para fauna y flora (De Groot, *et al.*, 2002; Gómez-Baggethun & de Groot, 2007).

En este sentido, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de las perchas artificiales en la dispersión de semillas ornitócoras como estrategia de restauración en la ribera del río la Vega (Tunja, Boyacá), así como identificar las especies de aves dispersoras y las especies vegetales dispersadas en esta microcuenca.

Materiales y métodos

El estudio se extendió durante un año, desde septiembre de 2015 hasta agosto de 2016, en la microcuenca del río La Vega, localizada en la cordillera oriental colombiana, entre el municipio de Motavita y la ciudad de Tunja en el departamento de Boyacá, a una altitud de 2.700 msnm (5° 36' 36" N - 73° 26' 24" O), con una temperatura media anual de 13,2 °C, humedad relativa del 80 % y una precipitación media anual de 702,9 mm de régimen bimodal con picos en los meses de abril a mayo y de octubre a noviembre (Centro de Información Meteorológica-UPTC, 2015, 2016). Estas características permiten clasificarla como una zona de vida de bosque seco montano bajo (bs-MB) (Holdridge, 1987). El área de estudio corresponde a un pastizal ribereño dominado por *Cenchrus clandestinus* y, en menor proporción, por *Holcus lanatus*, *Anthoxanthum odoratum*, algunos arbustos de *Dodonaea viscosa*, *Baccharis macrantha*, y parches de retamo liso (*Genista monsspesulana*); a lo largo de la microcuenca se desarrollan actividades pecuarias, pero en el sitio del experimento el pastizal fue abandonado hace aproximadamente 10 años. Las coberturas vegetales cercanas corresponden a matorrales mixtos, con presencia de especies nativas como *Croton purdei*, *Xylosma spiculifera*, *Hesperomeles goudotiana*, *Baccharis macrantha* y *Muehlenbeckia tamnifolia*. También se presentan plantaciones de especies forestales (*Acacia decurrens* y *Eucalyptus globulus*) y una población mínima de alisos (*Alnus acuminata*).

Montaje experimental. Para evaluar la eficacia de perchas artificiales en el área de la ribera se elaboró un diseño con tres tratamientos: a) T0: sin perchas, b) T1: con perchas artificiales y c) T2: con perchas naturales (Figura 1). En cada tratamiento se instalaron 10 trampas para semillas (n=30). Las trampas se elaboraron con polietileno multicapa en forma piramidal, soportadas en una estructura de PVC de 60 cm de altura, y un área de 3.600 cm². En la parte inferior de cada trampa se colocó un vaso de plástico para la retención de las semillas, con orificios laterales como sistema de drenaje (Gorchov, *et al.*, 1993; Graham & Page, 2012). Con el fin de ampliar el reclutamiento de plántulas, se escarificó una parcela de 1 m² al lado de cada trampa de semillas. La escarificación consiste en retirar la capa de pastizal dejando el suelo expuesto y 'descompactado' hasta una profundidad de 36 cm (Barrera, *et al.*, 2010; Reyes, *et al.*, 2014). Cada parcela fue aislada con una zanja de 30 cm de ancho por 30 cm de profundidad para evitar la invasión de estolones, rizomas y retoños. Antes de la escarificación se hizo el registro de las especies presentes en las parcelas,

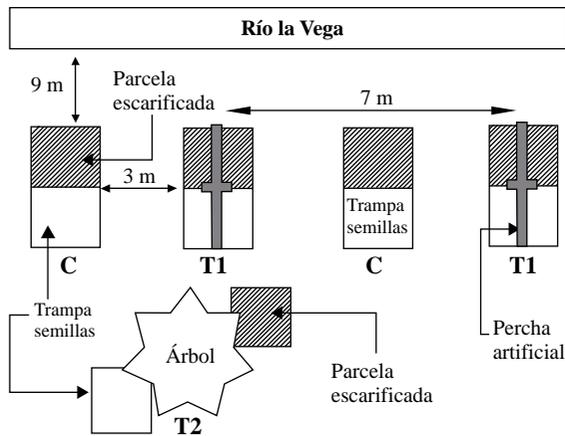


Figura 1. Vista de los tres tratamientos empleados. Se muestran dos réplicas del tratamiento con perchas artificiales, T1, dos réplicas del control, C, y una del T2. Las trampas están representadas por los cuadros blancos y las parcelas escarificadas por los cuadros rayados.

de su cobertura y frecuencia, delimitando un área de 1 m², (Mueller-Dombois & Ellenberg, 1974; Ramírez, 2006), y cada tres meses se registraron las mismas variables durante el año de estudio.

Las diez perchas artificiales elaboradas para el tratamiento T1 se ubicaron de forma paralela a una distancia de 9 m del cauce del río; constaban de postes de 2,5 m de alto y 4 cm de ancho y una vara cruzada con una longitud de 1,70 m y 3 cm de ancho unida en la parte superior de forma horizontal (Holl, 1998; Holl & Kappelle, 1999). Las diez perchas naturales (T2) fueron cuatro árboles de *A. decurrens*, tres de *A. acuminata* y tres de *C. purdiei* de más de 2 m de altura escogidos al azar de las especies presentes dentro de dos parches de vegetación cercanos.

El contenido de las trampas para semillas se recogió cada 20 días durante el año de estudio. Las semillas se recolectaron a partir de frutos maduros de las especies presentes en el área de estudio y se identificaron en el laboratorio con ayuda de un estereoscopio. Como respaldo se consultaron trabajos de recolección de semillas en áreas de bosque alto andino (Alarcón & Parada, 2009; Rosero, 2010). Para clasificar el mecanismo de dispersión de las semillas, se tuvo en cuenta si estaban envueltas en las excretas y se corroboró consultando la literatura especializada (Mahecha, et al., 2004).

Identificación de aves dispersoras. Para las observaciones se utilizaron siete puntos de conteo intensivos (Ralph, et al., 1996) distribuidos dentro de los parches de vegetación aledaños y el pastizal del área ribereña (sitio de estudio); el tiempo de conteo fue de 15 minutos por punto desde las 06:00 hasta las 11:00 y de las 15:00 a las 17:00 horas durante cuatro días al mes a lo largo del año de estudio; se utilizaron binoculares de 10x50, grabadora, cámara digital y guía de campo especializada (Asociación Bogotana de Ornitología - ABO, 2000). Para identificar las semillas consumidas, se abrieron cuatro redes de niebla (12 x 2,6 m con ojo de malla de 30 mm), una por cada tipo de cobertura, pastizal, matorral

y plantación forestal, entre las 6:00 y las 11:00 horas durante tres días al mes a lo largo del año de estudio (Villarreal, et al., 2004), las cuales se revisaban cada 20 minutos para prevenir muertes, lesiones o depredación (Villarreal, et al., 2004). Una vez liberada de la red, el ave se introducía durante 20 a 30 minutos en una bolsa de tela de algodón para obtener sus excretas con las semillas (Gorchov, et al., 1993), y estas se identificaban utilizando la colección de referencia y trabajos previos sobre dispersión (Alarcón & Parada, 2009; Rosero, 2010); las aves capturadas fueron fotografiadas y seguidamente liberadas.

Análisis de datos. Para conocer la representatividad del muestreo y la riqueza de especies de aves en el área de estudio, se proyectaron curvas de acumulación agrupando los muestreos por meses (Villarreal, et al., 2004). Se utilizaron los estimadores no paramétricos Chao 1 y ACE (anexo 1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/625/3000>) para la estimación de la abundancia de las especies (Colwell & Elsensohn, 2014). Para evaluar la importancia de cada especie de ave como agente de dispersión se calculó un índice de importancia de dispersión ($IID = (S * B) / 1000$) basado en la abundancia relativa de especies capturadas (B) y el porcentaje de muestras fecales con semillas obtenido de cada especie de ave (S). Las muestras que contenían por lo menos una semilla se contaron como un evento, aquellas con dos especies de semillas se contaron como dos, y así sucesivamente. Este índice oscila entre 0 y 10, el cero representa la ausencia de semillas en las excretas y el 10, una única especie de ave que dispersa todas las semillas (100 % de abundancia relativa). Este índice se tomó y se adaptó con base en los estudios de Aguilar, et al. (2014) y de Galindo, et al. (2000). Se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar el supuesto de normalidad y luego el test de Kruskal-Wallis, seguido de la prueba de U Mann-Whitney, para identificar diferencias por pares entre los tratamientos. Se utilizó la prueba de correlación de Spearman para evaluar el grado de correlación entre las semillas recolectadas en las trampas y las precipitaciones de la zona (datos obtenidos de la estación climatológica del IDEAM ubicada en la UPTC-Tunja, 2015-2016). Se obtuvieron índices de diversidad de Shannon que luego se compararon con la prueba T de Hutchenson y se aplicó el índice de Berger-Parker para calcular la dominancia. Para evaluar las diferencias en la cobertura de las parcelas escarificadas entre muestreos, se aplicó la prueba de Friedman. Los análisis de diversidad se hicieron con PAST 3.15 y todas las pruebas estadísticas y gráficas con el programa R Wizard, versión 3.4 (Guisande, et al., 2014). Las curvas de acumulación se elaboraron con el programa EstimateS 9,1 (Colwell & Elsensohn, 2014)

Resultados

Identificación de aves y semillas. Mediante los registros visuales y auditivos, así como con las capturas, se reconocieron un total de 25 especies de aves pertenecientes a

17 familias (anexo 2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SupFile/625/3001>), entre las cuales se destacaron *Synallaxis subpudica*, por ser endémica de los departamentos de Boyacá y Cundinamarca, y *Empidonax alnorum*, *Coccyzus americanus* y *Vireo flavoviridis*, por ser migratorias boreales (Naranjo, et al., 2012). En las redes de niebla se capturaron 11 especies de aves de las cuales se obtuvo un total de 82 excretas, compuestas, en su mayoría, por partes de artrópodos y restos de hojas y ramas; solo 27 excretas depositadas por cinco especies de aves contenían semillas (Tabla 1).

Índice de importancia de dispersión. Los registros evidenciaron que *Turdus fuscater* fue la especie que más semillas dispersó, con un índice de importancia de dispersión (IID) de 0,91, que corresponde al 48 % de las semillas totales; en sus excretas se encontraron: *A. melanoxylo*, *Morella pubescens* y *M. tamnifolia*. La segunda especie en importancia fue *Pheucticus aureoventris* con un IID de 0,87 y 32,2 % de semillas dispersadas; por su parte, *Zonotrichia capensis*, *E. alnorum* y *V. flavoviridis* tuvieron el IID más bajo (Tabla 2).

Identificación y cuantificación de semillas en las trampas. Durante el año de estudio se recogieron 4.821 semillas en las trampas: 749 (16 %) en el tratamiento de control (sin percha), 1.313 (27 %) bajo las perchas artificiales

y 2.759 (57 %) bajo las perchas naturales. El 20,24 % (976) de las semillas fueron dispersadas por aves y el resto mediante mecanismos de dispersión anemócora, barócora o varios mecanismos (policoria). Se descartó la quiroptero-coria debido a que las especies reportadas en el área son insectívoras (Alcaldía de Tunja, 2013) y hay que tener en cuenta que los murciélagos evitan perchar y transitar en áreas abiertas (como las del sitio donde se instalaron las perchas artificiales), debido a la mayor probabilidad de depredación por aves rapaces (Estrada, et al., 2007).

Para evaluar la eficacia de las perchas artificiales solo se consideraron las semillas ornitócoras (n=976). El test de Kruskal-Wallis (χ^2 al cuadrado=47.08; df=2; p=5,979, e-11<0,05) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 2), en tanto que la prueba de U Mann-Whitney evidenció diferencias significativas entre el tratamiento con perchas artificiales y el de perchas naturales (W=390; p=1,818; e-07<0,05).

Se identificaron diez especies de semillas recolectadas en las trampas, pertenecientes a nueve familias, entre las que se destacaron la Betulaceae, con 1.949 semillas, seguida de la Fabaceae, con 1.857 semillas. Por otro lado, entre las semillas dispersadas por aves (n=976), las más abundantes fueron las de *M. pubescens* (41,2 %, n=402) y *A. melanoxylo* (30,6 %, n=299) (Tabla 3).

Tabla 1. Semillas presentes en las excretas de las aves. Se identifican las especies de plantas a las que corresponden, las especies de aves dispersoras y el número de excretas con semillas por especie.

Familia	Especie	Total de semillas	Especie de ave dispersora	Número de excretas
Polygonaceae	<i>Muehlenbeckia tamnifolia</i>	17	<i>Turdus fuscater</i>	2
		7	<i>Vireo flavoviridis</i>	3
		5	<i>Empidonax alnorum</i>	3
		8	<i>Zonotrichia capensis</i>	4
Fabaceae	<i>Acacia melanoxylo</i>	5	<i>Zonotrichia capensis</i>	2
		25	<i>Turdus fuscater</i>	2
Myricaceae	<i>Morella pubescens</i>	19	<i>Turdus fuscater</i>	2
Verbenaceae	<i>Duranta mutisii</i>	41	<i>Pheucticus aureoventris</i>	9
Total semillas		127	Total excretas	27

Tabla 2. Índice de importancia de dispersión (IID) de las especies dispersadas por aves en la microcuencia del río La Vega. Se muestra el porcentaje de semillas en las muestras (n=127).

Especie de planta	Especie de ave					Total
	<i>P. aureoventris</i>	<i>T.fuscater</i>	<i>V. flavoviridis</i>	<i>E. alnorum</i>	<i>Z.capensis</i>	
<i>M. tamnifolia</i>	0	13,38	5,51	3,93	6,29	29,11
<i>Acacia melanoxylo</i>	0	19,68	0	0	3,93	23,61
<i>Morella pubescens</i>	0	14,96	0	0	0	14,96
<i>Duranta mutisii</i>	32,28	0	0	0	0	32,28
Total (%)	32,28	48,02	5,51	3,93	10,22	100,00
Abundancia de aves	27,03	19,00	11	8,11	35,14	100,00
IID (0-10)	0,87	0,91	0,06	0,03	0,36	

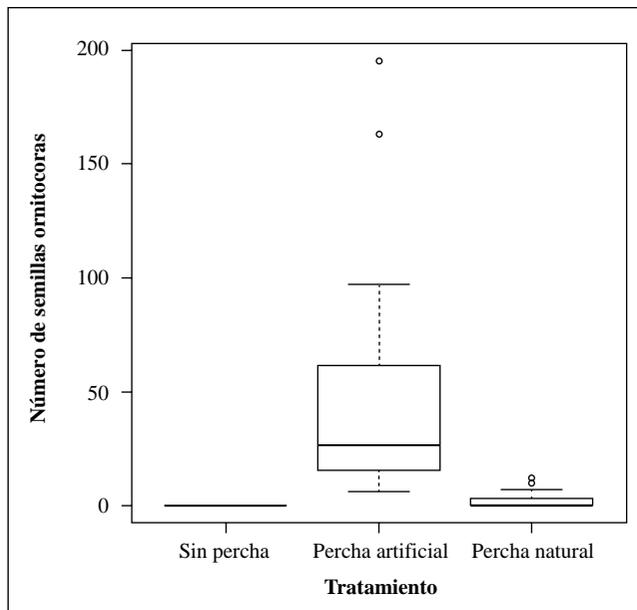


Figura 2. Diagrama de caja que evidencia las diferencias en el número de semillas ornitócoras recolectadas en las trampas de los tres tratamientos durante el año de estudio en la microcuenca del río La Vega.

Correlación entre la precipitación y las semillas en las trampas. No se evidenció una correlación entre la precipitación y las semillas ornitócoras recolectadas en las trampas (prueba de Spearman: $p=0,140$). El número más alto de semillas se registró entre julio y agosto de 2016 ($n=267$ semillas), y el más bajo, en septiembre de 2015 ($n=28$ semillas); los meses con mayor número de semillas no coincidieron con el mes de mayor precipitación (abril de 2016, con 96,2 mm), ni con el mes de menor precipitación (febrero de 2016, con 3,1 mm). Se puede inferir que el número de semillas podría relacionarse con la fenología de las plantas ornitócoras más dominantes y no con la precipitación.

Reclutamiento y dinámica de la sucesión en las parcelas escarificadas. Durante los 12 meses de seguimiento de los tres tratamientos en las parcelas escarificadas se registraron 33 especies de plantas distribuidas en 11 familias (anexo 3, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/>

downloadSuppFile/625/3002). Las familias con mayor número de especies fueron: Asteraceae con ocho especies (24,2 %), Fabaceae con siete (21,2%), Poaceae con cinco (15,2%), Solanaceae con tres (10 %), Apiaceae, Oxalidaceae y Cyperaceae con dos especies cada una (5,9 %), y, por último, Caryophyllaceae, Myrtaceae y Verbenaceae, con una especie cada una. La mayoría de estas especies tienen mecanismos de dispersión anemócora (87,1 %), un 6,45 % corresponde a ornitócoras y el otro 6,45 % a especies polícoras. Tres especies nativas de la familia Solanaceae con dispersión ornitócora germinaron en las parcelas durante el estudio: *Physalis peruviana*, *Solanum crinitipes* y *Lycianthes lycioides*. Al aplicar el índice de diversidad de Shannon (H') por tratamiento en cada muestreo, se encontró que el tratamiento de percha natural presentó los valores más bajos con respecto a los otros tratamientos; por su parte el tratamiento de control y el de perchas artificiales presentaron índices similares a lo largo del estudio (Figura 3). Utilizando los valores del índice en el último mes, se aplicó la prueba T de Hutchenson entre tratamientos: T0-T1 ($4,38=0,00001 < 0,05$); T0-T2 ($37,33=0,0 < 0,05$), y T1-T2 ($29,6=0,0 < 0,05$), con lo que se evidenciaron diferencias significativas. Por otra parte, los valores en el índice de dominancia de Berger-Parker evidenciaron diferencias significativas entre las parcelas de los tratamientos (Kruskal-Wallis: χ^2 al cuadrado=8,6705; $df=2$; $p=0,0131 < 0,05$), específicamente entre el tratamiento de percha natural y el de control (U M-Whitney: $p=0,021 < 0,05$). En la comparación de las coberturas entre los muestreos mediante la prueba de Friedman se comprobó que existieron diferencias durante los meses de estudio (χ^2 al cuadrado=57,886; $df=4$; $p=8,062, e-12 < 0,05$).

Discusión

Las perchas artificiales incrementaron la deposición de semillas en el área de ribera tal y como se ha observado en otros estudios con estas estructuras (Graham & Page, 2012; McClanahan & Wolfe, 1993; Vogel, et al., 2016). La deposición de semillas fue significativamente más alta debajo de las perchas artificiales en comparación con el control sin perchas, lo cual se debe a que las aves defecan más cuando se posan que durante el vuelo (Wunderle, 1997). Bajo las perchas naturales (árboles) se presentó menos deposición de semillas que bajo las perchas artificiales, en

Tabla 3. Cantidad de semillas dispersadas por aves encontradas en las trampas de los tres tratamientos

Especie	T0: sin percha	T1: percha artificial	T2: percha natural	Total
<i>Morella pubescens</i> Willd.		399	3	402
<i>Acacia melanoxylon</i> R. Br.		299		299
<i>Muehlenbeckia tamnifolia</i> Kunth		182	38	220
<i>Duranta mutisii</i> L. f.		14		14
<i>Lycianthes lycioides</i> L.		30		30
<i>Phytolacca bogotensis</i> Kunth		6		6
<i>Rubus</i> sp	0	5		5
Total general	0	930	41	971

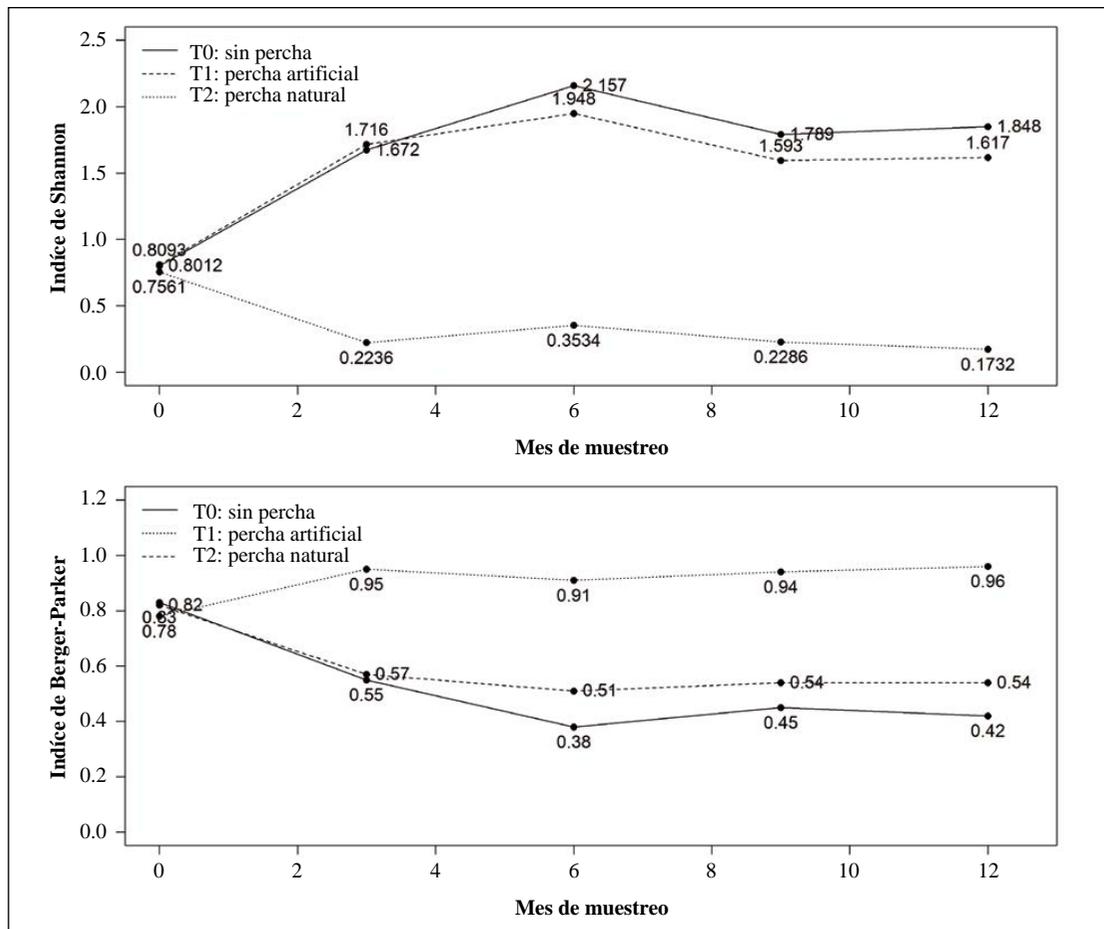


Figura 3. Cambios en los índices de los tratamientos durante el tiempo de estudio. A) Índice de diversidad de Shannon. B) Índice de dominancia de Berger-Parker.

contraposición a lo que mencionan **Athiê & Dias (2016)**, según los cuales las perchas naturales ofrecen recursos como frutas, insectos y protección que pueden contribuir a una mayor deposición. Por el contrario, en este estudio los árboles eran de dispersión anemócora y, por lo tanto, no brindaban frutos atractivos para las aves (**Pedley, 1978; Salazar & Jøker, 2000; Solorza, 2012**). En este tratamiento la escasa lluvia de semillas podría haber sido causada por la arquitectura de los árboles, puesto que las ramas y el follaje impedían la caída de algunas excretas en las trampas (**Zwiener, et al., 2014**).

Las semillas de tres especies de plantas sobresalieron en las deposiciones recolectadas en las trampas: *A. melanoxylon*, *M. pubescens* y *M. tannifolia*, plantas que se caracterizan por producir gran cantidad de frutos pequeños, algunos coloridos y jugosos, como *M. tannifolia*, que atraen aves oportunistas (**Snow, 1971; Solorza, 2012**), pues su pulpa está compuesta de azúcares y agua y tienen bajo contenido proteico, lo que ayuda a una digestión rápida y promueve una mayor frecuencia de consumo (**Levey, 1987; Restrepo, et al., 1999**). Se debe insistir en que *M. tannifolia* ofreció frutos durante gran parte del estudio, lo cual se reflejó

en las deposiciones recogidas en las perchas artificiales. Según **Howe (2016)**, este tipo de especies dependen de la sobreabundancia de frutos para atraer dispersores. De todas maneras, el reclutamiento de plántulas de esta especie fue limitada en las parcelas escarificadas. Según **Norden (2014)**, existen varios filtros ecológicos que restringen la regeneración natural de la mayoría de plantas en los bosques subtropicales; en el caso de *M. tannifolia*, las variables ambientales y los factores edáficos pudieron impedir la germinación y posterior establecimiento de las semillas (**Engelbrecht, et al., 2007; Norden, 2014**).

Por otra parte, *A. melanoxylon*, especie exótica de origen australiano, tiene semillas negras lustrosas y un funículo rojo que las rodea como principal recurso para atraer aves (**Solorza, 2012**), y sus semillas abundaron durante todo el año en las trampas de los tres tratamientos, lo cual concuerda con lo señalado por **Pedley (1978)** en cuanto a que la floración y fructificación de esta especie puede producirse durante todo el año, en especial en zonas con baja pluviosidad anual, como ocurre en el área de estudio. Las plantas exóticas invasoras generalmente producen frutos en tiempos de escasez para contrarrestar la competencia de

los dispersores de especies nativas, facilitando así su propagación y la colonización de nuevos sitios (Gosper, *et al.*, 2005). Las semillas del laurel de cera, *M. pubescens*, fueron las más abundantes bajo las trampas del tratamiento con perchas artificiales durante los meses de junio y julio, lo cual concuerda con el periodo de fructificación reportado por Mahecha, *et al.* (2004). Esta planta ofrece frutos en abundancia y ha sido estudiada por su capacidad para asociarse con hongos y bacterias del suelo (Urgiles, *et al.*, 2014).

En los tres tratamientos propuestos fue constante y abundante el número de semillas de *A. acuminata*, especie dispersada por el viento y presente en un parche cercano al experimento. En este sentido, en varios estudios los autores concuerdan en que la presencia o ausencia de perchas artificiales no influye en la dispersión de especies anemócoras (Dias, *et al.*, 2014; Ingle, 2003). En las parcelas escarificadas no se encontraron plántulas de aliso, lo cual indicaría una baja capacidad de aporte a la regeneración natural (Norden, 2014). Además, las plantaciones de alisos se comportan más como un inhibidor de la regeneración natural que como un catalizador (Murcia, 1997).

Aves y semillas dispersadas en la microcuena. Las especies de aves encontradas en la zona de estudio se han registrado en altitudes similares (Amaya-Villareal & Renjifo, 2010; Stiles & Rosselli, 1998), sin embargo, la avifauna del sitio se puede catalogar como empobrecida si se compara con los estudios llevados a cabo en bosque alto andino, como el de Amaya-Villareal & Renjifo (2010), en el cual se registraron 40 especies de aves. Algunas de las aves encontradas en el presente estudio son de hábitos generalistas, como la mirla negra (*T. fuscater*); no se encontraron tinamúes, pavas, trogones y tucanes, aves propias de los bosques andinos conservados (Kattan, *et al.*, 1994; Renjifo, 2001). La mayoría de las aves que frecuentan las zonas perturbadas, como la estudiada, son omnívoras y basan su dieta en insectos y frutos de plantas pioneras y ruderales, comunes en los bordes de bosque y en sitios con vegetación secundaria (Jordano, *et al.*, 2006).

La familia más representada fue la Tyrannidae con cuatro especies (*E. alnorum*, *Mecocerculus leucophrys*, *Elaenia frantzii* y *Tyrannus melancholicus*). Según Athiê & Dias (2016) y Vogel, *et al.* (2016), estas aves se alimentan tanto en los bordes de bosque como de plantas aisladas, y capturan insectos en áreas abiertas a donde llevan semillas de especies pioneras, acelerando la regeneración natural. La única especie de esta familia que pudo ser capturada en este estudio fue *E. alnorum*, también conocido como atrapamoscas alisero, en cuyas excretas se encontraron semillas de *M. tamnifolia*. Esta familia de aves utiliza las perchas para tener mayor visibilidad del espacio aéreo y capturar insectos en vuelo (Bocchese, *et al.*, 2008). Por su parte, *T. fuscater* registró el IID más alto, debido a que dispersó tres especies: *M. tamnifolia*, *A. melanoxylon* y *M. pubescens*, posiblemente por sus hábitos generalistas que le permiten forrajear consumiendo frutos enteros, aunque

esta característica depende del tamaño y la accesibilidad del fruto (Renjifo, 1999), además, es una especie clave en la regeneración de sitios alterados (Velasco & Vargas, 2004) y por su condición generalista es recurrente en los ecosistemas alto andinos, adaptando su dieta y comportamiento al ambiente particular en el cual se encuentre (Rosselli, Zerda, & Candil, 2017; Stiles & Rosselli, 1998).

La especie más dispersada por aves fue *M. tamnifolia*, con cuatro dispersores, quizás por su oferta de frutos durante gran parte del año (Mahecha, *et al.*, 2004). El bajo peso, la forma, el color, el pequeño tamaño y la gran cantidad de sus frutos aumentan la preferencia de las aves y su dispersión, lo que los diferencia de los de otras especies que son de gran tamaño y no muy dispersadas porque su consumo es difícil para las aves de pico pequeño (Jordano, 2000). Por el contrario, una especie con frutos relativamente grandes (*D. mutisii*) se encontró en las excretas de *P. aureoventris*, un ave cuyo pico más fuerte y grande le permite alimentarse con frutos de mayor tamaño (Gosper, *et al.*, 2005). Algunos investigadores han relacionado las variaciones de forma y tamaño del pico como un mecanismo para reducir la competencia interespecífica por el aprovechamiento de recursos en los ensambles de aves (Eriksson, 2016; Pegman, *et al.*, 2016).

Los resultados muestran que la zona está dominada por especies de plantas exóticas que ofrecen recursos aprovechados por aves generalistas. Es probable que la falta de especies frugívoras especialistas se deba a su baja tolerancia para establecerse en áreas alteradas, como la zona de estudio (Gomes, *et al.*, 2008), de manera que el bajo número de especies dispersadas por aves sería el resultado de una limitada riqueza de plantas nativas productoras de frutos (Zahawi, *et al.*, 2013). Se puede decir que el área está transformada si se compara con la de estudios como el de Burgos, *et al.* (2003), donde las aves dispersaron otras plantas con frutos como *Viburnum thryphyllum*, *Miconia squamulosa*, *Shefflera bogotensis* y *Hedyosmum bonplandianum*.

En cuanto a los patrones de dispersión y precipitación, la deposición de semillas ornitócoras no tuvo relación con la época de lluvias, contrario a lo hallado para otros trabajos en los trópicos, en los cuales la dispersión por animales es más común durante la época húmeda y se ve influenciada por el patrón de fructificación de las plantas (Athiê & Dias, 2016; Zanini & Ganade, 2005). La poca correlación entre la cantidad de semillas encontradas y la precipitación pudo deberse a las estrategias utilizadas por algunas especies para disminuir la competencia por dispersores, tal y como se observó en *A. melanoxylon* y *M. tamnifolia*, que tienen frutos en las épocas secas (Solorza Bejarano, 2012; Pedley, 1978), pero podría haber mayor relación con la transformación de la vegetación del sitio, el cual aloja muy pocas especies nativas.

Reclutamiento en parcelas escarificadas. El bajo número de plántulas de especies con mecanismo de dispersión ornitócora reclutadas en las parcelas de los tratamientos

(*P. peruviana*, *S. crinitipes* y *L. lycioides*) pudo deberse al tiempo de estudio (12 meses), ya que según **Shiels & Walker** (2003), hay que darle más tiempo a las semillas dispersadas para germinar y establecerse, sin embargo, los resultados de este estudio concuerdan con el de **Graham & Page** (2012), en el cual el reclutamiento de plántulas no fue representativo en 19 meses de seguimiento. Es oportuno recalcar que no se encontraron las semillas de estas especies (*P. peruviana*, *S. crinitipes* y *L. lycioides*) en las trampas de ninguno de los tratamientos y las encontradas quizás fueron producto del banco de semillas del suelo. Con respecto al bajo reclutamiento de plántulas, existen factores como la predación de semillas, la erosión, la escasez de nutrientes en el suelo, la falta de precipitaciones y la competencia con plantas ruderales y exóticas (**Guariguata**, 1990; **Walker**, 1994), que se caracterizan por ser fuertes competidoras e invasoras, tales como *C. clandestinus* y las fabáceas *T. monspesulana* y *A. melanoxydon*. La gran dominancia y la poca riqueza de especies evidenciada en las parcelas debajo de los árboles es atribuible a la sombra y la hojarasca que producen, lo cual impidió el establecimiento de especies pioneras heliófilas (**Caluff & Fiallo**, 2008). En contraste, las parcelas de los tratamientos de control y de perchas artificiales tuvieron una diversidad mayor, debido a que condiciones como la alta luminosidad y la escasez de hojarasca permitieron el establecimiento de las especies (**Caluff & Fiallo**, 2008). Según, **Graham & Page** (2012), el ambiente debajo de las perchas puede no ser apto para todas las especies dispersadas allí, ya que algunas plántulas de especies de etapas de sucesión avanzadas no toleran los espacios abiertos y sus condiciones microambientales.

Conclusiones

Los resultados permiten concluir que las perchas artificiales aumentaron la dispersión de semillas en la zona de ribera. Sin embargo, el establecimiento de especies ornitócoras de estados de sucesión avanzados fue mínimo, ya que la germinación de algunas de las semillas dispersadas por las aves pudo verse limitada por las bajas precipitaciones de la zona y la competencia con especies de sucesión temprana. Aunque varios estudios han encontrado las mismas debilidades en la técnica con perchas artificiales (**de Almeida, et al.**, 2013), estas siguen utilizándose como apoyo en los proyectos de restauración ecológica, pues las estrategias que involucran fauna son limitadas y los restauradores no escatiman herramientas para recuperar los ecosistemas. Por otra parte, las especies de aves más abundantes fueron generalistas, las cuales están bien adaptadas a las zonas alteradas y lograron demostrar su importancia como dispersores de semillas. Por último, la efectividad de la escarificación para aumentar el reclutamiento de plántulas propias de la sucesión del bosque de ribera fue mínima, aunque debe tenerse en cuenta para estudios más extensos y en otros ecosistemas, ya que podría ser válida para cambiar y dinamizar la trayectoria de la sucesión ayudando a la germinación de especies dispersadas por aves y activando el banco de semillas del suelo.

Información suplementaria

Anexo 1. Curvas de acumulación de especies de aves. Vea el anexo 1 en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/625/3000>

Anexo 2. Familias y especies de aves registradas en la zona de estudio. Vea el anexo 2 en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/625/3001>

Anexo 3. Especies de plantas encontradas en las parcelas. Vea el anexo 3 en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/625/3002>

Agradecimientos

A la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su colaboración. A los integrantes del Grupo de Investigación en Ecología de Bosques Andinos Colombianos. A los Biólogos Camilo Alfonso, Oscar Roa, Wilderson Medina, Juan Zabala, William Bravo y Catalina Cuevas, por su apoyo en las diferentes fases de este proyecto.

Contribución de los autores

Carlos Andrés Villate-Suárez: fase de campo, recolección, determinación taxonómica, análisis de datos y redacción del manuscrito. Francisco Cortés-Pérez: diseño del muestreo, fase de campo, redacción del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Aguilar, M., Renjifo, L. M., & Pérez, J.** (2014). Seed dispersal by bats across four successional stages of a subandean landscape. *Biota Colombiana*, **15** (2): 087-101.
- Alarcón, D., & Parada, M.** (2009). Fenología reproductiva de especies ornitófilas y ornitócoras del estrato de sotobosque en dos habitats del parque natural municipal Ranchería (Paipa-Boyacá). *Trabajo de Pregrado UPTC*.
- Amaya-Villareal, Á. M., & Renjifo, L. M.** (2010). Efecto del retamo espinoso (*Ulex europaeus*) sobre las aves de borde en un bosque altoandino. *Ornitología Colombiana*, **10**: 11-25.
- Asociación Bogotana de Ornitología.** (2000). *Aves de la Sabana de Bogotá: guía de campo*. Bogotá, Colombia: Asociación Bogotana de Ornitología ABO-Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR.
- Athié, S., & Dias, M. M.** (2016). Use of perches and seed dispersal by birds in an abandoned pasture in the Porto Ferreira state park, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, **76** (1): 1-13.
- Barrera, J. I., Contreras, S. M., Garzón, N. V., Moreno, A. C., & Montoya, S. P.** (2010). *Manual para la restauración ecológica de los ecosistemas disturbados del Distrito Capital*. Bogotá, Colombia: Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), Pontificia Universidad Javeriana (PUJ).
- Bocchese, R. A., de Oliveira, A. K. M., Favero, S., dos Santos Garnés, S. J., & Laura, V. A.** (2008). Seed rain and seedling establishment under isolated trees and artificial

- perches by dispersal seed birds, on a Cerrado region, Mato Grosso do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Ornitologia*, **16** (3): 207-213.
- Burgos, J., Villota, A., & Torres, S.** (2003). Aplicación de la metodología de complejos simpliciales en las interacciones biológicas de frugivoría y dispersión de semillas de un grupo de aves de la Reserva Biológica de Carpanta. *Colombia Forestal*, **8** (16): 31-47.
- Caluff, M. G., & Fiallo, V. R. F.** (2008). Malezas pteridofíticas de Cuba. *Revista Del Jardín Botánico Nacional*, **29**: 51-56.
- Chase, J. W., Benoy, G. A., Hann, S. W. R., & Culp, J. M.** (2016). Small differences in riparian vegetation significantly reduce land use impacts on stream flow and water quality in small agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation*, **71** (3): 194-205.
- Colwell, R. K., & Elsensohn, J. E.** (2014). EstimateS turns 20: Statistical estimation of species richness and shared species from samples, with non-parametric extrapolation. *Ecography*, **37** (6): 609-613.
- de Almeida, A., Marques, M. C. M., Ceccon, M. D. F., Vicente-Silva, J., & Mikich, S. B.** (2016). Limited effectiveness of artificial bird perches for the establishment of seedlings and the restoration of Brazil's Atlantic Forest. *Journal for Nature Conservation*, **34**: 24-32.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J.** (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, **41** (3): 393-408.
- Derugin, V. V., Silveira, J. G., Golet, G. H., & Lebuhn, G.** (2016). Response of medium- and large-sized terrestrial fauna to corridor restoration along the middle Sacramento River. *Restoration Ecology*, **24** (1): 128-136.
- Dias, Umetsu, F., & Breier, T.** (2014). Contribution Of Artificial Perches To Seed Dispersal And Its Application To Forest Restoration. *Ciência Florestal, Santa Maria*, **24** (2): 501-507.
- Engelbrecht, B. M. J., Comita, L. S., Condit, R., Kursar, T. A., Tyree, M. T., Turner, B. L., & Hubbell, S. P.** (2007). Drought sensitivity shapes species distribution patterns in tropical forests. *Nature*, **447** (7140): 80.
- Eriksson, O.** (2016). Evolution of angiosperm seed disperser mutualisms: The timing of origins and their consequences for coevolutionary interactions between angiosperms and frugivores. *Biological Reviews*, **91** (1): 168-186.
- Estrada, S., Perez, J., & Stevenson, P.** (2007). Dispersión de Semillas por Murciélagos en un Borde de Bosque Montano. *Ectropicos*, **20** (1): 1-14.
- Galindo, J., Guevara, S., & Sosa, V. J.** (2000). Bat- and bird-generated seed rains at isolated trees in pastures in a tropical rainforest. *Conservation Biology*, **14** (6): 1693-1703.
- Gomes, L. G. L., Oostrá, V., Nijman, V., Cleef, A. M., & Kappelle, M.** (2008). Tolerance of frugivorous birds to habitat disturbance in a tropical cloud forest. *Biological Conservation*, **141** (3): 860-871.
- Gómez-Baggethun, E., & de Groot, R.** (2007). Capital natural y funciones de los ecosistemas: explorando las bases ecológicas de la economía. *Revista Ecosistemas*, **16** (3): 4-14.
- Gorchov, D. L., Cornejo, F., Ascorra, C., & Jaramillo, M.** (1993). The role of seed dispersal in the natural regeneration of rain forest after strip-cutting in the Peruvian Amazon. *Vegetatio*, **107-108** (1): 339-349.
- Gosper, C. R., Stansbury, C. D., & Vivian-Smith, G.** (2005). Seed dispersal of fleshy-fruited invasive plants by birds: contributing factors and management options. *Diversity and Distributions*, **11** (6): 549-558.
- Graham, L. B., & Page, S. E.** (2012). Artificial Bird Perches for the Regeneration of Degraded Tropical Peat Swamp Forest: A Restoration Tool with Limited Potential. *Restoration Ecology*, **20** (5): 631-637.
- Guariguata, M. R.** (1990). Landslide disturbance and forest regeneration in the upper Luquillo Mount0000ains of Puerto Rico. *The Journal of Ecology*, **78** (3): 814-832.
- Guidetti, B. Y., Amico, G. C., Dardanelli, S., & Rodriguez-Cabal, M. A.** (2016). Artificial perches promote vegetation restoration. *Plant Ecology*, **217** (7): 935-942.
- Guisande, C., Heine, J., González-DaCosta, J., & García-Roselló, E.** (2014). RWizard software. *Universidad de Vigo. España*.
- Holdridge, L.** (1987). *Ecología basada en zonas de vida*. San José de Costa Rica: Agroamérica.
- Holl, K.** (1998). Do perching bird structures elevate seed rain and seedling establishment in abandoned pasture? *Restoration Ecology*, **6** (3): 253-261. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1998.00638.x>
- Holl, K. D., Zahawi, R. A., Cole, R. J., Ostertag, R., & Cordell, S.** (2011). Planting Seedlings in Tree Islands Versus Plantations as a Large-Scale Tropical Forest Restoration Strategy. *Restoration Ecology*, **19** (4): 470-479.
- Holl, K., & Kappelle, M.** (1999). Tropical forest recovery and restoration (San Juan, Puerto Rico USA). *Trends in Ecology and Evolution*, **14** (10): 378-379.
- Hooper, E., Legendre, P., & Condit, R.** (2005). Barriers to forest regeneration of deforested and abandoned land in Panama. *Journal of Applied Ecology*, **42** (6): 1165-1174.
- Howe, H. F.** (2016). Making dispersal syndromes and networks useful in tropical conservation and restoration. *Global Ecology and Conservation*, **6**: 152-178.
- Ingle, N.** (2003). Seed dispersal by wind, birds, and bats between Philippine montane rainforest and successional vegetation. *Oecologia*, **1340**: 251-261.
- Jarro, E., & Montoya, S.** (2004). Guía Técnica para la restauración de áreas de ronda y nacederos del distrito capital. *Bogotá, DC: DAMA*.
- Jordano, P.** (2000). Fruits and Frugivory. In M. Fenner (Ed.), *Seeds: the ecology of regeneration in plant communities*, **2**: 125-166. New York: CABI publishing.
- Jordano, P., Galetti, M., Pizo, M. a, & Silva, W. R.** (2006). Ligando frugivoría e dispersão de sementes à biologia da conservação. In *Essências em Biologia da Conservação*, **5**: 411-436. São Paulo, Brasil.: Editorial Rima.
- Kattan, G. H., Alvarez-Lopez, H., & Giraldo, M.** (1994). Forest fragmentation and bird extinctions: San Antonio eighty years later. *Conservation Biology*, **8** (1): 138-146. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1994.08010138.x>
- Levey, D. J.** (1987). Seed size and fruit handling techniques of avian frugivores. *The American Naturalist*, **129** (4): 471-485.
- Mahecha, G., Ovalle, A., Camelo, D., Roza, A., & Barrero, D.** (2004). Vegetación del territorio CAR. 450 especies de sus llanuras y montañas. *Bogotá, Colombia: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR*
- Marthy, W., Clough, Y., & Tschardtke, T.** (2017). Assessing the potential for avifauna recovery in degraded forests in Indonesia. *Raffles Bulletin of Zoology*, **65**: 35-48.
- McClanahan, T., & Wolfe, R.** (1993). Accelerating forest succession in a fragmented landscape: the role of birds and perches. *Conservation Biology*, **7** (2): 279-287.
- McDonnell, M. J., & Stiles, E. W.** (1983). The structural complexity of old field vegetation and the recruitment of bird-dispersed plant species. *Oecologia*, **119-116**

- Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H.** (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. Wiley.
- Murcia, C.** (1997). Evaluation of Andean alder as a catalyst for the recovery of tropical cloud forests in Colombia. In *Forest Ecology and Management*, **99**: 163-170.
- Musetta, J., Muto, E., Kreutzweiser, D., & Sibley, P.** (2017). Wildfire in boreal forest catchments influences leaf litter subsidies and consumer communities in streams: Implications for riparian management strategies. *Forest Ecology and Management*, **391**: 29-41.
- Naranjo, L. G., Amaya, J. D., Eusse, D., & Cifuentes, Y.** (2012). Guía de las especies migratorias de la biodiversidad en Colombia: Aves vol. 1. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, WWF Colombia, Bogotá DC, Colombia*, 708.
- Norden, N.** (2014). De porqué la regeneración natural es tan importante para la coexistencia de especies en los bosques tropicales. *Colombia Forestal*, **17** (2): 247-261.
- Pedley, L.** (1978). A revision of acacia mill. In queensland. *Austrobaileya*, **1** (2): 75-234.
- Pegman, A. P. M., Perry, G. L. W., & Clout, M. N.** (2016). Size-based fruit selection by a keystone avian frugivore and effects on seed viability. *New Zealand Journal of Botany*, **55** (2):118-133.
- Plan de ordenamiento territorial ciudad de Tunja, B.** (2013). POT Tunja.
- Ralph, C. J., Geupel, G. R., Pyle, P., Martín, T. E., Desante, D. F., & Milá, B.** (1996). *Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres*. (G. T. R. PSW-GTR159., Ed.). Albany, CA: U.S Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station.
- Ramirez, A.** (2006). *Ecología: métodos de muestreo y análisis de poblaciones y comunidades*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad javeriana.
- Reid, J., & Holl, K. D.** (2013). Arrival \neq Survival. *Restoration Ecology*, **21** (2): 153-155.
- Reis, A., Bechara, F. C., Espíndola, M. B. De, Vieira, N. K., & Souza, L. L. De.** (2003). Restauração de áreas degradadas : a nucleação como base para incrementar os processos sucessionais. *Natureza e Conservação*, **1** (1): 28-36.
- Renjifo, L.** (2001). Effect of natural and anthropogenic landscape matrices on the abundance of subandean bird species. *Ecological Applications*, **11** (1): 14-31.
- Renjifo, L. M.** (1999). Composition changes in a subandean avifauna after long-term forest fragmentation. *Conservation Biology*, **13** (5): 1124-1139.
- Restrepo, C., Gomez, N., & Heredia, S.** (1999). Anthropogenic edges, treefall gaps, and fruit-frugivore interactions in a neotropical montane forest. *Ecology*, **80** (2): 668-685. <https://doi.org/10.1890/0012-9658>
- Reyes, J., Thiers, O., Gerding, V., & Donoso, P.** (2014). Effect of scarification on soil change and establishment of and artificial forest regeneration under *Nothofagus* spp. in Southern Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **14** (1): 115-127.
- Rosero, L.** (2010). *Estudios ecológicos en el Parque Natural Municipal Ranchería, un aporte para su conservación*. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, CORPOBOYACÁ.
- Rosselli, L., Zerda, S. D. E. L. A., & Candil, J.** (2017). Changes in the Avifauna of a Relict Forest in the Peri-Urban Area of Bogota Throughout Fourteen Years. *Acta Biológica Colombiana*, **22** (2): 181-190.
- Salazar, R., & Jøker, D.** (2000). *Alnus acuminata*. *Seed Leaflet*, **1**: 2.
- Shoo, L. P., & Catterall, C. P.** (2013). Stimulating natural regeneration of tropical forest on degraded land: Approaches, outcomes, and information gaps. *Restoration Ecology*, **21** (6): 670-677.
- Sievers, M., Hale, R., & Morrongiello, J. R.** (2017). Do trout respond to riparian change? A meta-analysis with implications for restoration and management. *Freshwater Biology*, **62** (3): 445-457.
- Snow, D.** (1971). Evolutionary aspects of fruiting-eating by birds. *Ibis*, **113**: 194-202.
- Society for ecological restoration.** (2004). The SER international primer on ecological restoration. *Society for Ecological Restoration International Science and Policy Group*, **2** (2): 13.
- Solorza, J. H.** (2012). Evaluación de La Regeneracion de Acacia decurrens, Acacia melanoxylon y Ulex europaeus en Áreas en Proceso de Restauración Ecológica. *Luna Azul*, **34**: 66-80.
- Stiles, F. G., & Rosselli, L.** (1998). Inventario de las aves de un bosque altoandino: comparación de dos métodos. *Caldasia*, **20** (1): 29-43.
- Urgiles, N., Strauß, A., Loján, P., & Schübler, A.** (2014). Cultured arbuscular mycorrhizal fungi and native soil inocula improve development of two pioneer trees in the Andean region. *New Forests*, **45** (6): 859-874.
- Velasco, P., & Vargas, O.** (2004). Dinámica de la dispersión de plantas ornitócoras, reclutamiento y conectividad en fragmentos de bosque altoandino secundario (Reserva Natural Protectora, Coga Cundinamarca). *Acta Biológica Colombiana*, **9** (2): 121.
- Vicente, R., Martins, R., Zocche, J. J., & Harter-marques, B.** (2010). Seed dispersal by birds on artificial perches in reclaimed areas after surface coal mining in Siderópolis municipality, Santa Catarina State, Brazil. *Revista Brasileira de Biociencias*, **8** (1): 14-23.
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Umaña, A. M.** (2004). *Manual De Métodos Para El Desarrollo De Inventarios De Biodiversidad. Programa Inventarios de Biodiversidad*. Bogotá, Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Vogel, H. F., Spotswood, E., Campos, J. B., & Bechara, F. C.** (2016). Annual changes in a bird assembly on artificial perches: Implications for ecological restoration in a sub-tropical agroecosystem. *Biota Neotropica*, **16** (1): e0069.
- Walker, L. R.** (1994). Effects of Fern Thickets on Woodland Development on Landslides in Puerto-Rico. *Journal of Vegetation Science*, **5** (4): 525-532.
- Wright, J. S., Calderón, O., Hernández, A., Detto, M., & Jansen, P. A.** (2016). Interspecific associations in seed arrival and seedling recruitment in a Neotropical forest. *Ecology*, **97** (10): 2780-2790.
- Wunderle, J. M.** (1997). The role of animal seed dispersal in accelerating native forest regeneration on degraded tropical lands. In *Forest Ecology and Management*, **99**: 223-235.
- Zahawi, R., Holl, K., Cole, R., & Reid, L.** (2013). Testing applied nucleation as a strategy to facilitate tropical forest recovery. *Journal of Applied Ecology*, **50** (1): 88-96.
- Zwiener, V. P., Cardoso, F. C. G., Padial, A. A., & Marques, M. C. M.** (2014). Disentangling the effects of facilitation on restoration of the Atlantic Forest. *Basic and Applied Ecology*, **15** (1): 34-41.

Utilización de macroinvertebrados acuáticos como herramienta para determinar la calidad del agua en la quebrada Santo Tomás, municipio de Pensilvania, Colombia

✉ Sergio Adrián Murillo-Montoya^{1,2,*}, ✉ Alexander Mendoza-Mora^{1,2},
✉ Edwin Santiago Restrepo-Bastidas^{1,2}, ✉ Miguel Ángel Rodríguez^{2,3}

¹ Grupo de Investigación en Recursos Naturales, Biotecnología y Bioprospección (RENABBIO), Sistema de investigación, desarrollo tecnológico e innovación (SENNOVA), Centro Pecuario y Agroempresarial, La Dorada, Colombia

² Semillero de Investigación IDEAS. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Regional Caldas-Sede Puerto Boyacá, Colombia

³ Estudiante-Aprendiz, Servicio Nacional de Aprendizaje, SENA, La Dorada, Colombia

Resumen

A pesar de la riqueza hídrica del municipio de Pensilvania, Caldas, y del creciente uso de los macroinvertebrados acuáticos como herramienta sencilla, eficiente y de bajo costo para determinar la calidad del agua en diversos ecosistemas, no se conocen estudios de este tipo en el municipio. El objetivo de esta investigación fue evaluar la diversidad de los macroinvertebrados acuáticos y la calidad del agua de la quebrada Santo Tomás en el municipio de Pensilvania. Se recolectaron muestras de macroinvertebrados entre junio y agosto de 2015 en diferentes hábitats (hojarasca sumergida, sedimento fino y rocas), empleando una red Surber. Se registraron 2.175 individuos pertenecientes a 97 grupos taxonómicos; los órdenes más abundantes fueron Trichoptera y Ephemeroptera (54 %). No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en términos de diversidad entre los sitios evaluados y según los índices BMWP/Col y EPT, las aguas son muy limpias, aunque el índice ASPT indicó la presencia de aguas ligera y moderadamente contaminadas. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Diversidad biológica; Bioindicador; Fuente hídrica; Acueductos rurales; Monitoreo; Ecosistemas acuáticos.

Utilization of aquatic macroinvertebrates as a tool to determine water quality in Santo Tomás ravine, Pensilvania municipality (Colombia)

Abstract

Despite the water wealth of the municipality of Pensilvania, Caldas, and the growing use of aquatic macroinvertebrates as a simple, efficient and low-cost tool to determine water quality in various ecosystems, no studies of this type are known in the municipality. The objective of this research was to evaluate the diversity of aquatic macroinvertebrates and the water quality of the Santo Tomás stream in the municipality of Pennsylvania. Samples of macroinvertebrates were collected between June and August 2015 in different habitats (submerged leaf litter, fine sediment, and rocks), using a Surber net. There were 2,175 individuals belonging to 97 taxonomic groups; the most abundant orders were Trichoptera and Ephemeroptera (54%). No significant differences were found ($p > 0.05$) in terms of diversity between the evaluated sites and, according to the BMWP / Col and EPT indices, the waters are very clean, although the ASPT index indicated the presence of lightly to moderately polluted waters. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Biological diversity; Bioindicators; Water sources; Rural aqueducts; Monitoring; Aquatic ecosystems.

Introducción

Los ecosistemas acuáticos se destacan por los bienes y servicios ecosistémicos y, en términos de su valor biológico, por la gran diversidad de especies que pueden albergar (Jonsson, *et al.*, 2001). Sin embargo, la demanda de este recurso y las actividades antrópicas generan modificaciones que afectan la biota residente, lo que constituye una creciente amenaza para los ecosistemas y la calidad del recurso hídrico (Dudgeon, *et al.*, 2006).

Actividades cotidianas como el vertimiento de aguas residuales y la pérdida de vegetación ribereña para expandir la frontera agrícola y ganadera, son aspectos que contribuyen a acelerar la pérdida de la biodiversidad (Jorcín & Nogueira, 2008; Giraldo, *et al.*, 2014), ya que modifican la

*Correspondencia:

Sergio Adrián Murillo-Montoya, samurillo@sena.edu.co

Recibido: 2 de mayo de 2018

Aceptado: 6 de julio de 2018

Editor: Gabriel Roldán

estructura y el funcionamiento de las quebradas provocando la alteración de los regímenes de flujo de agua, el aumento de la carga de sedimentos y de nutrientes potencialmente contaminantes, así como variaciones en los niveles de luz, lo cual homogeneiza la biodiversidad (Delong & Brusven, 1998; Roldán, 1999; Sweeney, et al., 2004).

En los ecosistemas acuáticos los macroinvertebrados se han utilizado ampliamente como herramienta para determinar la calidad del agua (Roldán, 1999; Zúñiga, 2010; Fierro, et al., 2015) debido, entre otras razones, a que su taxonomía es relativamente sencilla, son abundantes y diversos, los materiales y métodos de muestreo están estandarizados y son de bajo costo y, además, responden a agentes contaminantes, lo que permite diagnosticar la calidad y el estado de conservación del cuerpo de agua en el que habitan (Roldán, 1999).

Los estudios de este tipo son escasos en el departamento de Caldas, siendo representativos los trabajos de Hanh-Von Hessberg, et al. (2009) en la estación piscícola de la granja Montelindo (municipio de Palestina), de Walteros-Rodríguez & Paiba-Alzate (2010) en las quebradas El Diamante, La Cristalina y Rio Chinchina de la reserva Torre Cuatro (Manizales), de González, et al. (2012), de Mesa-S, et al. (2013) en la cuenca alta del río Chinchiná (municipio de Manizales), y de Gutiérrez & Días (2015), quienes evaluaron la diversidad de Ephemeroptera en 12 municipios del departamento. La mayoría de estos trabajos se han realizado en la zona centro sur, en tanto que la zona oriente

se ha estudiado poco, aunque se destacan las investigaciones de Walteros-Rodríguez & Daza-Castro (2009) en el río Guarinó (municipio de Manzanares) y de García, et al. (2013) en el río Manzo (municipio de Norcasia).

Dada la falta de información sobre este tema en el oriente del departamento y su desconocimiento en el municipio de Pensilvania, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la diversidad de macroinvertebrados acuáticos y la calidad del agua de la quebrada Santo Tomás (Pensilvania), como línea de referencia para programas de monitorización y conservación de las fuentes hídricas que abastecen los acueductos rurales, y con el fin de implementar a corto plazo estrategias de biomonitorización participativa.

Materiales y métodos

Área de estudio. El estudio se hizo en la quebrada Santo Tomás, en el corregimiento de Arboleda-Pensilvania, al oriente del departamento de Caldas (Figura 1). La cuenca hace parte de la hoya hidrográfica del río Samaná Sur, tiene una temperatura media de 22 °C y la pluviosidad alcanza los 3.500 mm anuales, con pendientes superiores al 50 % (Corpocaldas, 1999).

Se realizaron tres muestreos durante los meses de junio, julio y agosto de 2015, uno por mes, correspondiente a la transición entre el periodo seco y el inicio de las lluvias, con una pluviosidad promedio de 111 mm en junio, 101 mm en julio y 85 mm en agosto (Agroclima, 2015).

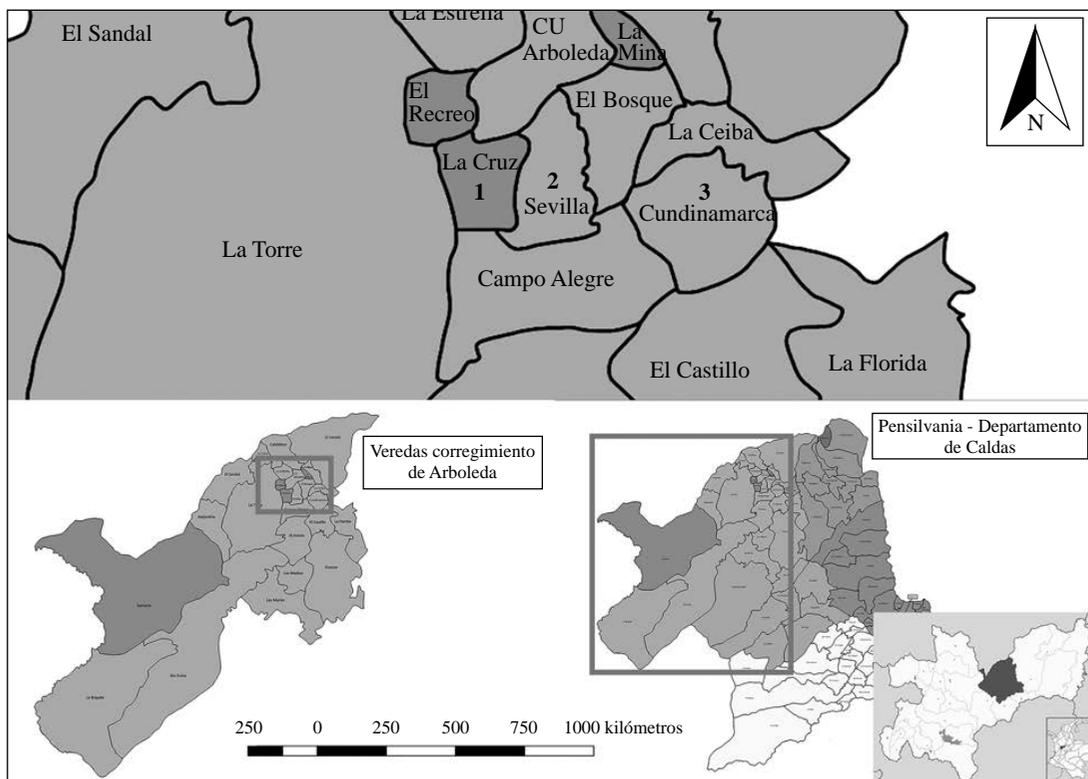


Figura 1. Quebrada Santo Tomás, Arboleda-Pensilvania, Caldas. Los números indican los sitios de muestreo: 1: vereda La Cruz, 2: vereda Sevilla y 3: vereda Cundinamarca

En la quebrada se seleccionaron tres sitios de muestreo. El primero en la vereda La Cruz, a 1.570 msnm en las coordenadas 5°29'29" N 75°01'11,1" O. Este sitio hace parte de un área conservada por la junta del acueducto local desde 1999; la vegetación ribereña esta dominada por árboles y arbustos de las familias Rubiaceae, Melastomataceae, Lauraceae y Piperaceae; el ancho del cauce es de 1,75 m, el caudal promedio, de 126 l/s y la profundidad de 0,45 m. El segundo punto de muestreo se ubicó en la vereda Sevilla, situada a 1.311 msnm en las coordenadas 5°29'56,3" N y 75°10'42,72" O. Este sitio recibe descargas de aguas residuales del corregimiento de Arboleda y la vegetación ribereña asociada es de tipo de las herbáceas, con una prevalencia de piperaceas y melastomataceas; el ancho del cauce es de 2,5 m, el caudal promedio, de 238 l/s y la profundidad de 0,96 m. El tercer punto se ubicó en la vereda Cundinamarca, a 1.270 msnm en las coordenadas 5°28'49" N y 75°06'18,7" O. En este sitio la vegetación ribereña es escasa, el uso del suelo es de vocación agrícola y ganadera; el ancho del cauce es de 7,6 m, el caudal promedio de 496 l/s y la profundidad de 1,3 m. Los sitios se seleccionaron también por su facilidad de acceso.

Recolección de macroinvertebrados y determinación taxonómica. En cada sitio de estudio se recolectaron los macroinvertebrados empleando una red Surber con un área de 0,045 m² y un ojo de malla de 250 µm. Este mismo esfuerzo de muestreo se hizo en cada sustrato (hojarasca retenida, sedimento fino y rocas) empleando un minuto por sustrato y cinco repeticiones (Ramírez, 2010). Las muestras se separaron con pinzas entomológicas y se conservaron en alcohol al 96 %; la identificación taxonómica se hizo en el laboratorio de ecología de la Universidad de Caldas y en el laboratorio de microbiología y análisis fisicoquímicos de aguas y alimentos del SENA, subregional La Dorada-Caldas. Se emplearon las claves taxonómicas de Posada & Roldán (2003), Manzo (2005; 2013), Heckman (2006; 2011), Domínguez & Fernández (2009), Springer (2010), Gutiérrez & Días (2015) para identificar el material recolectado, el cual fue depositado en la Colección Entomológica del Programa de Biología de la Universidad de Caldas (CEBUC), registro Humboldt No. 178.

Determinación de la calidad del agua. La calidad del agua de cada punto de muestreo se determinó con los índices BMWP/Col (*Biological Monitoring Working Party*) adaptado para Colombia por Roldán (2003) y Zúñiga (2010) e implementado en el departamento de Caldas por Hahn-Von Hessberg, *et al.* (2009), Walteros-Rodríguez & Daza (2009), Walteros-Rodríguez & Paiba-Alzate (2010), González, *et al.* (2012) y Mesa-S, *et al.* (2013). El índice se contruye asignando valores de 1 a 10 a las familias de macroinvertebrados recolectados en campo. Los valores bajos (1, 2, 3) son indicadores de aguas contaminadas y los valores altos (9 y 10), de aguas en perfecto estado. Los valores obtenidos indican el grado de tolerancia o la sensibilidad de cada grupo de macroinvertebrados a los contaminantes

orgánicos y refleja la alteración del ecosistema en que habitan. Posteriormente, se calculó el índice ASPT (*Average Score Per Taxon*), es decir, el del puntaje promedio por taxon medido con valores de 1 a 10, el cual se obtiene al dividir el valor del BMWP/Col entre el número de taxones incluidos en el cálculo. Los valores inferiores a 7 indican aguas con algún grado de contaminación. Por último, se determinó el índice EPT diseñado por Carrera & Fierro (2001), el cual determina la abundancia de los macroinvertebrados de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera (grupos sensibles a la contaminación), dividiéndola por la abundancia total. Los valores superiores a 75 % indican aguas de buena calidad. Este índice ha sido empleado por Mesa-S, *et al.* (2013) en la cuenca del río Chinchiná-Caldas.

Análisis de datos. Se estimaron la riqueza y la abundancia de macroinvertebrados con base en el número de morfotipos recolectados en campo y se establecieron las diferencias entre los puntos de muestreo mediante un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con el programa estadístico IBM® SPSS®, versión 24, previa confirmación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad. Asimismo, se hizo un análisis de agrupación por dendrograma de similitud con el programa Past 2.17, y se calcularon los índices BMWP/Col, ASPT y EPT para determinar la calidad del agua en los puntos de muestreo.

Resultados

Diversidad de macroinvertebrados recolectados en campo. Se recolectaron 2.175 individuos agrupados en 15 órdenes, 58 familias y 97 morfotipos (Tabla 1). Los órdenes más abundantes fueron Trichoptera, Ephemeroptera y Coleoptera con el 39,26 %, 18,25 % y 17,23 % de la abundancia absoluta, respectivamente.

Entre los Ephemeroptera se presentaron 3 familias (Baetidae, Leptohiphyidae, Leptophlebiidae) abarcando 13 géneros, siendo los más abundantes *Leptohiphyes*, *Thraulodes* y *Baetodes*. Los tricópteros representan 9 familias y 11 géneros, siendo *Smicridea*, *Nectopsyche* y *Grumichella* los más abundantes, mientras que los elmidos fueron el grupo más abundante de los coleópteros.

A nivel de familia, Hydropsychidae, Leptoceridae y Elmidae (13,47 %, 12,64 % y 11,86 %, respectivamente) dominaron en todos los puntos de muestreo, además de ser las familias que más morfotipos aportaron (Figura 2)

Al realizar los análisis estadísticos no se encontraron diferencias significativas en la riqueza ($p=0,09$) ni en la abundancia ($p=0,78$) entre los sitios evaluados (Figura 3). Sin embargo, se observó una mayor similitud entre los sitios de Sevilla y Cundinamarca (Figura 4).

Calidad del agua. La calidad del agua de los puntos de muestreo según el índice BMWP/Col (Roldán, 1999; Zúñiga, 2010) reportó valores superiores a 150, lo que indica aguas muy limpias, de buena calidad o no alteradas de manera evidente. Por su parte, el índice EPT (Carrera & Fierro, 2001) indicó una muy buena calidad del agua en

Tabla 1. Macroinvertebrados acuáticos recolectados en cada sitio de muestreo. Lac: vereda La Cruz, Sev: vereda Sevilla y Cun: vereda Cundinamarca

Orden	Familia	Géneros	Estación			Total	
			Lac	Sev	Cun		
Gordoidea	Chordodidae	<i>Chordodidae</i> 1 *	5	0	0	5	
Isopoda	Philoscidae	<i>Philoscidae</i> 1 *	6	1	2	9	
Tricladidae	Planariidae	<i>Dugesia</i>	2	1	19	22	
Blattodea	Blattidae	<i>Blattidae</i> 1 *	1	2	1	4	
Coleoptera	Cantharidae	<i>Cantharidae</i> 1 *	0	1	0	1	
	Chrysomelidae	<i>Chrysomelidae</i> 1 *	0	1	2	3	
	Curculionidae	<i>Curculionidae</i> 1 *	0	1	1	2	
	Dryopidae	<i>Pelonomus</i>	7	0	6	13	
		<i>Dysticidae</i> 1	3	0	0	3	
	Dysticidae	<i>Dysticidae</i> 2	15	0	7	22	
		<i>Dysticidae</i> 3	1	0	3	4	
		<i>Cylloepus</i>	7	16	20	43	
	Elmidae	<i>Disersus</i>	0	4	2	6	
		<i>Heterelmis</i>	23	19	26	68	
		<i>Huleechius</i>	1	0	1	2	
		<i>Macrelmis</i>	9	22	29	60	
		<i>Microcylloepus</i>	12	8	9	29	
		<i>Neoelmis</i>	1	4	1	6	
		<i>Onychelmis</i>	1	0	1	3	
		<i>Phanocerus</i>	9	3	6	18	
		<i>Pharceonus</i>	9	1	1	11	
		<i>Stegoelmis</i>	7	1	4	12	
		<i>Xenelmis</i>	0	0	1	1	
		Erotylidae	<i>Erotylidae</i> 1*	0	1	0	1
		Gyrinidae	<i>Enhydrus</i>	3	0	1	4
	Heteroceridae	<i>Heteroceridae</i> 1	0	0	1	1	
	Hydraenidae	<i>Hydraenidae</i> 1	1	0	0	1	
	Lampyridae	<i>Lampyridae</i> 1 *	0	1	1	2	
	Psephenidae	<i>Psephenops</i>	2	5	5	12	
	Ptylodactilidae	<i>Anchytarsus</i>	6	8	9	23	
		<i>Tetraglosa</i>	1	0	0	1	
	Scirtidae	<i>Scirtes</i>	2	0	1	3	
	Staphylinidae	<i>Stenus</i>	9	3	8	20	
	Sydmaenidae	<i>Scydmaenidae</i> 1 *	1	0	0	1	
Dermaptera	labiidae	<i>Labiidae</i> 1 *	0	1	1	2	
Diptera	Blephariceridae	<i>Limonicola</i>	5	0	0	5	
	Ceratopogonidae	<i>Atrichopogon</i>	0	0	2	2	
		<i>Chironominae</i> 1	1	1	3	5	
	Chironomidae	<i>Corynoneura</i>	0	0	5	5	
		<i>Crycotopus</i>	9	5	18	32	
		<i>Hudsonomyia</i>	1	0	0	1	
		<i>Orthocladinae</i> 1	2	0	0	2	
		<i>Parochlus</i>	1	2	4	7	
		<i>Stenochironomus</i>	5	0	0	5	
	Culicidae	<i>Anopheles</i>	0	0	5	5	
		<i>Culex</i>	0	0	6	6	
Dixidae	<i>Dixella</i>	1	0	0	1		

Diptera	Simuliidae	<i>Simulium</i>	40	8	11	59	
		<i>Hexatoma</i>	0	1	0	1	
	Tipulidae	<i>Limonia</i>	0	0	7	7	
		<i>Molophilus</i>	0	1	1	2	
		<i>Tipula</i>	1	0	1	2	
		<i>Andesiops</i>	0	0	3	3	
		<i>Apobaetis</i>	0	0	1	1	
	Ephemeroptera	Baetidae	<i>Baetodes</i>	17	24	19	60
			<i>Camelobaetidius</i>	0	0	2	2
			<i>Mayobaetis</i>	13	7	14	34
<i>Nanomis</i>			10	7	15	32	
<i>Prebaetodes</i>			1	4	0	5	
Leptohiphidae		<i>Leptohyphes</i>	48	23	70	141	
		<i>Traveryphes</i>	0	0	1	1	
		<i>Farrodes</i>	3	4	0	7	
		<i>Terpides</i>	0	0	1	1	
Leptophlebiidae		<i>Thraulodes</i>	20	61	28	109	
	<i>Ulmeritoides</i>	0	0	1	1		
Hemiptera	Cercopidae	<i>Cercopidae</i> 1 *	0	1	0	1	
		<i>Cicadellidae</i> 1*	1	0	0	1	
		<i>Cicadellidae</i> 2 *	1	0	0	1	
	Gelastocoridae	<i>Gelastocoridae</i>	1	1	0	1	
	Hebridae	<i>Hebrus</i>	1	1	1	3	
	Mesovelidae	<i>Mesovelia</i>	2	0	0	2	
	Naucoridae	<i>Cryphocricos</i>	4	0	3	7	
	Veliidae	<i>Limnocois</i>	33	12	12	57	
		<i>Rhagovelia</i>	8	0	3	11	
	Lepidoptera	Crambidae	<i>Petrophila</i>	2	4	5	11
Megaloptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	0	4	7	11	
	Aeshnidae	<i>Aeshnidae</i> 1	0	1	1	2	
		Gomphidae	<i>Gomphidae</i> 1	1	0	0	1
		Lestidae	<i>Archilestes</i>	2	0	1	3
	Libellulidae	<i>Libellula</i>	1	0	0	1	
	Megapodagrionidae	<i>Sciotropis</i>	0	0	1	1	
	Polythoridae	<i>Polythore</i>	22	0	3	25	
Plecoptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	30	63	121	214	
Socodea	Socodea 1	<i>Socodea</i> 1 *	4	0	0	4	
Trichoptera	Calamoceratidae	<i>Phylloicus</i>	36	1	6	43	
	Glossosomatidae	<i>Culoptila</i>	0	2	1	3	
	Helicopsycheidae	<i>Helicopsyche</i>	20	53	51	124	
		<i>Leptonema</i>	45	13	28	86	
	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	102	43	62	207	
		Hydroptilidae	<i>Metrichia</i>	0	0	1	1
	Leptoceridae	<i>Grumichella</i>	17	93	33	143	
		<i>Nectopsyche</i>	21	49	62	132	
		Odontoceridae	<i>Marilia</i>	1	0	3	4
		Philopotamidae	<i>Chimarra</i>	17	53	22	92
Polycentropidae	<i>Polycentropus</i>	5	10	5	20		
Total			698	658	819	2175	

*:taxones con hábitos terrestres

todos los puntos de muestreo, en tanto que la puntuación en el índice ASPT indicó la presencia de aguas con algún grado de contaminación, siendo más evidente en la vereda Sevilla (Tabla 2).

Discusión

Diversidad de macroinvertebrados recolectados en campo.

Al igual que en este estudio, en varias regiones del país se ha reportado una gran diversidad de grupos de macroinvertebrados indicadores de la buena calidad del agua (efemerópteros, plecópteros y tricópteros). Por ejemplo, **Zúñiga, et al.** (2013) y **Giraldo, et al.** (2014) lo han hecho en pequeñas quebradas del Valle del Cauca; **Tamaris-T, et al.** (2007) en el río Gaira-Sierra Nevada de Santa Marta, **Árias-Díaz, et al.** (2007) en la cuenca del río Coello (Tolima), **Gutiérrez & Días** (2015) en 55 fuentes hídricas de 12 municipios en el departamento de Caldas y **González, et al.** (2012) en la cuenca del río Chinchina.

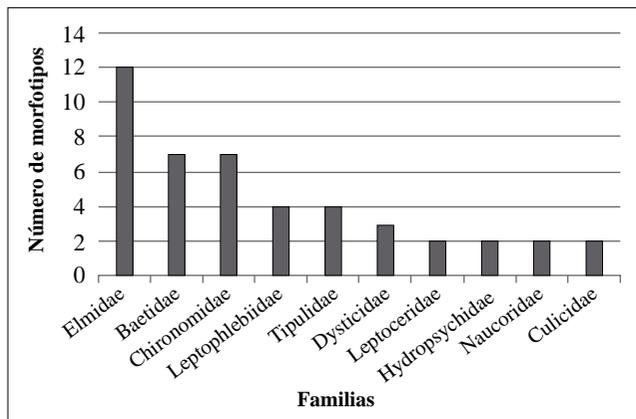


Figura 2. Relación entre el número de morfotipos y familias de los individuos recolectados en los tres sitios de muestreo de la quebrada Santo Tomás-Pensilvania

El orden Ephemeroptera fue uno de los más abundantes y diversos y agrupando a 50 % de las familias y los géneros descritos para el departamento de Caldas por **Gutiérrez & Días** (2015), quienes observaron seis familias y 26 géneros en su estudio.

La gran diversidad de este grupo es un aspecto clave para futuros proyectos de biomonitorización en la zona de estudio, teniendo en cuenta que se consideran sensibles a la contaminación e indicadores de la presencia de aguas en buen estado de conservación (**Roldán, 1999; Zúñiga, 2010**), aspecto clave para esta pequeña quebrada que abastece varios acueductos rurales.

Los tricópteros también son comunes en la cuenca de la quebrada Santo Tomás y comprendieron nueve familias y 11 géneros, siendo *Hydropsychidae* y *Leptoceridae* los más abundantes. La diversidad de este grupo es importante en la zona de estudio, aunque fue menor a la reportada en otras regiones del Neotrópico como Costa Rica (**Springer, 2010**), en donde se conocen 15 familias y 52 géneros. En Colombia, en una revisión de **Muñoz-Quesada** (2010) se han descrito 45 géneros y 210 especies, y quizás el departamento mejor explorado es Antioquia, donde **Flint** (1991) describió 124 especies en 37 géneros y 14 familias, en tanto que **Posada & Roldán** (2003) encontraron 13 familias y 35 géneros en 84 ecosistemas lóticos y lénticos de todo el departamento. En el Tolima, **Guevara, et al.** (2005) observaron 12 familias y 26 taxones en 29 estaciones del río Coello y **Vásquez-Ramos, et al.** (2007), 11 familias y 26 géneros en 27 estaciones de muestreo en el río Totare.

En Caldas, **Hahn-Von Hessberg, et al.** (2009) reportaron la presencia de Trichoptera, con cinco familias en el municipio de Palestina. Por su parte, **Walteros-Rodríguez & Paiba-Alzate** (2009) lo registraron en las quebradas El Diamante, La Mula y en el río Chinchina (Manizales) con ocho familias, y **González, et al.** (2012) encontraron 11 familias y 20 géneros en la cuenca del río Chinchina, en tanto

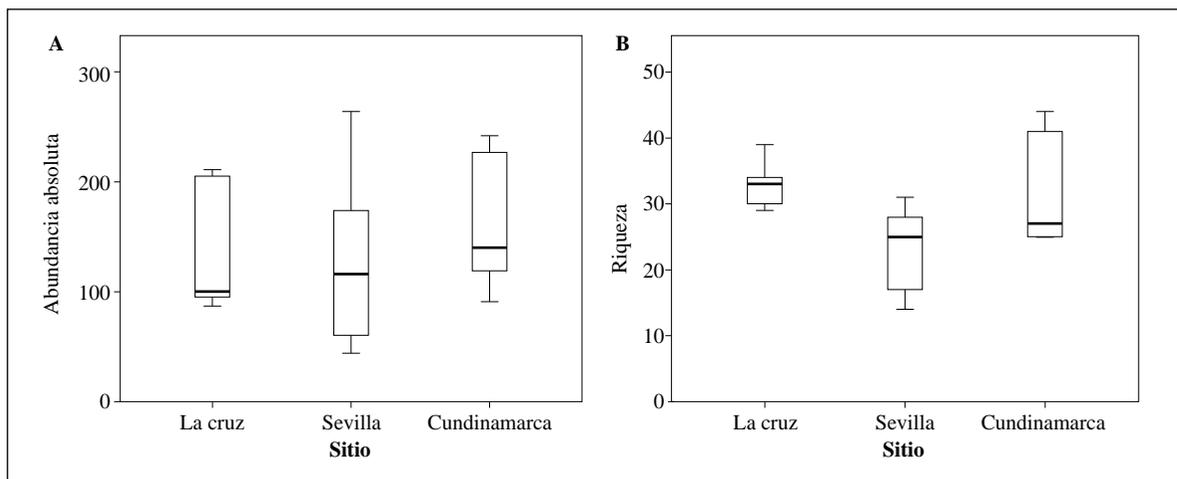


Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes de la comparación de la abundancia absoluta (A) y la riqueza (B) en los sitios de muestreo de la quebrada Santo Tomás

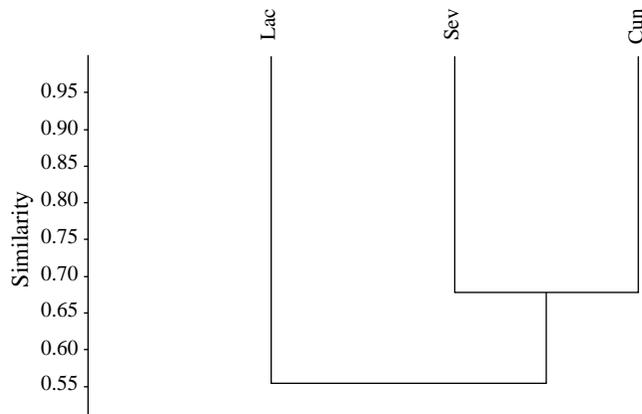


Figura 4. Dendrograma de similitud basado en la distancia de Bray-Curtis con el método de enlace UPGMA para los sitios de muestreo (Lac: vereda La Cruz, Sev: vereda Sevilla y Cun: vereda Cundinamarca) en la quebrada Santo Tomás-Pensilvania

Tabla 2. Calidad del agua en los diferentes sitios de muestreo en la quebrada Santo Tomás-Pensilvania

Índice/sitio de muestreo	Vereda La Cruz	Vereda Sevilla	Vereda Cundinamarca
BMWP/Col	194	167	207
ASPT	6,2	3,8	5,8
EPT	87	85	93

que Mesa-S, *et al.* (2012), siete familias y 12 géneros en una subcuenca del río Chinchiná (Manizales). No obstante, los reportes para el oriente del departamento son escasos, y solamente Walteros-Rodríguez & Daza-Castro (2009) han publicado registros para el municipio de Manzares, ubicado a 75 km del lugar de muestreo del presente estudio.

Este grupo fue mas abundante en el primer sitio de muestreo (vereda La Cruz), lugar donde se encuentra una reserva administrada por la junta del acueducto local desde 1999, lo que puede estar relacionado con una mayor oferta de refugio y alimento en este sitio que en los otros, favoreciendo así la diversidad.

Dentro del orden Coleoptera la familia más diversificada en ecosistemas acuáticos son los Elmidae. Según Manzo (2013), los élmidos son abundantes en la región neotropical, con 46 géneros descritos actualmente. En el presente estudio se encontró una gran diversidad de este grupo, con 12 géneros, lo que corresponde al 26 % de los registros para el Neotrópico. Los grupos más abundantes fueron los Heterelmis (26,35 %) y los Macrelmis (23,26 %), resultados similares a los registrado por Arias-Días, *et al.* (2007) para el río Coello (Tolima) y por Meza, *et al.* (2012) y Gonzáles, *et al.* (2013) en el río Chinchiná (Manizales). Para evitar errores en la determinación de este grupo, se revisó el estudio de Sondermann (2013) sobre su taxonomía y distribución en Colombia.

Contrario a lo que se esperaba, no se presentaron diferencias estadísticas en la riqueza ($p=0,09$) ni la abundancia ($p=0,78$) de macroinvertebrados en los sitios de muestreo, aunque el análisis de conglomerados evidenció una mayor similitud entre las veredas de Sevilla y Cundinamarca (sitios 2 y 3). Según Giraldo, *et al.* (2014), las quebradas situadas en zonas agrícolas y ganaderas (Valle del Cauca) suelen presentar diferencias significativas comparadas con los sitios bien conservados. En el presente estudio tales diferencias podrían no haberse visto reflejadas debido a un marcado gradiente altitudinal reflejado en un recambio continuo de especies, tal como lo propone Vanotte (1980) en la teoría del río continuo. En este sentido, se encontraron diez morfotipos exclusivos de la zona conservada (La Cruz), seis del punto con descargas residuales (Sevilla) y 13 del punto con intervención agrícola y ganadera (Cundinamarca). En la vereda Sevilla los grupos exclusivos, como las familias Chironomidae, Culicidae y Tipulidae, son indicadores de aguas perturbadas, lo que reflejaría alguna alteración en el ecosistema, aunque no se vea reflejada en una disminución ostensible de la diversidad.

Calidad del agua según los índices BMWP/Col, EPT y ASPT. Según las puntuaciones de los los índices BMWP/Col y EPT, las aguas de la quebrada Santo Tomás son de muy buena calidad. Estos resultados son similares a los encontrados por Giacometti & Bersosa (2006) en el río Alambi (Ecuador), así como por González, *et al.* (2012) y Mesa-S, *et al.* (2012) en la cuenca del río Chinchiná (Caldas) y por Hahn-Von Hessberg, *et al.* (2009) en la estación piscícola de la Universidad de Caldas (municipio de Palestina). Otros autores como Walteros-Rodríguez y Paiba-Alzate (2010), en las quebradas El Diamante, La Mula y Río Chinchiná (Manizales), y Walteros-Rodríguez & Daza-Castro (2009) en el municipio de Manzares en el río Guarinó, observaron variaciones en la calidad del agua de las zonas altas de la cuenca y de las bajas, siendo estas últimas las de más baja calidad.

El índice ASPT evidenció aguas moderadamente contaminadas. En Colombia, Arango, *et al.* (2008), en las quebradas La Cristalina y La Risaralda (San Luis-Antioquia), reportaron valores similares al encontrado en el presente estudio, en tanto que Ramírez, *et al.* (2013) observaron aguas muy contaminadas en el río Bogotá y Mosquera y Mosquera (2017) aguas ligeramente contaminadas en el río San Juan (Chocó). En cuanto al departamento de Caldas, no se encontraron reportes del uso de este índice.

Conclusiones

Los índices biológicos empleados en el presente estudio indicaron la presencia de aguas de buena calidad. Sin embargo, se recomienda evaluar la variación temporal e incluir análisis fisicoquímicos para indagar sobre el comportamiento de la riqueza y la abundancia de los macroinvertebrados, así como sobre el efecto de las actividades antrópicas en la zona de estudio.

Agradecimientos

Al laboratorio de análisis fisicoquímicos del Centro Pecuario y Agroempresarial del SENA en la subregional de La Dorada, Caldas, y al laboratorio de ecología de la Universidad de Caldas, por permitirnos realizar la fase de identificación de los macroinvertebrados en sus instalaciones.

A la Colección Entomológica del Programa de Biología de la Universidad de Caldas (CEBUC), por recibir el material recolectado en este estudio.

A los lectores anónimos que ayudaron a fortalecer la redacción de este documento.

Contribución de los autores

Sergio Adrián Murillo: participó en la etapa de investigación. Todos los coinvestigadores participamos coactivamente en la investigación y procesamiento de la información colectada en el campo, parte del material fue identificado en el laboratorio de ecología de la Universidad de Caldas por Sergio Adrián Murillo, y otro tanto, fue identificado en el laboratorio de análisis fisicoquímico del Centro Pecuario y Agroempresarial de La Dorada, Caldas, por los investigadores: Edwin Santiago Restrepo Bastidas, Alexander Mendoza Mora y aprendiz Sena.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos que no existen conflictos de intereses que pongan en riesgo la validez de los resultados presentados.

Referencias

- Agroclima.** (2015). Plataforma agrícola cafetera. Fecha de consulta: 1 de junio de 2018. Disponible en: https://agroclima.cenicafe.org/registros-historicos?p_auth=SQSxcwp&p_pid=datos_historicos_WAR_datos_historicosportlet&p_plifecycle=1&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=3&p_p_col_pos=2&_datos_historicos_WAR_datos_historicosportletfacesViewIdRender=%2Fviews%2Fview.xhtml
- Arango, M.C., Álvarez, L.F., Arango, G.A., Torres, O.E., Monsalve, A.J.** (2008). Calidad del agua de las quebradas La Cristalina y La Risaralda, San Luis Antioquia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*. **9**: 121-141.
- Árias-Días, D.M., Reinoso-Flórez, G., Guevara-Cardona, G.** (2007). Distribución espacial y temporal de los coleópteros acuáticos en la cuenca del río coello (Tolima-Colombia). *Caldasia*. **29** (1): 177-194.
- Carrera, C. Fierro, K.** (2001). Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. *Ecociencia-Quito*. p. 57.
- Corpocaldas.** (1999). Agenda para la gestión ambiental del municipio de Pensilvania. Corporación Autónoma Regional de Caldas, Manizales. p. 1-105.
- Delong, M.D., Brusven, M.A.** (1998). Macroinvertebrate community structure along the longitudinal gradient of an agriculturally impacted stream. *Environmental Management*. **22** (3): 445-457.
- Domínguez, E. Fernández, H.** (2009). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos, sistemática y taxonomía. Primera edición, Tucuman. Fundación Miguel Lillo. p. 1-652.
- Dudgeon, D. Arthington, A.H., Gessner, M.O., Kawabata, Z., Knowler, D.J., L veque, C., Naiman, R.J., Prieur-Richard, A.H., Soto, D., Stiassny, M.I. Sullivan, C.A.** (2006). Freshwater biodiversity: Importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*. **81**: 163-182.
- Fernández, I. Springer, M.** (2008). El efecto del beneficiado del café sobre los insectos acuáticos en tres ríos del valle central (alajuela) de Costa Rica. *Revista de Biologia Tropical*. **56** (Suppl. 4): 237-256.
- Fierro, P., Bertran, C., Mercado, M., Peña-Cortés, F., Tapia, J., Hauensteind, E., Caputo, I., Vargas-Chacoff, I.** (2015). Landscape composition as a determinant of diversity and functional feeding groups of aquatic macroinvertebrates in southern river of the Araucanía, Chile. *Latin American Journal of Aquatic Research*. **43** (1): 186-200.
- Flint, O.S., Jr.** (1991). Studies of neotropical caddisflies, XVI: The taxonomy, phenology and faunistics of the Trichoptera of Antioquia, Colombian. *Smithsonian Contributions of Zoology*. **520**: 1-113.
- Giacometti, J.C., Bersosa F.** (2006). Macroinvertebrados acuáticos y su importancia como indicadores de calidad del agua en el río Alambi. *Serie Zoológica*. **2**: 17-32.
- Giraldo, J.P., Char , J., Zuñiga, M.C., Char -Serna, A.M. Pedraza, G.** (2014). Impacto del uso del suelo agropecuario sobre los macroinvertebrados acuáticos en pequeñas quebradas del río la vieja (Valle del Cauca-Colombia). *Revista de Biología Tropical*. **62** (Suppl. 2): 203-219.
- González, S.M., Ramírez, Y.P., Meza, A.M. Días, L.G.** (2012). Diversidad de macroinvertebrados acuáticos y calidad de agua de quebradas abastecedoras del municipio de Manizales. *Boletín Científico del Centro de Museos de Historia Natural, Universidad de Caldas*. **16** (2): 135-148.
- Guevara-Cardona, G., Reinoso-Flórez, G. Villa, F.** (2005). Estudio del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del río Coello, departamento del Tolima. *Revista Asociación Colombina de Ciencias Biológicas*. **17**: 59-70.
- Gutiérrez, Y., Días, L.G.** (2015). Ephemeroptera (insecta) de Caldas-Colombia, claves taxonómicas para los géneros y notas sobre su distribución. *Papéis Avulsos de Zoología*. **55** (2): 13-46.
- Hahn-Von Hessberg, C.M, Toro, D.R, Grajales-Quintero, A, Duque-Quintero, G.M, Serna-Uribe, L.** (2009) Determinación de la calidad del agua mediante indicadores biológicos y fisicoquímicos en la estación piscícola, Universidad de Caldas, municipio de Palestina, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos, Museo de Historia Natural*. **13** (2): 89-105.
- Heckman, C.** (2006). *Encyclopedia of South American aquatic insects: Odonata- Anisoptera. Illustrated keys to known families, genera and species in South América.* Dordrecht, The Netherlands. Springer Eds. 1-731.
- Heckman, C.** (2011). *Encyclopedia of South American aquatic insects: Odonata- Zygoptera. Illustrated keys to known families, genera and species in South América.* Olympia Washington, USA. Springer Eds. 1-694.
- Jonsson, M., Malmqvist, B. Hoffsten, P.E.** (2001). Leaf litter breakdown rates in boreal streams: Does shredder species richness matter? *Freshwater Biology*. **46**: 161-171.
- Jorc n, A. Nogueira, M.G.** (2008). Benthic macroinvertebrates in the Paranapanema reservoir cascade (southeast Brazil). *Brazilian Journal of Biology*. **68** (4): 1013-1024.

- Manzo, V.** (2005). Key to the South American genera of Elmidae (Insecta-Coleoptera) with distributional date. *Studies of Neotropical Fauna and Environment*. **40** (3): 201-208.
- Manzo, V.** (2013). Los élmidos de la región neotropical (Coleoptera-Byrrhoidea: Elmidae), diversidad y distribución. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*. **72** (3-4): 199-212.
- Meza, A.M., Rubio-M, J., Días, L.G. Valteros, J.M.** (2012). Calidad de agua y composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del río Chinchiná. *Caldasia*. **34** (2): 443-456.
- Mosquera, Z. Mosquera, M.M.** (2017). Diversidad de la entomofauna acuática y calidad de agua de quebradas del río San Juan, Chocó-Colombia. *Revista Univeridad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Actualidad y Diversidad Científica*. **20** (1): 149-161.
- Muñoz-Quesada, F.** (2000). Especies del orden Trichoptera (Insecta) en Colombia. *Biota Colombiana*. **1** (3):267-288.
- Posada, J.A. Roldán, G.** (2003). Clave ilustrada y diversidad de larvas de Trichoptera en el nor-occidente de Colombia. *Caldasia*. **25** (1): 169-192.
- Ramírez, A.** (2010). Capítulo 2, Métodos de recolección. *Revista de Biología Tropical (en línea)*. Fecha de consulta: 22 de febrero de 2018. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44922967002>
- Ramírez, D.F., Talero, G.M., López, R.H.** (2013). Macroinvertebrados bentónicos y calidad del agua en un tramo del río Bogotá, Cajicá-Colombia. *Revista Univeridad de Ciencias Aplicadas y Ambientales, Actualidad y Diversidad Científica*. **16** (1): 205-2014.
- Roldán, G.** (1999). Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **23** (88): 175-187.
- Sondermann, W.** (2013). It's the elmids of colombia strongly marked by nearctic elements? A remote analysis of genera names provided in 30 recently published benthic macroinvertebrate assessment: Coleoptera: Byrrhoidea: Elmidae. *Dugesia*. **20** (2): 251-260.
- Springer, M.** (2010). Capítulo 7, Trichoptera. San José-Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*. **58** (Suppl. 4): 151-198.
- Sweeney, B.W., Bott, T.I., Jackson, J.K., Kaplan, I.A., Newbold, J.D., Standley, I.J. Horwitz, R.J.** (2004). Riparian deforestation, stream narrowing, and loss of stream ecosystem services. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. **101** (39): 14132-14137.
- Tamaris-T, C.E., Turizo-C, R.R., Zuñiga, M.C.** (2007). Distribución espacio-temporal y hábitos alimenticios de ninfas de *Anacroneturia* (Insecta: Plecoptera: Perlidae) en el río Gaira (Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia). *Caldasia*. **29** (2): 375-385.
- Vannote R.L., Minshall, G.W., Cummins, K.W., Sedell, J.R. Cushing, C.C.** (1980). The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*. **37**: 130-137.
- Vásquez-Ramos, J.M., Ramírez-Días, F., Reinoso-Florez, G., Guevara-Cardona, G.** (2010). Distribución espacial y temporal de los tricópteros inmaduros en la cuenca del río Totare (Tolima-Colombia). *Caldasia*. **32** (1): 129-148.
- Walteros-Rodríguez, J.M., Daza-Castro, J.F.** (2009). Caracterización hidrobiológica y evaluación ecológica de la calidad del agua del río Guarinó, departamento de Caldas. *Revista de Ciencias*. **12**: 31-44.
- Walteros-Rodríguez, J.M., Paiba-Alzate, J.E.** (2010). Estudio preliminar de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en la reserva forestal Torre Cuatro. *Boletín Científico Centro de Museos, Museo de Historia Natural*. **14** (1): 137-149.
- Zuñiga, M.C.** (2010). Capítulo 7, Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental. En: J.R.K. Cantera y E. Carvajal & L.M.H. Castro (editores). *El caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos*. p. 167-197. Programa Editorial Universidad del Valle, Cali-Colombia.
- Zuñiga, M.C., Chará, J., Giraldo, I.P., Chara-Serna, A.M. Pedraza, G.X.** (2013). Composición de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos en pequeñas quebradas de la región andina colombiana, con énfasis en la entomofauna. *Dugesia*. **20** (2): 263-277.

Mass occurrence of the liverwort *Herbertus sendtneri* in a glacial lake in the Andes of Colombia

Robbert Gradstein^{1*}, Alain Vanderpoorten², Guido van Reenen³, Antoine Cleef³

¹ Muséum National d'Histoire Naturelle – Sorbonne Universités, Institut de Systématique, Évolution, Biodiversité (ISYEB), Paris, France

² Department of Conservation Biology and Evolution, Institute of Botany, University of Liège, Belgium

³ Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, University of Amsterdam, The Netherlands

Abstract

Many bryophytes grow in the Tropics in periodically inundated habitats such as river beds, marshes and waterfalls, but permanently submerged bryophytes are rare and are mainly found in high-altitude lakes. Their identification can be difficult due to modification of morphological traits induced by the aquatic environment. Here we deal with a submerged population of the liverwort genus *Herbertus* from a glacial lake at 4120 m the Sierra Nevada del Cocuy, Colombia. The aquatic plants, which stand out by dwarf stature and obtuse leaf tips, had been identified as *H. oblongifolius*, a rare taxon described from Brazil and recently placed in synonymy of the widespread and variable *H. sendtneri* based on morphology. Molecular analysis confirmed that the aquatic plants belong to *H. sendtneri*. The resemblance of the aquatic plants to small branches of *H. sendtneri* suggests that they might represent a juvenile phenotype. The aquatic plants probably originated from a rock-inhabiting population, which dispersed into the lake by means of vegetative reproduction via caducous branches or became washed into the lake. The dispersal event should have occurred during the last 12.000-21.000 years when the lake was ice-free. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Aquatic bryophytes; Herbertaceae; Neotropics; Molecular phylogeny; Phenotypic plasticity; Sierra Nevada del Cocuy.

Presencia masiva de la hepática *Herbertus sendtneri* en una laguna glaciar en los Andes de Colombia

Resumen

Muchas especies de briófitas tropicales crecen en habitats periódicamente inundados como lechos del río, pantanos y cascadas, pero se presentan pocas briófitas sumergidas permanentemente y están más que todo en lagunas de alta montaña. Su identificación podría ser difícil por la modificación de rasgos inducidos por el medio acuático.

Aquí se trata de una población sumergida del género *Herbertus* de las hepáticas de una laguna glaciar a 4120 m en la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia. Las plantas acuáticas caracterizadas por el porte enano y los apices obtusos de las hojas. Se ha identificado como *H. oblongifolius*, un taxon raro descrito de Brazil y recientemente, basado en la morfología, ubicada como sinónima de la especie variable, *H. sendtneri*, de distribución amplia.

Análisis molecular ha confirmado que las plantas acuáticas pertenecen a *H. sendtneri*. La semejanza de las plantas acuáticas con las ramitas de *H. sendtneri* parece de sugerir un fenotipo juvenil. Las plantas acuáticas probablemente tienen su origen en una población en las rocas y lajas cercanas y han llegado a la laguna a través de ramitas vegetativas caedizas y así traídas a la laguna por el viento y el agua, o plantas enteras entraron a la laguna con lluvias fuertes inundando las lajas. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Briofitas acuáticas; Herbertaceae, Neotrópico; Filogénia molecular; Plasticidad fenotípica; Sierra Nevada del Cocuy.

Introduction

Many bryophytes grow in the Tropics in periodically inundated habitats such as river beds, marshes and waterfalls, and are semi-aquatic. Examples of semi-aquatic rheophilous bryophytes from the Old World Tropics were discussed by Shevock, *et al.* (2017). In the Neotropics, rheophilous bryophytes are numerous and are found in a wide range of families, such as Amblystegiaceae, Andreaeaceae,

Aneuraceae, Balantiopsidaceae, Brachytheciaceae, Cephaloziellaceae, Fissidentaceae, Fossombroniaceae, Hydropogonaceae, Jungermanniaceae, Lejeuneaceae, Leucomiaceae, Lophocoleaceae, Pelliaceae, Pilotrichaceae, Pottiaceae,

*Corresponding autor:

Robbert Gradstein, gradstein@mnhn.fr

Received: May 25, 2018

Accepted: July 17, 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

Seligeriaceae, Sematophyllaceae, Sphagnaceae, etc. (e.g., Mägdefrau, 1973; Griffin, *et al.*, 1982; Bartlett & Vitt, 1986; Gradstein & Vána, 1999; Reiner-Drehwald, 1999; Gradstein, *et al.*, 2001, 2004, 2011; Gradstein & Reiner-Drehwald, 2007; Hedenäs, 2003; Crandall-Stotler & Gradstein, 2017).

Permanently submerged growing bryophytes are far less common in the Tropics. In tropical America they occur in lakes at high elevations in the Andes, mostly above 3000 m. Examples are the liverworts *Isotachis obtusa* Steph. (= *I. lacustris* Herzog; Gradstein, unpubl.), *Marchantia plicata* Nees & Mont., *Gymnocoleopsis cylindriformis* (Mitt.) R.M.Schust., *Clasmatocolea vermicularis* (Lehm.) Grolle, *Jensenia spinosa* (Lindenb. & Gottsche) Grolle, *Lophonardia laxifolia* (Mont.) L.Söderstr. & Vána, *Syzygiella sonderi* (Gottsche) K.Feldberg *et al.*, *Herbertus sendtneri*, *Riccardia paramorum* Meenks (= *R. cataractarum* Steph.; Gradstein, unpubl.) and *Ricciocarpos natans* (L.) Corda, and the mosses *Blindia gradsteinii* J.K.Bartlett & Vitt, *Ditrichum submersum* Herzog, *Drepanocladus* Müll.Hal. spp., *Fontinalis bogotensis* Hampe, *Gradsteinia andicola* Ochrya, *Philonotis andina* (Mitt.) A.Jaeger, *Pseudocalliergon* (Limpr.) Loeske spp., *Scorpidium* (Schimp.) Limpr. spp. and *Sphagnum* L. spp. (Cleef, 1981; Gradstein, *et al.*, 2001; Hedenäs, 2003; Churchill, 2018). Most of these taxa, however, may also grow emerged in moist but not permanently inundated habitats. *Blindia gradsteinii*, *Ditrichum submersum*, *Fontinalis bogotensis* and possibly some *Sphagnum* species are the only truly aquatic bryophyte species in the Andes that are exclusively known from submerged populations. All of them are mosses; none of the liverworts found in lakes in the Andes grow exclusively submerged. *Ditrichum submersum* and *Fontinalis bogotensis* are widespread in the Andes of Colombia but *Blindia gradsteinii* is a very rare species that is only known from a single locality, a small pond at 4090 m in the páramo de Sumapaz (Churchill, 2016). The semi-aquatic *Gradsteinia andicola*, the only species in the genus *Gradsteinia* and endemic to Colombia, is a further rare aquatic moss of the páramo de Sumapaz, found once in a dried-up lake at 3650 m.

In temperate regions, submerged bryophytes have been recorded from depths to over 120 m in clear water lakes (Ignatov & Kurbatova, 1990; de Winton & Beaver, 2004). They reach to much greater depths than vascular plants, which occur to maximum depths of ca. 12 m and are scarce or lacking in arctic and high-alpine lakes (Brönmark & Hansson, 2017). Apparently, bryophytes are better adapted to lower temperatures and lower light intensities than vascular plants (or are outcompeted at lower depths by vascular plants; de Winton & Beaver, 2004). The scarcity of permanently submerged bryophytes in the Tropics and their restriction to high elevations suggests that their occurrence in the Tropics is constrained by high temperatures. Glime & Vitt (1984) explained the rarity of aquatic bryophytes in the Tropics by the lack of temperature seasonality. Evidence

came from ecophysiological studies on the aquatic moss genus *Fontinalis* Hedw. whose life cycle is fine-tuned adapted to temperature seasonality. The ecophysiology and life cycle of aquatic tropical bryophytes has not been studied, however (Vanderpoorten & Goffinet, 2009).

The present paper deals with a permanently submerged growing population of the liverwort genus *Herbertus* (Herbertaceae) from the Andes of Colombia. Many *Herbertus* species have a preference for very humid habitats such as dripping wet rock, ledges near waterfalls, etc. (Hill, *et al.*, 1991; Paton, 1999), but permanently submerged growth has not been observed in this genus (e.g., Ignatov & Kurbatova, 1990; de Winton & Beaver, 2004). The aquatic population occurs in a glacial lake, Laguna El Amarillal, in the Sierra Nevada del Cocuy (Figure 1) where it was first discovered in 1977 and identified as *H. oblongifolius* (Steph.) Gradst. & Cleef (Gradstein, *et al.*, 1977), a species described from the Serra do Itatiaia, southeastern Brazil. Distinctive characters of this species include its very small stature and obtuse leaf tips. *Herbertus oblongifolius* was considered a very rare taxon known only from the type and the Colombian population (van Reenen, 1982; Gradstein



Figure 1. Lake Amarillal in the Sierra Nevada del Cocuy (4120 m), habitat of aquatic *H. sendtneri*

& Costa, 2003), but **Feldberg & Heinrichs** (2005) treated it as a synonym of the widespread and variable *H. sendtneri* (Nees) Lindb.

Herbertus sendtneri was originally described from the Austrian Alps and had long been considered to be distributed in Central Europe and the Himalayas. Recent molecular and morphological studies, however, indicate that the species is widespread in the Tropics where it had been described under many different names, e.g., *H. grossispinus* (Steph.) Fulford and *H. subdentatus* auct. in tropical America, and *H. armitanus* (Steph.) H.A.Miller and *H. circinnatus* (Steph.) H.A.Miller in New Guinea (**Feldberg, et al., 2004; He & Sun, 2017**). *Herbertus sendtneri* grows on rock or bark in humid, high-montane environments, reaching to 4500 m in the Andes and 5000 m in the Himalayas. In tropical America the species is found above 2500 m in Central America and the Andes, from Mexico to Bolivia, and furthermore isolated on Mt. Roraima (Guyana Highlands) and Serra do Itatiaia in southeastern Brazil. Characteristic morphological features of *H. sendtneri* are the frequent presence of ventral-intercalary branches, the falcate-secund to circinnate leaves which are 1.5-3(-4)× longer than wide, the leaf bases with coarse lacinia terminating in a slime papilla, the convex vitta bifurcating at 1/3-3/4 up the leaf lamina and ending well before the apex, and the leaf tips ending in a uniseriate row of 2-25 quadrate to narrowly rectangular cells (**Feldberg, et al., 2004; He & Sun, 2017; Figure 2**). The tropical populations tend to be more robust than the European ones, with larger and more elongate leaves and longer leaf tips, but intermediate forms exist and considerable morphological variation is seen.

Herbertus oblongifolius strikingly differs from neotropical *H. sendtneri* in its minute size and obtuse leaf tips (Figure 3). Nevertheless, **Feldberg & Heinrichs** (2005) considered *H. oblongifolius* to be a synonym of *H. sendtneri* because of its apparent resemblance to small European phenotypes of the latter species. The putative relationship between *H. oblongifolius* and *H. sendtneri* was not tested with molecular methods, however, and the aquatic population was not cited in **Feldberg & Heinrichs** (2005). Since identification of submerged bryophytes can be difficult due to their plastic morphology (**de Winton & Beever, 2004; Rankin, et al., 2017**), molecular techniques may help clarifying the taxonomic status of these taxa.

In February 2017 one of us (GR) collected fresh material of the aquatic *Herbertus* population from Laguna El Amarillal. Here we analyse the relationship between the aquatic plants and *H. sendtneri* based on nuclear DNA sequences and morphology. The aberrant morphology and the origin of the aquatic population are briefly discussed.

Material and methods

Study area. Laguna El Amarillal is a small and shallow glacial lake in the southernmost area of the Sierra Nevada del Cocuy, Dept. Boyacá, Colombia (Figure 1A). The lake is located at an elevation of 4120 m on the eastern ridge

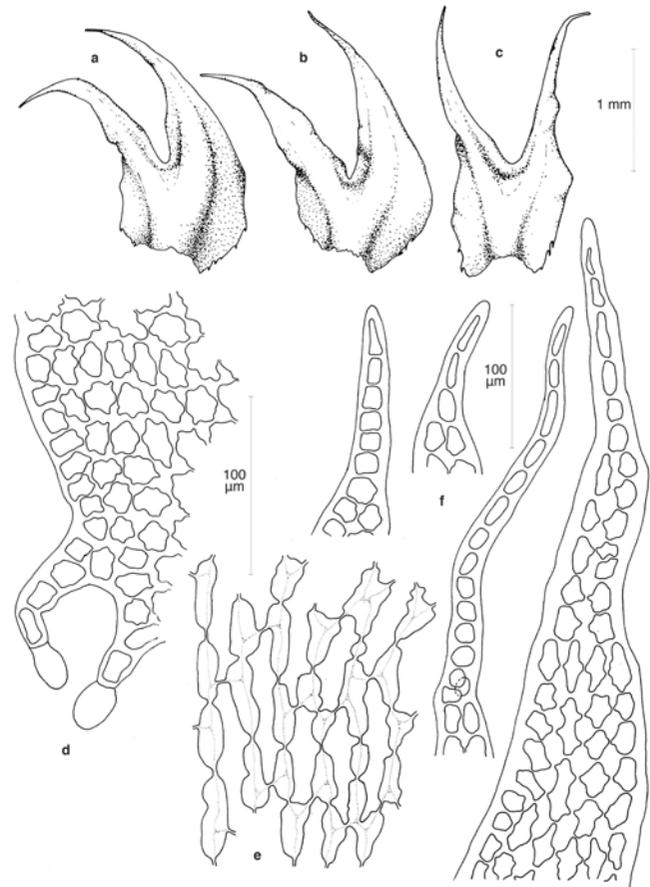


Figure 2. *Herbertus sendtneri* (after **van Reenen, 1982**, as *H. subdentatus*)

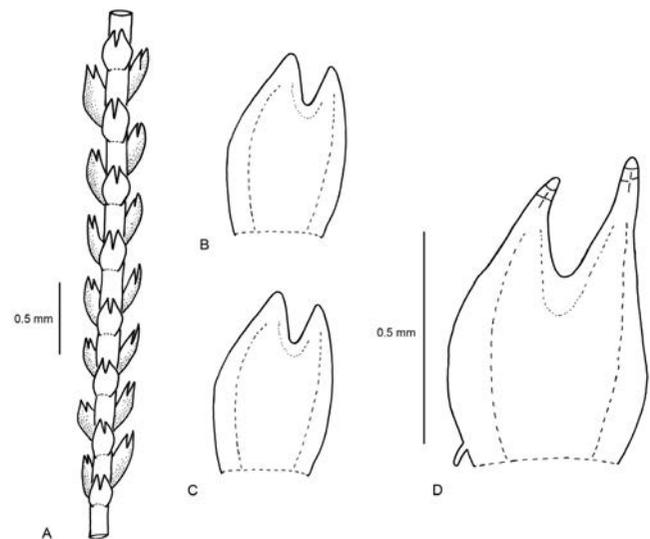


Figure 3. Aquatic *Herbertus sendtneri*. A. Habit. B. Leaves

of the El Amarillal valley, 6.31620 N, 72.32010 W, in an upper grassland páramo dominated by *Calamagrostis effusa* (Kunth) Steud. with abundant occurrence of *Cortaderia* cf.

hapalotricha (Pilg.) Conert (Cleef, 1981). Rock outcrops are covered by *Diplostephium colombianum* scrub while patches of *Chusquea tessellata* Munro bamboo vegetation together with stem rosettes of *Espeletia lopezii* Cuatrec. occur in humid depressions. *Espeletia lopezii* stands are also seen on flat rocky slopes, associated with extensive mats of the moss *Rhacocarpus purpurascens* (Brid.) Paris. According to van der Hammen, *et al.* (1981), the lake area has been ice-free since ca. 12.400-21.000 BP.

Laguna El Amarillal reaches a maximum depth of ca. 2 m near the South shore, where the lake abruptly ends at a ca. one m high rock wall. Shallower waters and a narrow sandy beach occur along the northern shore (Figure 1B). The water is clear and the lake bottom consists of a silty sediment with scattered stones. A small vegetation plot of 4 m² (Cleef plot nr. 477) sampled in 1977, in 25 cm deep water near the North shore of the lake, revealed a mass presence of submerged *Isoetes karstenii* A. Braun (cover 75%) and *Herbertus obtusifolius* (cover 35%). The *Herbertus* plants were growing anchored in the sediment and the lower stem portions were partially covered by silt and algae. Two further bryophyte species, *Ditrichum* cf. *submersum* (cover 3%) and *Isotachis serrulata* (cover <1%), were present in small amounts (see also Gradstein, *et al.*, 1977). Towards deeper sites in the lake the cover of submerged *H. obtusifolius* increased to 75-80%. The mass presence of the latter species in deeper parts of the lake was reflected by a reddish-brown hue. In the sample of *H. obtusifolius* taken in 2017, the species was accompanied by *Ditrichum* sp., *Campylopus densicoma* (Müll.Hal.) Paris var. *yungarum* (Herz.) Frahm, *Bryum* sp. (etiolated plants with long, branched protonemal filaments sprouting from leaf axils) and *Syzygiella sonderi*. The pH of the lake water was not determined but is probably similar to that of the uppermost soil layer of the surrounding bunchgrass páramo, measuring between 5.0 and 5.5 (Cleef, 1981).

Molecular approach. DNA of aquatic *H. oblongifolius* (van Reenen 5795, COL, PC) was extracted, amplified and sequenced at the nrITS locus previously used in species-level phylogenetic analyses of the genus following the protocols of Feldberg, *et al.* (2004) and Feldberg & Heinrichs (2006). In an attempt to confirm the nested position of *H. oblongifolius* within the *H. sendtneri* complex, we first downloaded from GenBank ITS sequences for one individual per *Herbertus* species (Table 1). We then focused on the *H. sendtneri* complex, sampling each of the available sequences of the complex. Each dataset was submitted to a Maximum Likelihood analysis with Seaview 4.6.4 (Gouy, *et al.*, 2010). Each analysis implemented a GTR substitution model with a gamma distribution to take among-site variation into account according to the results of a model selection employing the AIC criterion with Jmodeltest (Darriba, *et al.*, 2012).

Morphological approach. We studied the type of *H. obtusifolius* and fresh material of the aquatic plants

from Colombia as well as selected herbarium material of *Herbertus sendtneri* from Colombia, Brazil and Central Europe. All specimens were examined by light microscopy. The following specimens were studied: **Herbertus obtusifolius**. COLOMBIA. Boyacá, Sierra Nevada del Cocuy, Laguna El Amarillal, March 1977, Cleef & van der Hammen 10382 (COL, G, U), *ibid.*, van Reenen 5795 (COL, PC). BRAZIL. Rio de Janeiro: Parque Nacional Itatiaia, Agulhas Negras, 2400 m, Ule 448, holotype of *Schisma oblongifolia* Steph. (G-00052085 [= G-18848]). **Herbertus sendtneri**. COLOMBIA. Arauca: Sierra Nevada del Cocuy, Quebrada El Playón, Hoya S. Luis, 3540 m, large form, Cleef 9129 (PC, U), *ibid.*, small form, Cleef 9137 (PC, U); Quebrada El Playón, Patio Bolos, 4260 m, large form, Cleef 9095 (PC, U). Boyacá: Sierra Nevada del Cocuy, Boquerón de Cusirí, small form, Cleef 8811 (PC, U), *ibid.*, paso del Conejo, 4450 m, small form, Cleef 8713b (PC), *ibid.* Quebrada Bocatoma, large form, Florschütz 4050a (PC, U), *ibid.*, above laguna Pintada, 4300-4700 m, small form, Bischler 2831, 2846 (PC), *ibid.*, Las Playitas, 3950 m, Bischler 2803 (PC). Cundinamarca: Páramo de Palacio, 3800 m, small form, Cleef 5255 (PC, U); Cerro Nevado del Sumapaz, 3715 m, large form, Cleef 8196b (PC, U), *ibid.*, Andabobos, 3800 m, large form, Cleef 779 (PC, U), *ibid.*, 4300 m, large form, Cleef 1363 (PC, U). BRAZIL. Rio de Janeiro: Parque Nacional Itatiaia, Agulhas Negras, ca. 2500 m, large form, Vital 4896 (PC, U). AUSTRIA. Tirol: Kitzbühl, 2000 m, on rock, Sauter s.n., Husnot *Hepaticae Galliae* 159 (PC); Kuthei, 6500 ft., Arnold s.n. (PC).

Results and discussion

Molecular phylogeny. In the analysis of the whole genus, *H. oblongifolius* was resolved as sister to *H. sendtneri* with 93% of bootstrap support (Figure 4). Within the *H. sendtneri* complex, *H. oblongifolius* is nested within the Neotropical clade, which has a bootstrap support of 78% (Figure 5). The molecular data show that the aquatic *Herbertus* population belongs to *H. sendtneri* and support the synonymy of *H. oblongifolius* under *H. sendtneri* as proposed by Feldberg & Heinrichs (2005) on morphological grounds.

Morphology. The gametophytes of the aquatic plants from Colombia are characterized as follows (Figure 3; notable features italicized): Plants dull greenish-brown to blackish, *very slender, flagelliform, 0.4-0.5 mm wide*, to 4 cm long, unbranched or very sparingly branched with ventral-intercalary branches. Rhizoids \pm lacking. *Leaves scale-like, 0.3-0.8 mm long, 1.3-2 \times longer than wide, distant to densely imbricate*, bifid to 1/3-1/2, *lobes erect*, narrowly triangular, slightly unequal in size, dorsal lobe slightly broader than ventral lobe; leaf lamina oblong-quadrate to obovate, margins almost straight, without appendages or occasionally with 1(-2) short cilia tipped by a slime papilla, *lacinia absent*; lobe bases not overlapping in the sinus, lobe margins entire, *lobe tips obtuse, made up of one blunt hyaline cell (very rarely 2), uniseriate part lacking*. Leaf cells with large

Table 1. Voucher information and GenBank accession numbers of *Herbertus* specimens used in this study; new sequence in bold

Taxon	Voucher	Accession number
<i>H. acanthelii</i> Spruce	Ecuador, <i>Gradstein & Mandl 10144</i> (GOET)	AJ783339
<i>H. bivittatus</i> Spruce	Panama, <i>Salazar & Gradstein 9286</i> (H)	DQ293948
<i>H. borealis</i> Crundw.	UK, <i>EDNA09-01443</i> (E)	JN113499
<i>H. circinatus</i> (Steph.) H.A.Miller	Papua New Guinea, <i>Norris 66970</i> (H)	KU523777
<i>H. delavayi</i> (Steph.) Steph.	Bhutan, <i>Long 28864</i> (GOET)	AJ972450
<i>H. dicranus</i> (Gottsche <i>et al.</i>) Trevis.	Nepal, <i>Long 30554</i> (H)	KU523784
<i>H. gracilis</i> (Mont.) Steph.	Hawaii, <i>Weber & Randolph B89,875</i> (UC)	DQ293949
<i>H. hutchinsiae</i> (Gottsche & Rabenh.) A.Evans	British Isles, <i>Rycroft 01015</i> (GOET)	AJ783340
<i>H. kurzii</i> (Steph.) R.S.Chopra	Bhutan, <i>Long 28864</i> (H)	KU523787
<i>H. longifissus</i> Steph.	Papua New Guinea, <i>Norris 63194</i> (H)	DQ293952
<i>H. norenius</i> D.G.Long <i>et al.</i>	UK, <i>EDNA09-00734</i> (E)	JN113520
<i>H. oblongifolius</i> (Steph.) Gradst. & Cleef	Colombia, <i>van Reenen 5795</i> (PC)	MH379706
<i>H. oldfieldianus</i> (Steph.) Rodway	New Zealand, <i>Glenny 8857</i> (H)	KU523778
<i>H. pilifer</i> Schiffn.	Papua New Guinea, <i>Kluiving 1453</i> (H)	DQ293955
<i>H. runcinatus</i> (Taylor) Trevis.	St Helena, <i>Gremmen 2000-170</i> (GOET)	FN582125
<i>H. sakurarii</i> (Warnst.) S.Hatt.	Alaska, <i>Schofield 115671</i> (H)	KU523788
<i>H. sendtneri</i> (Lindb.) Lindb. - "America1"	Bolivia, <i>Heinrichs et al. 4001</i> (GOET)	AJ783350
<i>H. sendtneri</i> - "America2"	Bolivia, <i>Heinrichs et al. 4004</i> (GOET)	AJ783352
<i>H. sendtneri</i> - "America3"	Costa Rica, <i>Gradstein & Mues 9711</i> (GOET)	AJ783353
<i>H. sendtneri</i> - "America4" (= America8)	Costa Rica, <i>Holz & Schäfer-V. 0077</i> (GOET)	AJ783354
<i>H. sendtneri</i> - "America5"	Bolivia, <i>Churchill 22797</i> (GOET)	AM157352
<i>H. sendtneri</i> - "America6"	Bolivia, <i>Churchill et al. 22797</i> (GOET)	AM259599, AM157352
<i>H. sendtneri</i> - "America7"	Ecuador, <i>Heinrichs et al. 4418</i> (GOET)	AM11361
<i>H. sendtneri</i> - "America9"	Bolivia, <i>Heinrichs et al. 4002</i> (GOET)	AJ783351
<i>H. sendtneri</i> - "America10"	Panama, <i>Dauphin et al. 1576</i> (GOET)	AJ783355
<i>H. sendtneri</i> - "America11"	Bolivia, <i>Groth s.n.</i> (GOET)	AJ413177
<i>H. sendtneri</i> - "Asia1"	China, <i>Long 24180</i> (H)	KU523785
<i>H. sendtneri</i> - "Asia2"	Indonesia, <i>Schäfer-V. 25286</i> (GOET)	AM259600
<i>H. sendtneri</i> - "Asia3"	Bhutan, <i>EDNA09-01007</i> (E)	JN113521
<i>H. sendtneri</i> - "Asia4"	China, <i>Long 24180</i> (H)	KU523785
<i>H. sendtneri</i> - "Asia5"	Bhutan, <i>Miehe 00-380-01</i> (GOET)	AM259598
<i>H. sendtneri</i> - "Asia6"	Indonesia, <i>Schäfer-V. 25004</i> (GOET)	AM259601
<i>H. sendtneri</i> - "Asia7"	Indonesia, <i>Schäfer-V. 25172</i> (GOET)	AM259602
<i>H. sendtneri</i> - "Asia8"	Malaysia, <i>Schäfer-V. 18872</i> (GOET)	AM259604
<i>H. sendtneri</i> - "Asia9"	Indonesia, <i>Gradstein et al. 11011</i> (GOET)	AM259603
<i>H. sendtneri</i> - "Asia10"	Malaysia, <i>Gradstein 10353</i> (GOET)	AJ972453
<i>H. sendtneri</i>	Austria, <i>Heinrichs 4377</i> (GOET)	AJ783347
<i>H. sendtneri</i>	Austria, <i>Heinrichs 4378</i> (GOET)	AJ783348
<i>H. sendtneri</i>	St Helena, <i>Gremmen 2000-904</i> (GOET)	FN582126
<i>H. sendtneri</i>	Madeira, <i>RG2402</i> (GOET)	AJ783349
<i>H. stramineus</i> (Dumort.) Lett.	UK, <i>EDNA09-00735</i> (E)	JN113528

trigones, cuticle ± smooth. *Vitta* occupying 2/3-3/4 the width of the lobe bases, bifurcating just below the sinus (at 3/4-5/6 up the leaf lamina), not extending to the lobe apex. Oil bodies present in all leaf cells, 5-8 in margin cells, 7-14 in

vitta cells, globose to bluntly subellipsoid, 5-7 × 6-10 µm, colorless, finely and rather faintly granular, becoming almost homogeneous upon age. Underleaves similar to leaves but more symmetrical, the two lobes equal in width.

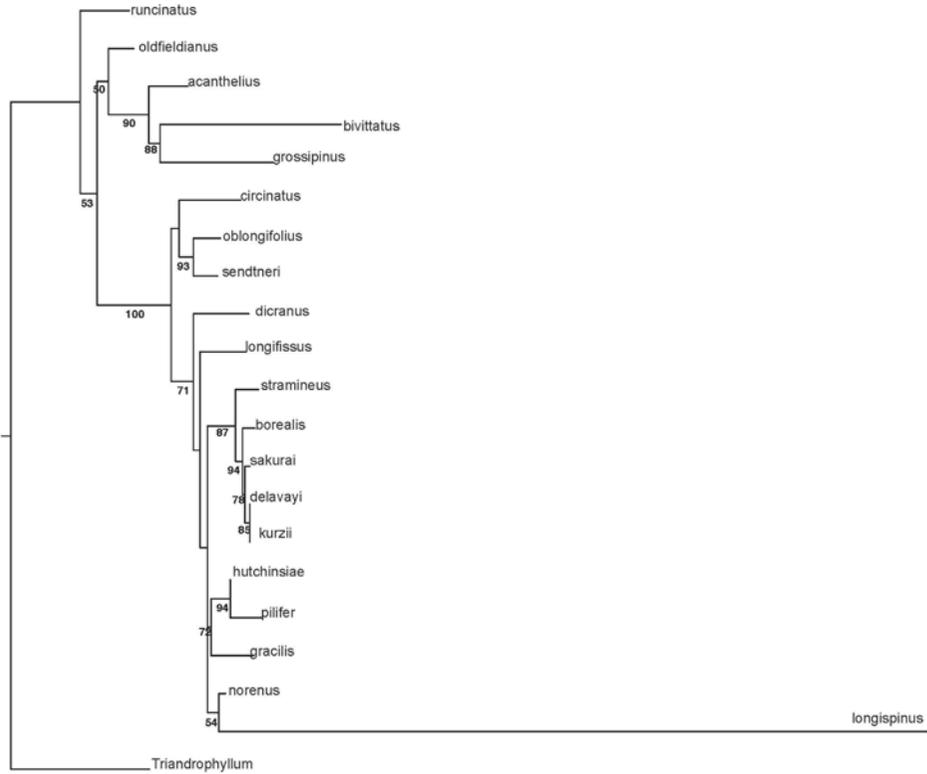


Figure 4. Most likely tree resulting from the analysis of sequence variation at the ITS locus in *Herbertus*

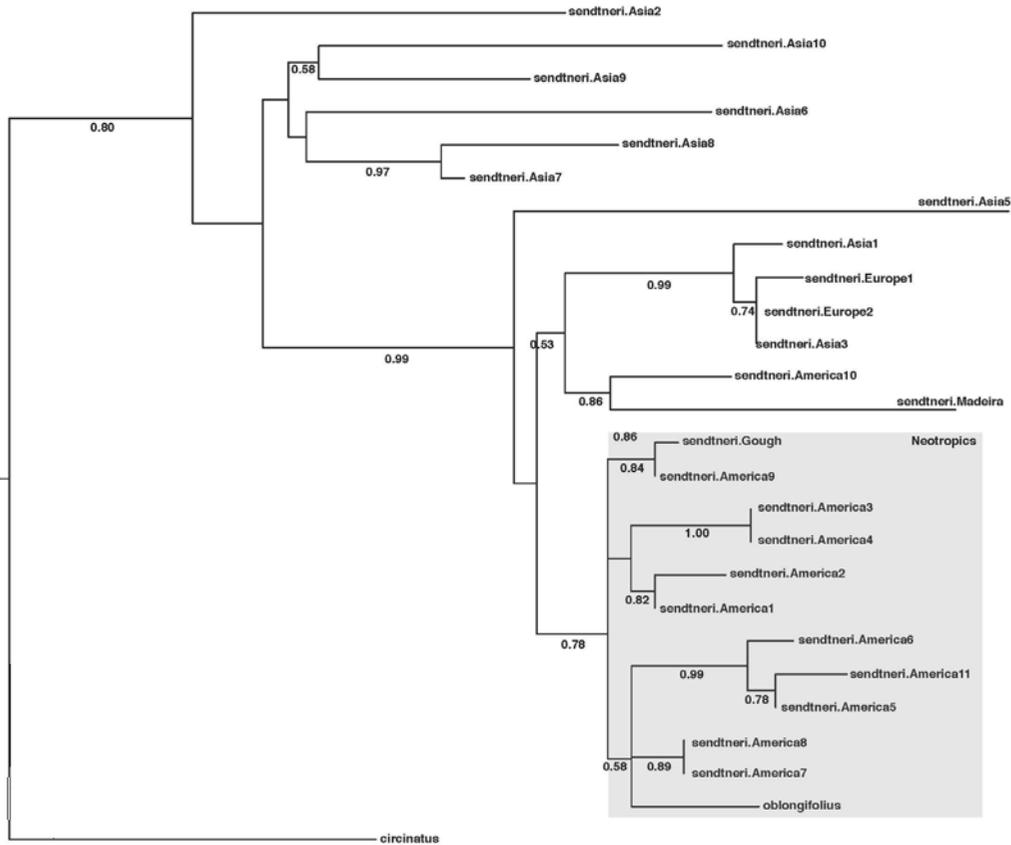


Figure 5. Most likely tree resulting from the analysis of sequence variation at the ITS locus in *H. sendtneri*

The aquatic plants strikingly differ from typical neotropical *H. sendtneri* by the very slender, almost unbranched shoots, the small, scale-like leaves, the absence of lacinia, the obtuse leaf tips made up of one cell (very rarely 2), and the broad vitta. Examination of selected neotropical specimens of *H. sendtneri* confirmed the presence of major morphological variation in this species as reported by **van Reenen** (1982, as *H. subdentatus* auct.) and **Feldberg, et al.** (2004). **Van Reenen** (1982) recognized three different phenotypes of *H. sendtneri* in the Colombian Andes: a “circinnate-leaved” form, a “large” form and a “small” form, which are grading into each other (Figure 6). Stem leaves in the large form are 1.5-3 mm long and distinctly falcato-secund, those in the small form 0.8-1.5 mm long and less falcate, while those in the circinnate-leaved form are long as in the large form but conspicuously circinnate. The large form was the most common phenotype and occurred on bark, rock or soil between 3200-4100 m. The other two phenotypes had more restricted habitat preferences, the small form occurring on exposed rock (occasionally on soil) in relatively dry or very wet páramo between 3500-4450 m while the circinnate-leaved form was restricted to bark in humid cloud forest near the forest line, at 3400-3550 m. The phenotypic variation observed in the Colombian

populations is much greater than in European populations, which resemble the small form from Colombia and likewise occur on rock (**Meinunger & Köckinger**, 2002). The latter authors reported a tendency among the European populations to become reduced in plant size in relatively dry habitats, with leaves becoming shorter and broader. Plant size reduction in the European populations was not observed in wet habitats, however.

A comparison of the aquatic plants with the phenotypes described by **van Reenen** (1982) shows greatest resemblance to the small form, especially to small branches of the latter, which are rather similar in width, leaf size and shape, short leaf tips and absence of lacinia at leaf base, even though showing more variation in leaf tip length (Table 2). The similarity of the aquatic plants to branches of the small form suggests that the aquatic plants might represent a juvenile phenotype of *H. sendtneri*. The flagelliform habit, the 1-celled leaf tips and the broad vitta, observed also in the type of *H. obtusifolius* from Serra do Itatiaia, are the most distinctive features of this phenotype. The aberrant morphology of the aquatic *H. sendtneri* plants fits the notion that submerged bryophytes frequently have unusual morphologies (**Vitt & Glime**, 1984; **Wagner, et al.**, 2000; **de Winter & Beever**, 2004; **Rankin, et al.**, 2017). **De Winter**

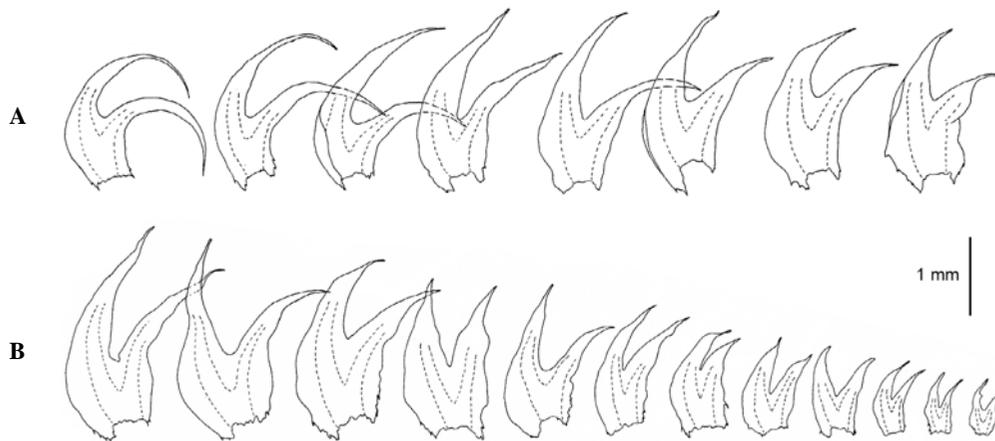


Figure 6. Variation in leaf size and shape in *Herbertus sendtneri* from Colombia (after **van Reenen**, 1982, as *H. subdentatus*): circinnate form (top left), large form (top right, bottom left), small form (bottom right)

Table 2. Comparison of aquatic *H. sendtneri* with the small form of *H. sendtneri* from the Sierra Nevada del Cocuy

	Small form		Aquatic (stems)
	Stems	Branches	
Shoot width	0.7-1.4 mm	0.3-0.6 mm	0.4-0.5 mm
Leaf length	0.8-1.5 mm	0.3-0.75 mm	0.3-0.8 mm
Leaf length : width	1.7-2 : 1	1.4-2 : 1	1.4-2 : 1
Leaf appendages	0-2, ciliate or laciniate	0(-1), ciliate	0(-2), ciliate
Leaf tips (uniseriate part)	3-7 cells	1-7 cells	1(-2) cells
Vitta bifurcation at lamina height	1/3-3/4	1/3-3/4	3/4-5/6

& Beever (2004) found that bryophytes in deep-water lakes of New Zealand often possessed narrow, sterile shoots with scale-like leaves and reduced branching, and they suggested that these shoots reflected an extended juvenile state of the species. The results of our study fully agree with these observations.

Interestingly, the shoots tips in the aquatic *Herbertus* material collected in 1977 were frequently swollen and ball-shaped by crowding of leaves, resembling gynoecia. However, no archegonia were found inside these structures; instead, we found small, whitish colonies of unidentified protozoans, resembling gnathifers. We also observed that growth of the infected shoot tips was inhibited and was being continued by innovating branches (1-2) sprouting from below the swollen shoot tips.

Origin of the aquatic plants. We suggest that the aquatic plants may have originated from the small, rock-inhabiting populations of *H. sendtneri*, which are common in the Sierra Nevada del Cocuy (A.M. Cleef, pers. obs.). These plants sometimes produce caducous branches (e.g., Cleef 8811), which may have acted as a means of unspecialized vegetative reproduction and may have dispersed into the lake. Alternatively, rain-swollen streams from the rocky slopes ('lajas') could have washed the plants into the lake, or the plants might have established on the shore when the water level was low and became secondarily submerged. Dispersal into the lake must have occurred during the last 12.000-21.000 years, when the lake has been ice-free. The question remains whether the aquatic plants originated from one single dispersal event, resulting in one clonal population, or whether they became established in the lake via multiple dispersal events.

Contributions of the authors

RG did the morphological study and wrote the article, AV did the molecular analysis, GVR collected the fresh material and contributed illustrations, and AMC and GVR provided data on the habitat and the origin of the aquatic plants. All authors contributed to the text.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgments

We express our gratitude to the curators of the herbaria of COL, G, PC and U for making material available for study, to Steven P. Churchill for information on *Ditrichum submersum*, to Janice Glime for help with literature and to Ludvine Longou (UMS2700, CNRS, MNHN Paris) for preparing part of the figures for publication.

References

Bartlett, J.K. & Vitt, D.H. (1986). A survey of the species in the genus *Blindia* (Bryopsida, Seligeriaceae). *New Zealand Journal of Botany*, **24**: 203-246.

- Brönmark, C. & Hansson, L.A.** (2017). *The Biology of Lakes and Ponds*, 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
- Churchill, S.P.** (2016). Bryophyta. In: Bernal, R., Gradstein, S.R. & Celis, M. (eds.). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia* (pp. 353-442). Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Churchill, S.P.** (2018). Andean Bryophytes. www.tropicos.org/Project/ANBRY
- Cleef, A.M.** (1981). The vegetation of the páramos of the Colombian Cordillera Oriental. *Dissertationes Botanicae*, **61**: 1-320.
- Crandall-Stotler, B.J. & Gradstein, S.R.** (2017). A new riverine species of the genus *Fossombronina* (Pelliales, Fossombroniaceae) from Ecuador. *Bryophyte Diversity and Evolution*, **39**: 94-101.
- Darriba, D., Taboada, G.L., Doallo, R., Posada, D.** (2012). jModelTest 2: more models, new heuristics and parallel computing. *Nature Methods*, **9**: 772.
- de Winton, M.D. & Beever, J.E.** (2004). Deep-water bryophyte records from New Zealand lakes. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **38**: 329-340.
- Feldberg, K., Groth, H., Wilson, R., Schäfer-Verwimp, A., Heinrichs, J.** (2004). Cryptic speciation in *Herbertus* (Herbertaceae, Jungermanniopsida): Range and morphology of *Herbertus sendtneri* inferred from nrITS sequences. *Plant Systematics and Evolution*, **249**: 247-261.
- Feldberg, K. & Heinrichs, J.** (2005). Some new synonyms of *Herbertus sendtneri* (Nees) Lindb. from the Neotropics. *Cryptogamie, Bryologie*, **26**: 411-416.
- Feldberg, K. & Heinrichs, J.** (2006). A taxonomic revision of *Herbertus* in the Neotropics based on nuclear and chloroplast DNA and morphology. *Botanical Journal of the Linnean Society*, **151**: 309-332.
- Glime, J. & Vitt, D.H.** (1984). The physiological adaptations of aquatic Musci. *Lindbergia*, **10**: 41-52.
- Gouy, M., Guindon, S., Gascuel, O.** (2010). SeaView version 4: a multiplatform graphical user interface for sequence alignment and phylogenetic tree building. *Molecular Biology and Evolution*, **27**: 221-224.
- Gradstein, S.R. & Costa, D.P.** (2003). The liverworts and hornworts of Brazil. *Memoirs of the New York Botanical Garden*, **87**: 1-317.
- Gradstein, S.R. & Reiner-Drehwald, M.E.** (2007). On the status of *Neopotamojeunea* E.Reiner (Lejeuneaceae), with description of a new species. *Systematic Botany*, **32**: 487-492.
- Gradstein, S.R. & Váña, J.** (1999). On the taxonomy of *Kymatocalyx* and *Stenorhipis* (Cephalozeliaceae). *Haussknechtia Beiheft*, **9**: 155-170.
- Gradstein, S.R., Churchill, S.P., Salazar Allen, N.** (2001). Guide to the Bryophytes of Tropical America. *Memoirs of the New York Botanical Garden*, **86**: 1-577.
- Gradstein, S.R., Cleef, A.M., Fulford, M.H.** (1977). Oil body structure and ecological distribution of selected species of Andean Jungermanniales. *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen C*, **80**: 377-420.
- Gradstein, S.R., Ilkiu-Borges, A.-L., Vanderpoorten, A.** (2011). Habitat specialization triggers the evolution of unusual morphologies: the case of *Cololejeunea stotleriana* sp. nov. from Ecuador. *The Bryologist*, **114**: 9-22.
- Gradstein, S.R., Reiner-Drehwald, M.E., Jost, L.** (2004). The systematic position and distribution of *Myriocolea irrorata* (Lejeuneaceae, Hepaticae), an endangered liverwort from the Ecuadorian Andes. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, **93**: 235-248.

- Griffin, D., Gradstein, S.R., Aguirre, J.** (1982). On a new antipodal element in the Neotropical paramos: *Dendrocryphaea latifolia* sp. nov. Acta Botanica Neerlandica, **31**: 175-184.
- He, X.L. & Sun, Y.** (2017). Rare sporophyte found in Europe for *Herbertus sendtneri* with a range expansion to Africa and Malaysia. Phytotaxa, **324**: 42-50.
- Hedenäs, L.** (2003). Amblystegiaceae. Flora Neotropica Monograph, **89**: 1-107.
- Hill, M., Preston, C.D., Smith, A.J.E.** (1991). Atlas of the Bryophytes of Britain and Ireland. Vol. 1: Liverworts. Colchester: Harley Books.
- Ignatov, M. & Kurbatova, B.** (1990). A review of deep-water bryophytes with records from USSR. Hikobia, **10**: 393-401.
- Mägdefrau, K.** (1973). *Hydropogon fontinaloides* (Hook.) Brid., ein periodisch hydro-aerophytisches Laubmoos des Orinoco und Amazonas. Herzogia, **3**: 141-149.
- Meinunger, L. & Köckinger, H.** (2002). *Herbertus sendtneri* (Nees) Lindb. – neue Einzelheiten zum historischen Fund im Thüringer Wald und Bemerkungen zur Variabilität der Art. Limprichtia, **20**: 31-46.
- Paton, J.A.** (1999). The Liverwort Flora of the British Isles. Colchester: Harley Books.
- Rankin, A.H., Pressel, S., Duckett, J., Rimington, W.H., Hawes, I., Sumners, D.Y., Mackey, T.J., Castendyke, D., Schneider, H., Jungblut, A.D.** (2017). Characterisation of a deep-water moss from the perennially ice-covered Lake Vanda, Antarctica. Polar Biology. DOI 10.1007/s00300-017-2127-y
- Reiner-Drehwald, E.** (1999). On *Potamojeunea polyantha* (Mont.) E.Reiner & Goda comb. nov. (Lejeuneaceae), a poorly known rheophytic liverwort from South America. Haussknechtia Beiheft, **9**: 299-306.
- Shevock, J., Wen-Shang, M.Z., Akiyama, H.** (2017). Diversity of the rheophytic condition in bryophytes: field observations from multiple continents. Bryophyte Diversity and Evolution, **39**: 75-93.
- van Reenen, G.B.A.** (1982). Studies on Colombian Cryptogams XII. High Andean species of *Herbertus* S. F. Gray (Hepaticae). Lindbergia, **8**: 110-120.
- van der Hammen, T., Barelids, J., de Jong, H., de Veer, A.A.** (1981). Glacial sequence and environmental history in the Sierra Nevada del Cocuy (Colombia). Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, **32**: 247-340.
- Vanderpoorten, A. & Goffinet, B.** (2009). Introduction to Bryophytes. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wagner, D.H., Christy, J.A., Larson, D.W.** (2000). *Deep-water bryophytes* from Waldo Lake, Oregon. Lake and Reservoir Management, **16**: 91-99.

Primer registro de *Nanomis rasmusseni* Chacón, Pescador & Segnini, 2013 (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) en el departamento del Tolima, Colombia

Adriana Marcela Forero-Céspedes*, Gladys Reinoso-Florez

Grupo de Investigación en Zoología, Facultad de Ciencias, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

Se registra por primera vez la especie *Nanomis rasmusseni* (Ephemeroptera: Baetidae) en el departamento del Tolima, Colombia. Esta especie había sido previamente reportada en Venezuela y, recientemente, en Colombia a partir de material proveniente de los departamentos de Nariño y Quindío. La información del presente estudio amplía su distribución a nivel regional. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras claves: Tolima; distribución; Baetidae; taxonomía.

First record of *Nanomis rasmusseni* Chacón, Pescador & Segnini, 2013 (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) from Tolima, Colombia

Abstract

We report the species *Nanomis rasmusseni* (Ephemeroptera: Baetidae) for the first time in the department of Tolima, Colombia. This species had been previously reported in Venezuela, and more recently in Colombia, based on material from the departments of Nariño and Quindío. The present study expands its distribution in the region. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Tolima; distribution; Baetide; taxonomy.

Introducción

En Colombia la información taxonómica disponible de la familia Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) es aún escasa, a pesar de su gran abundancia y diversidad en los ecosistemas acuáticos (Forero, *et al.*, 2014). El género *Nanomis*, endémico de la región neotropical (Lugo-Ortiz & McCafferty, 1999), se ha reportado en países suramericanos como Argentina, Colombia, Bolivia, Venezuela, Ecuador y Perú, con tan solo dos especies conocidas *N. galera* y *N. rasmusseni* (Lugo-Ortiz & McCafferty, 1999, Zúñiga *et al.*, 2004; Domínguez, *et al.*, 2006; Chacón, *et al.*, 2013).

En Colombia, la presencia de organismos de la especie *N. rasmusseni* se ha registrado en los departamentos de Nariño y Quindío (Salinas, *et al.*, 2018). Los organismos recolectados en el presente estudio presentan características morfológicas que coinciden con las de la especie, con base en lo cual se presenta como nuevo registro para el departamento del Tolima, ampliando de esta manera su distribución en el país.

Materiales y métodos

Se evaluaron 23 ninfas de *N. rasmusseni* depositadas en la Colección Zoológica de la Universidad del Tolima (CZUT-Ma), cuyos datos de captura se indican en el material

examinado. La descripción de las estructuras de importancia taxonómica de la familia Baetidae, como labro, branquia, mandíbulas derecha e izquierda y tergos abdominales, se hizo según la descripción original de la especie de Chacón, *et al.* (2013), y la descripción de los organismos para Colombia hecha por Salinas, *et al.* (2018). Los especímenes estudiados se asociaron a los sustratos de roca y grava en tres arroyos del departamento del Tolima. Se contó con el apoyo del profesor Luke Jacobus de las Universidades de Indiana y Purdue (Estados Unidos) para la confirmación taxonómica de la especie.

Resultados y discusión

Entre los caracteres que diferencian a la especie se encuentran: 1) el margen anterior del labro con setas aplanadas de forma triangular que surgen medialmente (Figura1A); 2) set interno de incisivos de la mandíbula derecha con cinco denticulos (Figura1B); 3) prosteca derecha bífida desde

*Correspondencia:

Adriana Marcela Forero Céspedes, adrianam@ut.edu.co

Recibido: 18 de diciembre de 2017

Aceptado: 19 de julio de 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

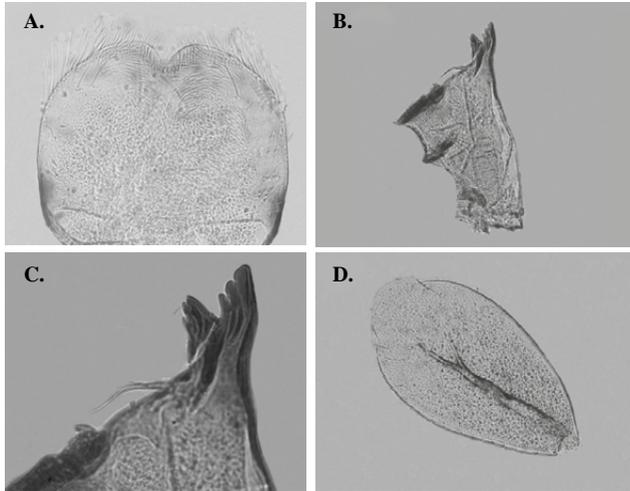


Figura 1. *Nanomis rasmusseni*, ninfa (material examinado). A) Labro. B) Mandíbula derecha. C) Prosteca derecha. D) Branquia.

el tercio basal (Figura1C); 4) margen posterior de tergas abdominales I-VIII lisa, y de tergas IX-X con espinas, y 5) branquias ligeramente asimétricas, más pigmentadas y con ramificaciones completamente claras (Chacón, *et al.*, 2013; Salinas, *et al.*, 2018) (Figura1D).

Material examinado. COLOMBIA. Tolima. 17 ninfas. Quebrada Cocare. 04° 28' 37,4" N; 075°08'25,4" O. 1.057 m. 20/IX/2012. Forero A., Duarte, E. . 05/IV/2013. Forero A., Duarte, E. Tolima. Cinco ninfas. Quebrada Chumba. 04° 29' 06,2" N 075°05'48,6" O. 973 m. 08/VI/2012. Reinoso G., Forero A. . 28/VI/2013. Forero A., una ninfa. Quebrada Chembe. 04° 27' 34,2" N; 075°08'54,7" O. 988 m. 29/VI/2013. Forero A.

Contribución de los autores

El presente producto es un logro del desarrollo de un macroproyecto donde las dos autoras trabajaron en su diseño y

ejecución. Adriana Forero y Gladys Reinoso, trabajaron juntas en la determinación taxonómica, confirmación de la especie y elaboración y ajuste del manuscrito.

Conflicto de interés

En el presente manuscrito no hubo ningún conflicto de interés por parte de las autoras. Se aclara que ambas autoras están de acuerdo en presentar estos resultados para su publicación respectiva.

Agradecimientos

Las autoras agradecen al profesor Luke Jacobus de las Universidades de Indiana y Purde (Estados Unidos), por la confirmación taxonómica de los organismos.

Referencias

- Chacón, M., Pescador, M., Segnini, S. (2013). New species of *Nanomis* Lugo-Ortiz and McCafferty, 1999 (Ephemeroptera: Baetidae) from Venezuela. *Aquatic Insects: International Journal of Freshwater Entomology*. **35**: (1-2): 1-14.
- Domínguez, E., Molineri, C., Pescador, M., Hubbard, M., Nieto, C. (2006). Ephemeroptera de América del Sur. Pensoft Publishers. Sofia-Moscú. p. 646.
- Forero-Céspedes, A. M. & Reinoso-Flórez, G. (2014). Nuevos registros de Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) para Colombia y el departamento del Tolima. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*. **26**: 59-67.
- Lugo-Ortiz, C.R. & McCafferty, W.P. (1999). Three New Genera of Small Minnow Mayflies (Insecta: Ephemeroptera: Baetidae) from the Andean and Patagonia. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*. **34**: 88-104.
- Salinas, L., Villegas, P., Román-Valencia, C. (2018). First record of the nymph of *Nanomis rasmusseni* Chacon, Pescador & Segnini, 2013 (Ephemeroptera: Baetidae) from Colombia. *Papéis Avulsos de Zoologia*. **58**: 1-4.
- Zúñiga, M.C., Molineri, C., Domínguez, E. (2004). El orden Ephemeroptera (Insecta) en Colombia. In: Fernández, F., Andrade, G. & Amat, G. (eds): *Insectos de Colombia*: 17-42. Vol. 3. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Moutabea chartacea (Polygalaceae), a new species from the north-central Amazon and Guayana Shield

Gerardo A. Aymard C.^{1,*}, Lisa M. Campbell²

¹ UNELLEZ-Guanare, Programa de Ciencias del Agro y del Mar, Herbario Universitario (PORT), Mesa de Cavacas, Estado Portuguesa, Venezuela

² The New York Botanical Garden, Bronx, NY, U.S.A.

Abstract

We describe and illustrate *Moutabea chartacea* from the wet lowland forests of Brazil (Amazonas state), Venezuela (Amazonas, Bolívar and Delta Amacuro states), and Colombia (Cauquetá, Meta and Vaupés departments), and we discuss its morphological relationships with an allied species. This new species is similar to *M. gentryi*, but it differs by its smaller petioles, leaf blades, calyx lobes, fruit, and seeds; triangular bracts; petals not reflexed; and the seed densely covered by stellate trichomes. An updated key to the named species of *Moutabea* is provided. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Brazil; Colombia; Flora of the Venezuelan Guayana; *Moutabea*; Polygalaceae; Wet lowland forests.

Moutabea chartacea (Polygalaceae), una nueva especie de la Amazonía nor-central y el escudo guayanés

Resumen

Se describe e ilustra la especie *Moutabea chartacea*, de los bosques húmedos de tierras bajas de Brasil (estado Amazonas), Venezuela (estados Amazonas, Bolívar y Delta Amacuro) y Colombia (departamentos de Cauquetá, Meta y Vaupés), y se discuten sus relaciones morfológicas con su especie afín. Esta nueva especie es similar a *M. gentryi*, sin embargo, difiere por poseer los peciolos, hojas, lóbulos de cáliz, frutos y semillas más pequeños, así como brácteas triangulares, pétalos con los ápices no reflexos y semillas densamente cubiertas por tricomas estrellados. Se incluye una clave actualizada de las especies de *Moutabea*. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Brasil; Colombia; Flora de la Guayana Venezolana; *Moutabea*; Polygalaceae; bosques húmedos.

Introduction

Moutabea Aubl. (Aublet, 1775), as traditionally circumscribed is a neotropical genus of about ten (and at least two undescribed) species of lianas, rarely shrubs or small trees, distributed from Costa Rica to Bolivia (Styer, 1997; Persson & Eriksen, 2009; Ulloa-Ulloa, et al., 2017). Several species have edible fruits (Eriksen, et al., 2000; Aymard, et al., 2004; Eriksen & Persson, 2007). *Moutabea* (mainly *M. guianensis* Aubl.) and other genera of Polygalaceae are an important source of xanthones (Ripardo Filho, et al., 2005; 2014). These organic compounds are widely used as an insecticide, ovicide, and larvicide, as well as in the preparation of xanthidrol, which is used to determine urea levels in the blood (Williams, et al., 2000).

The genus is characterized by the combination of strictly axillary racemes, bilaterally symmetrical flowers, tubular corolla, eight stamens with the filaments fused into a sheath that is adnate to the petals, and a (2--4(5))-locular ovary (Styer, 1977; Eriksen, 1993a; Eriksen & Persson, 2007). *Moutabea* is distinguished from other Moutabeae in consistently having more pronounced bilaterally symmetrical flowers, a boat-shaped abaxial petal, bisporangiate

anthers, and an upwardly curved style. Although there is variability in the number of locules, *Moutabea* usually has four whereas the other genera have either fewer (2 or 3, *Balgoya* and *Barnhartia*) or more (5 to 8, *Diclidanthera* and *Eriandra*).

Polygalaceae (Fabales; APG, 2016) are worldwide in distribution with about 27 genera and 1,200 species. The infrafamilial classification includes three long-recognized tribes and a fourth more recently segregated (*Carpologieae* B.Eriksen, *Moutabea* Chodat, *Polygaleae* Chodat, and *Xanthophylleae* Baill.) based on cladistic analyses of morphological characters (Eriksen, 1993b) and DNA sequence data (Persson, 2001; Forest, et al., 2007 [in part]; Pastore, et al., 2017).

Moutabea has never been monographed, and no sections or subgenera have been recognized. As noted elsewhere, the “genus badly needs revision” (a note wrote by J. J. Wurdack, in

*Corresponding autor:

Gerardo A. Aymard C., cuyuni24@hotmail.com

Received: April 7, 2018

Accepted: August 6, 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

C. Cid, et al. 4112, NY) including field work (Wendt, 2000). Jansen-Jacobs & Maas (2010) assessed the taxonomy of the genus describing a new species, recognizing eleven in total, including three yet undescribed. Subsequently, *M. floribunda* J.C. Huber ex J.B. Silveira & Secco was described from the rainforests of Brazil, Guyana, and Perú (Silveira & Secco, 2015). The circumscription of *Moutabea* was expanded to include a species (*M. pacifica* (Morat & Meijden) Byng & Christenh.) from New Caledonia, previously treated as the monotypic genus *Balgoya* Morat & Meijden (Christenhusz, et al., 2018). This change was made based on Pastore, et al. (2017) unexplained preliminary cladistic hypothesis which showed the enigmatic species of *Balgoya* to be nested within *Moutabea* in a molecular phylogenetic study. Further research includes greater taxonomic sampling and an examination of morphological characters that would support a circumscription of *Moutabea* (with connate sepals and petals and slightly curved style) to include *Balgoya* (with free sepals and petals and straight style) and recognize the combination.

Wendt (2000) pointed out several morphological leaf features that we find generally useful for separating the species into two morphological groups. However, further evaluation is needed to assess these distinctions amongst the named and recognized undescribed species (Eriksen, et al., 2000; Aymard, et al., 2004) and address the widespread species *M. aculeata*, which possess characteristics of both groups. One group is characterized by leaves that are very dark, coriaceous to very thick-textured, without cystolith-like protuberances (“knob-like papillae” of Eriksen & Persson, 2007), and the lateral veins immersed and not discernible or distinctly and uniformly impressed (*M. angustifolia* Huber, *M. chodatiana* Huber, *M. dibotrya* Mart. ex Miq., *M. excoriata* Mart. ex Miq., *M. guianensis* Aubl.). The second group is characterized by chartaceous to subcoriaceous, discolorous leaves, that are brown abaxially, green adaxially, with cystolith-like protuberances on both sides and the secondary veins slightly impressed to plane above and raised below (e.g., *M. arianae* Jans.-Jac. & Maas, *M. gentryi* T.Wendt).

Materials and methods

Herbarium specimens from the following institutions were studied: A, COAH, COL, GH, K, MO, MSC, NY, US, and VEN. The new species was described based on dried material and observations of other species were supplemented by relevant literature.

Taxonomy. *Moutabea chartacea* Aymard & L.M. Campb., *sp. nov.* (Figure 1)

Type: VENEZUELA. Bolívar: 20--25 km SW of El Manteco, on road to San Pedro de las dos Bocas, 07° 10' N; 62° 55' W, ca. 200 m, 1--3 Aug 1978 [fl], R. Liesner & A. González 5969 (holotype: VEN; isotypes: MO, NY, VEN).

Diagnosis: Species *Moutabea gentryi* T.Wendt proxima, sed diversa: petiolis ca. 1(--2) mm latis, non rugulosis, lamina

2--3.5(--5) cm lata, bracteis 1--2 mm longis, triangularibus, extus pilosis, intus glabris, calycis lobis 4--5 mm longis, oblongis, utrinque adpresso-pubescentibus, petalis apice haud reflexis, tubo staminali [filamento] ultra petalorum basin, abaxialiter dense piloso, fructu 2--4 cm diametro, seminibus ca. 1.5 cm longis, stellatis pilis dense vestitis.

Lianas (high-climbing) or lianescent shrubs. **Branches** and branchlets terete, glabrous, without persistent spinules, bark flaking off when mature. **Leaf** blades 5--20 × 2--3.5(--5 cm), chartaceous, obovate to obovate-elliptic, discolorous, brown abaxially, green adaxially, base acute, apex acute, sometimes rounded, the margin entire, glabrous on both surfaces, with cystolith-like protuberances on both sides, the midvein adaxially raised proximally, plane distally, abaxially raised, secondary veins 6--18 per side, raised abaxially, slightly impressed to plane adaxially, tertiary venation not visible. **Petiole** 4--10 mm long, 1(--2) mm wide, glabrous, not rugulose, with two annular glands at each node in the stipular position, glands ca. 2 mm diam. **Inflorescence** 1--5 cm long, 3--8-flowered, the main axis black, striate, sparsely appressed-pilose; pedicels 1--2 mm long, pubescence as on

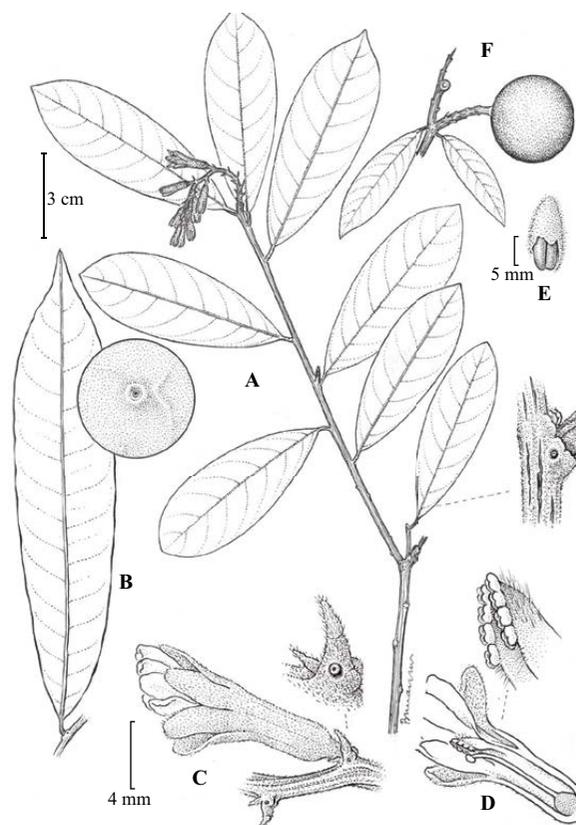


Figure 1. *Moutabea chartacea*. A. Branch showing the inflorescence and flowers. B. Leaf and detail showing a cystolith-like protuberance. C. Lateral view of a flower and a stipular annular gland. D. Flower in medial view with part of the perianth removed and detail of the filament sheath and anther insertion. E. Seed with part of the aril removed. F. Branch with a fruit. (Drawn from R. Liesner & A. González 5969).

the main axis, bracts at the base of the pedicel (not those along the axis) 1--2 mm, triangular, pilose outside, glabrous inside, margins ciliate, with a pair of annular glands at the base adaxially, ca. 1 mm diam. **Flower** ca. 1.5 cm long, floral tube and calyx green, the tube ca. 1 cm long, puberulent to glabrescent externally; **calyx** lobes 4--5 mm long, oblong, appressed pubescent on both sides, margins ciliate, calyx bilaterally symmetrical, lateral sepals reclined in outline; **petal** limbs ca. 5 mm long, white, oblong, glabrous on both surfaces, margins thickened, apex rounded, not reflexed, basally adherent to a filament sheath; **staminal sheath** hood free, extending ca. 2.5 mm beyond petal attachment, densely pilose abaxially; **anthers** 8, glabrous, sessile, rounded, partially coalescent basally, obliquely arranged on the sheath apex to form a V-shape; **ovary** ca. 1--1.3 mm long at anthesis, style 0.5--1 cm long, glabrous, distally slightly curved upwards, stigma flattened-capitate, included in the filament sheath. **Fruit** 2--4 cm diam., globose, glabrous; **seed** ca. 1.5 cm long, ovate, densely covered by stellate trichomes, surrounded by a thin aril, with the aril removed seed 5--6 mm thick.

Distribution and habitat. Known from Amazonas state, Brazil; Amazonas, Bolívar, and Delta Amacuro states, Venezuela; and Caquetá, Meta, and Vaupés departments, Colombia. *Moutabea chartacea* occurs in wet lowland forests (*várzea* and *terra firme*), between 100--350 m.

Taxonomic notes. In the *Flora of the Venezuelan Guayana* treatment of Polygalaceae (Aymard *et al.*, 2004), *Moutabea chartacea* was included as "*Moutabea* sp. A." This new species is possibly allied to a group of specimens collected in the Amazon basin that may represent yet another undescribed taxon (Wendt, 2000). Because of its discolorous leaves, with cystolith-like protuberances on both surfaces, and the secondary veins raised abaxially and slightly impressed to plane adaxially *M. chartacea* is similar to *M. gentryi* from Costa Rica, Panamá, Colombia (Antioquia), and northwestern Venezuela in Zulia state (Wendt, 2000; Aymard & Freire-F., 2016). However, *M. chartacea* differs from that species by its petioles slender, ca. 1(--2) mm wide, smooth, leaf blades 23.5(--5) cm wide (vs. petioles stout, 2--4 mm wide, rugulose, blades 4--9 cm wide), bracts 1--2 mm long, triangular, pilose externally, glabrous internally, (vs. 1--3.5 mm, lanceolate or lanceolate-ovate, puberulent on both surfaces); calyx lobes 4--5 mm long, oblong, appressed-pubescent on both sides (vs. 7--9 mm, ovate, densely puberulous adaxially); petal apex not reflexed, anthers rounded (vs. petal apex strongly reflexed, anthers quadrate), fruit 2--4 cm diam., and seeds ca. 1.5 cm long, densely covered by stellate trichomes (vs. ca. 5 cm diam., seeds 2--2.6 cm, covered by a tomentum of simple trichomes).

Etymology. *Moutabea chartacea* is named for the texture of its leaves, in a genus with leaf blades otherwise mostly coriaceous to very thick-textured.

Phenology. Known to flower in August, October, and November; and fruit in April, May, and October.

International Union for Conservation of Nature (IUCN) Red List™ category. According to the IUCN criteria, this species would currently be ranked as DD (data deficient). Although *M. chartacea* is known from only several collections, we expect this new species to have a wider distribution across the northern Amazon basin and on the Guiana Shield. Future research may show that a threatened classification (IUCN, 2016) is appropriate.

Additional specimens examined: BRAZIL. Amazonas: Basin of Rio Madeira, Humayta, near Livramento, on Rio Livramento, Oct--Nov 1934 [fr] *Krukoff 6689* (A, NY); Humayta, on plateau between Rio Livramento and Rio Ipixuma, Nov 1934 [fr], *Krukoff 7143* (GH, NY); Rio Madeira, Humaitá, road Humaitá to Porto Velho, Km 27, Nov 1966 [fr], *Prance, Pena & Ramos 3495* (GH, K, NY, US); Manaus and vicinity, road Igarape Leão, 25 km N of Manaus, Nov 1966 [fr], *Prance, Pena & Ramos 3142* (GH, NY). **COLOMBIA. Caquetá:** P. N. N. Serranía Chiribiquete, upper Río Mesay, ca. 10 km from Jacameya rapids, 0° 04'50" N; 72° 25' 37" W, Oct 2016 [fr], *Restrepo C. 897* (COAH); Araracuara, Villa Azul, Muinane community, 0° 32' S; 72° 06' W, 300--350 m, May 1992 [fr], *Duque & Matapi 1743* (COL). **Meta:** Macarena, headwaters of río Tunia, Resguardo Indígena Yaguará, 01° 43'39" N; 73° 31' 34" W, 280 m, Sep 2016 [fr], *Cárdenas L., Marín, Paky, Aldana & Paki 47331* (COAH). **Vaupés:** Taraira, E. B. Mosiro Itajura (Caparú), 01° 04'21.8" S; 69° 31' 2.9" W, 200 m, Apr 2004, *Clavijo-R., González & Tanimuka 788* (COL). **VENEZUELA. Amazonas:** High Orinoco, río Metacuni, base of Sedukerawa Tepui, 03° 15' N; 64° 56' W, 210--650 m, Jan 1990 [fr], *Stergios & Velasco 14270* (NY, PORT); Atabapo, río Cunucunuma, torrente Picure, 03° 43' 40" N; 65° 48' 40" W, 150 m, Jul 1992 [fr], *Pérez & Sosa 338* (MO). **Bolívar:** Cedeño, along río Erebató, 05° 20' N; 64° 45' W, 330 m, Mar 1992 [fr], *Boom & Marín 10478* (NY, PORT). **Delta Amacuro:** Sierra Imataca, E side of río Cuyubini, Cerro La Paloma, 100--200 m, Nov 1960 [fr], *Steyermark 87617* (NY, US, VEN)

Key to the species of *Moutabea*

1. Leaves distinctly coriaceous to very thick-textured, unicolored or sometimes discolored when dried, the lateral veins not discernible or distinctly and uniformly impressed .. 2
2. Branches and branchlets unarmed 3
3. Leaves oblong-obovate or oblong-lanceolate, inflorescences stout, 3--4 cm long, 2--3 mm wide, flowers ca. 2.5 cm long, sepals deltoid-ovate, acute at the apex, margins not ciliate..... *M. chodatiana* Huber (Brazil, possibly Venezuela)
3. Leaves obovate to elliptic, inflorescences slender, 1.5--3 cm long, ca. 1 mm wide, flowers 1.5--2 cm long, sepals ovate, round at the apex, margins ciliate *M. guianensis* Aubl. (Brazil, Colombia, Ecuador, Guianas, Perú, Venezuela)
2. Branches and branchlets armed 4
4. Leaves narrowly oblong or oblong-obovate; petioles slender, ca. 1 mm wide; sepals narrowly ovate or oblong at the apex; filament sheath densely pilose externally *M. angustifolia* Huber (Brazil)

4. Leaves oblong, oblong-lanceolate or obovate-elliptic; petioles stout, 2--3 mm wide; sepals acute at the apex, filament sheath sparsely pilose externally 5

5. Leaves oblong to oblong-lanceolate; inflorescences 1--2 cm long; filament sheath ca. 1 cm long, pubescent externally, anthers subsessile, ca. 2 mm wide, rounded; ovary globose *M. dibotrya* Mart. ex Miq. (Brazil)

5. Leaves obovate-elliptic; inflorescences 2.5--4 cm long; filament sheath ca. 1.5 cm long; anthers sessile, ca. 1 mm wide, circular; ovary pyriform *M. excoriata* Mart. ex Miq. (Brazil)

1. Leaves chartaceous to coriaceous, always discolored, brown abaxially, green and lustrous adaxially, the secondary veins slightly impressed to plane above, raised below 6

6. Lower surfaces of the leaves velutinous *M. arianae* Jans.-Jac. & Maas (Brazil, French Guiana)

6. Lower surfaces of the leaves glabrous or minutely puberulent 7

7. Stout spinules sparse along the branches, rarely absent, leaves 13--35 cm long, without cystolith-like protuberances 8

8. Inflorescences monad, staminal sheath back of the staminal sheath hood partially free from the opposed petal *M. aculeata* (Ruiz & Pav.) Poepp. & Endl. (Bolivia, Brazil, Colombia, Ecuador, Guianas, Perú, Venezuela)

8. Inflorescences tri- or tetramerous, back of the staminal sheath hood completely free from the opposed petal *M. floribunda* J.C. Huber ex J.B. Silveira & Secco (Brazil, Guayana, Perú)

7. Branches with or without persistent spinules, leaves 5--23 cm long, with cystolith-like protuberances 9

9. Branches without persistent spinules, petioles ± smooth, 1(--2) mm wide, leaves 2--3.5(--5) cm wide, calyx lobes oblong, 4--5 mm long, appressed pubescent on both surfaces, petal apices not reflexed, anthers rounded *M. chartacea* Aymard & L.M.Campb. (Brazil, Colombia, Venezuela)

9. Branches with scattered spinules, petioles rugulose, 2--4 mm wide, leaves 4--10 cm wide, calyx lobes ovate, 7--9 mm long, densely puberulous adaxially, petal apices strongly reflexed, anthers quadrate *M. gentryi* T.Wendt (Colombia, Costa Rica, Panamá, Venezuela)

Acknowledgments

The authors are grateful to Bruno Manara (VEN) for preparing an early illustration and for his help with the Latin diagnosis; to Bobbi Angell for enhancements of the illustration; to Thomas (Tom) Wendt (TEX), who kindly provided the first author with his personal notes on *Moutabea* gathered during decades of herbarium specimen research, and to J. Richard Abbott (NY) and T. Wendt for their useful comments on the drafts of the manuscript. We thank the staff of the herbaria cited above for making their facilities available for our research.

Author's contributions

Both authors contributed equally to this work

Conflicts of interest

The authors declare no competing interests.

References

- Angiosperm Phylogeny Group [APG] IV.** (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*. **181**: 1-20.
- Aublet, J. B. C. F.** (1775). *Histoire des Plantes de la Guiana Française*. p. 678-682. Vol. 2. P. F. Didot-jeune, London & Paris.
- Aymard, G., Berry, P., Eriksen, B.** (2004). Polygalaceae. Pp. 316-347. In: Steyermark, J. A., Berry, P. B., Yatshievych, K. & Holst, B. (editors.). *Flora of Venezuelan Guayana*. Vol. 8. Missouri Botanical Garden Press, St. Louis.
- Aymard, G. & Freire-F., A.** (2016). Polygalaceae. Pp. 2207-2214. In: Bernal, R., Gradstein, S. R. & Celis, M. (editors.). *Catálogo de Plantas y Líquenes de Colombia*. Vol. 2. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Accessed on: December 20, 2017. Available from: <http://catalogoplantascolumbia.unal.edu.co>
- Christenhusz, M. J. M., Fay, M. F., Byng, J. W.** (2018). The global flora: A practical flora to vascular plant species of the world. Special Edition, GLOVAL nomenclature, **1** (4): 1-455. Plant Gateway, UK. Accessed on: July 25, 2018. Available from: www.plantgateway.com/global-flora
- Eriksen, B.** (1993a). Floral anatomy and morphology in the Polygalaceae. *Plant Systematics and Evolution*. **186**: 17-32.
- Eriksen, B.** (1993b). Phylogeny of the Polygalaceae and its taxonomic implications. *Plant Systematics and Evolution*. **186**: 33-55.
- Eriksen, B., Ståhl, B., Persson, C.** (2000). Polygalaceae. Pp. 2--130. In: Harling, G. & Andersson, L. (editors.). *Flora of Ecuador*. Vol. 65. Göteborg University, Sweden.
- Eriksen, B. & Persson, C.** (2007). Polygalaceae. Pp. 345--363. In: K. Kubitzki (editor). *The Families and Genera of Vascular Plants*. Vol. 9. Springer-Verlag, Berlin.
- Forest, F., Chase, M. W., Persson, C., Crane, P. R., Hawkins, J. A.** (2007). The role of biotic and abiotic factors in evolution of ant dispersal in the Milkwort family (Polygalaceae). *Evolution*. **61**: 1675-1694
- International Union for the Conservation of Nature.** (2016). Guidelines for using the IUCN red list categories and criteria. Version 12. Prepared by the Standards and Petitions Subcommittee. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, England. Accessed on: October 16, 2017. Available from: <http://www.iucnredlist.org/documents/RedListGuidelines.pdf>
- Jansen-Jacobs, M. J. & Maas, P. J. M.** (2010). *Moutabea arianae*, a new species of Polygalaceae from French Guiana and adjacent Brazil. *Blumea*. **55**: 86-87.
- Pastore, J. F. B., Abbott, J. R., Neubig, K. M., Whitten, M. W., Mascarenhas, R. B., Almeida-Mota, M. C., van den Berg, C.** (2017). A molecular phylogeny and taxonomic notes in *Caamembeca* (Polygalaceae). *Systematic Botany*. **42**: 54-62.

- Persson, C.** (2001). Phylogenetic relationships in the Polygalaceae based on plastid DNA sequences from the *trnL-F* region. *Taxon*. **50**: 763-779.
- Persson, C. & Eriksen, B.** (2009, onwards). Neotropical Polygalaceae. Neotropikey---Interactive key and information resources for flowering plants of the Neotropics. In: W. Milliken, B. Klitgård & A. Baracat, A. (editors). Accessed on: November 11, 2017. Available from: <http://www.kew.org/science/tropamerica/neotropikey/families/Polygalaceae.htm>
- Ripardo Filho, H. S., Pacheco, L. C., Andrade, E. S., Correa, M. J. C., Araújo, R. N. M., Guilhon, G. M. S. P., da Silva, J. K. R., Santos, L. S.** (2005). Xanthones from the roots of *Moutabea guianensis* Aubl. *Molecules*. **20**: 127-134.
- Ripardo Filho, H. S., Guilhon, G. M. S. P., Santos, L. S.** (2014). A new Xanthone from *Moutabea guianensis* Aubl. *Molecules*. **19**: 8885-8889.
- Silveira, B. J. & Secco, R. S.** (2015). A new species of *Moutabea* (Polygalaceae) for the Brazilian Amazon, Guyana and Perú. *Phytotaxa*. **202**: 259-265.
- Styer, C. H.** (1977). Comparative anatomy and systematics of *Moutabeae* (Polygalaceae). *Journal of the Arnold Arboretum*. **58**: 109-145.
- Ulloa-Ulloa, C., Acevedo-R., P., Beck, S., Belgrano, M. J., Bernal, R., Berry, P. E., Brako, L., Celis, M., Davidse, G., Forzza, R. C., Gradstein, S. R., Hokche, O., León, M., León-Yáñez, S., Magill, R. E., Neill, D. A., Nee, M., Raven, P. H., Stimmel, H., Strong, M. T., Villaseñor, J. L., Zarucchi, J. L., Zuloaga, F. O., Jørgensen, P. M.** (2017). An integrated assessment of the vascular plant species of the Americas. *Science*. **358**: 1614-1617.
- Wendt, T.** 2000. *Moutabea gentryi* (Polygalaceae), a new species of liana from Central America and Colombia. *Lundellia*. **3**: 6-12.
- Williams, C. A., Harborne, J. B. & Colasante, M.** (2000). The pathway of chemical evolution in bearded iris species based on flavonoid and xanthone patterns. *Annali di Botanica*. **58**: 51-54.

Diversidad de mariposas diurnas (Lepidoptera: Papilionoidea) asociadas con tres hábitats en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó, Chocó, Colombia

✉ Víctor Danilo Palacios-Mayoral*, ✉ Leison Palacios-Mosquera, ✉ Alex Mauricio Jiménez-Ortega

Grupo de Investigación en Manejo y Gestión de la Vida Silvestre del Chocó, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Programa de Biología, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia

Resumen

Se determinó la diversidad de mariposas diurnas asociadas a tres hábitats con diferentes grados de conservación en el corregimiento de Pacurita, Quibdó, Chocó, Colombia. Para la captura de mariposas durante 38 días de muestreos entre los meses de julio y diciembre del 2016, se empleó una red entomológica y seis trampas Van Someren-Rydon cebadas con pescado en descomposición y frutas fermentadas. Se capturaron 284 individuos de 44 especies pertenecientes a las familias Nymphalidae (S=38) Papilionidae (S=3), Pieridae (S=1) y Riodinidae (S=2). Según el tipo de hábitats, las especies más abundantes fueron *Pierella luna lesbia* y *Heliconius erato venus* en el hábitat de bosque conservado; *Pierella luna lesbia*, *Heliconius erato venus* y *Colobura dirce* en el bosque secundario, y *Anartia jatrophae*, *Heliconius erato venus* y *Anartia amathea* en el hábitat de intervención permanente. En los hábitats de bosque conservado y bosque secundario se registró un 62 % de similitud en cuanto a la composición y la estructura de las especies de mariposas, lo cual no ocurrió en el hábitat de intervención permanente. De las 44 especies reportadas en este estudio, 25 constituyen nuevos registros para la localidad de Pacurita, siendo la familia Nymphalidae la predominante. Las especies *P. luna lesbia*, *A. jatrophae*, *H. erato venus*, *A. demophon muson* y *S. magdalena cleove* fueron las mejor representadas, aunque con cambios en su abundancia según el tipo de hábitat. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras claves: Biondicadores; Riqueza; Chocó biogeográfico; Conservación; Incidencia de hábitat; Nymphalidae.

The diversity of butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea) associated with three habitats in Pacurita, Quibdó municipality, Chocó, Colombia

Abstract

We determined the diversity of butterflies associated with three habitats with different level of conservation in the village of Pacurita, Quibdó, Chocó, Colombia. For the capture of butterflies during 38 days of sampling between the months of July and December 2016, an entomological network and six Van Someren-Rydon traps baited with decaying fish and fermented fruits were used. A total of 284 individuals of 44 species were captured, from the families Nymphalidae (S=38), Papilionidae (S=3), Pieridae (S=1), and Riodinidae (S=2). The most abundant species were *Pierella luna lesbia* and *Heliconius erato venus* in the preserved forest; *Pierella luna lesbia*, *Heliconius erato venus*, and *Colobura dirce* in the secondary forest, and *Anartia jatrophae*, *Heliconius erato venus*, and *Anartia amathea* in the habitat of permanent intervention. In the preserved and secondary forests, there was a 62% similarity in the composition and structure of butterfly species, but not so in the permanent intervention habitat. Out of the 44 species reported in this study, 25 constitute new species records for Pacurita locality; the Nymphalidae family was the predominant one. The species *P. luna lesbia*, *A. jatrophae*, *H. erato venus*, *A. demophon muson*, and *S. magdalena cleove* were the best represented despite experiencing changes in their abundance according to the type of habitat. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Bioindicators; wealth; Chocó biogeographical region; conservation; incidence over habitats; Nymphalidae.

*Correspondencia:

Victor Danilo Palacios-Mayoral, danielopalaciosmayoral@gmail.com

Recibido: 18 de enero de 2018, Aceptado: 9 de agosto de 2018, Editor: Elizabeth Castañeda

Introducción

Los lepidópteros (mariposas y polillas) comprenden el segundo orden de insectos en cuanto a diversidad, con 157,424 especies descritas (Van Nieuwerkerken, *et al.*, 2011), de las cuales cerca del 11,5 % corresponde a las mariposas diurnas (Papilionoidea). En la región neotropical el número de especies de mariposas reconocidas, uno de los grupos de insectos más estudiados, continúa incrementándose (Gaviria-Ortiz & Henao-Bañol, 2011; Fratello, *et al.*, 2015; Willmott, *et al.*, 2017) como resultado de las investigaciones en sitios poco estudiados y de la utilización de nuevas técnicas en la delimitación de las especies (Willmott, *et al.*, 2017). Entre los países que conforman la región neotropical, Colombia se destaca por ocupar el segundo lugar después de Perú en términos de riqueza de mariposas, con 3.272 especies, de las cuales solo un 15,3 % aproximadamente se han reportado en el Chocó biogeográfico colombiano (Andrade, *et al.*, 2007).

Las mariposas diurnas son un componente importante de la diversidad de insectos en nuestro país por su gran riqueza y diversidad, la fácil observación y manejo en campo, la estabilidad espacio-temporal, una taxonomía bien documentada, la amplitud de ocupación de hábitats y rangos geográficos, la fidelidad ecológica, la fragilidad frente a perturbaciones mínimas y su corta temporalidad generacional, factores que se han consideradas importantes biondicadores del estado de conservación de los ecosistemas (Kremen, *et al.*, 1993; Andrade, 1998; Fagua, *et al.*, 1999; Valencia, *et al.*, 2005). Además, son organismos sensibles a los cambios de temperatura, el microclima, la humedad y el nivel de luminosidad, aspectos que cambian con la alteración de los ecosistemas (Kremen, *et al.*, 1993). Además de estos atributos, las mariposas también presentan una gran especificidad ecológica frente a sus plantas hospederas y nutricias (Camero, *et al.*, 2007), hecho que ha llevado a diversos investigadores a aseverar que la pérdida de cobertura boscosa afecta la diversidad de las mariposas diurnas (Brown & Freitas, 2000; Brown & Freitas, 2002; Huertas & Ríos, 2006).

En el país se han realizado varios estudios sobre la diversidad de las mariposas diurnas (Prieto & Constantino, 1996; Fagua, *et al.*, 1999; García, 2008; Vargas-Zapata, *et al.*, 2011; Boom-Urueta, *et al.*, 2013; Marín, *et al.*, 2014), los cuales han acotado diferentes temáticas. Asimismo, investigaciones realizadas en el departamento del Chocó (Ruiz, 2009; González-Valencia, 2012; Salazar-Maya, 2012; Vargas & Salazar, 2014), han derivado en la documentación de la riqueza en la zona centro, la cual se estima, a la fecha, en aproximadamente 470 especies de mariposas diurnas, es decir, el 14,3 % de las especies reportadas para Colombia (Andrade, *et al.*, 2007).

Son manifiestos los avances logrados en la documentación de la riqueza de mariposas en la región chochoana, especialmente en estudios como el de González-Valencia (2012), quien evaluó la riqueza asociada a un gradiente de

perturbación en el corregimiento de Pacurita, zona que, a pesar de ser parte integral del corredor de conservación Tumbes-Chocó-Magdalena (Myers, *et al.*, 2000), presenta problemas de perturbación debidos al desarrollo de actividades humanas (tala selectiva de madera, extracción de metales como oro y platino, etc.). Las mariposas se ven afectadas por dicha situación y constituyen un grupo de insectos que permite evaluar las dinámicas ecológicas de los ecosistemas (Andrade, 1998; Valencia, *et al.*, 2005). En este sentido, el uso del suelo en la zona de estudio, así como su heterogeneidad ambiental y las variaciones en la arquitectura de la vegetación, exige sumar esfuerzos de vigilancia y de documentación de la riqueza de mariposas en hábitats con diferentes estados de conservación. Bajo esta premisa, el objetivo del presente estudio fue determinar la diversidad de mariposas diurnas asociadas a tres hábitats en el corregimiento de Pacurita.

Metodología

Área de estudio. El trabajo se desarrolló en el corregimiento de Pacurita, el cual está ubicado sobre la margen izquierda del río Cabí, a 5° 41' 1.7" N y 76° 35' 49,6" O (municipio de Quibdó) y a 37 m de elevación; tiene una extensión de 180 Km² y presenta selvas moderadamente alteradas por pequeñas perturbaciones naturales (caída de árboles y ramas) y antrópicas (tala selectiva de maderas finas y minería). Esta zona pertenece a la pluvisilva del Chocó biogeográfico colombiano, localizada en el occidente del país, en el valle del río Atrato, departamento del Chocó. Comprende los municipios de Atrato, Bojayá, Lloró, Istmina, Quibdó, Medio Atrato y Unión Panamericana (Bechara-Escudero & Jiménez-Ortega, 2009). La zona presenta una temperatura megatermal (25,7 a 27,9 °C), precipitación de hasta 13.670 mm y un balance hídrico entre perhúmedo y superhúmedo (248,9 a 385,8) (Poveda, *et al.*, 2004). Desde el punto de vista de la conservación, forma parte integral del corredor de conservación Chocó-Manabí, la zona más importante en términos de biodiversidad de la ecorregión terrestre prioritaria (ETP) de Tumbes-Chocó-Magdalena, reconocida mundialmente como una de las de mayor diversidad biológica, hábitat de muchas especies únicas de flora y fauna (Critical Ecosystem Partnership Fund-CEPF, 2002).

Con base en el nivel de intervención en el área de estudio, se establecieron las siguientes tres zonas de muestreo en el corregimiento de Pacurita (Figura 1): una en un hábitat de bosque conservado, es decir, ubicada en un bosque natural no intervenido; una en un hábitat de bosque secundario que incluía sitios con predominio de crecimiento secundario después de aproximadamente 20 años de haber sido aprovechada para extracción de madera, oro y platino (conocida también como de crecimiento secundario), y una en un hábitat de intervención permanente, caracterizado por presentar parches de bosque con claros, especies de árboles con baja cobertura, rastrojos, áreas de cultivos y árboles frutales: papaya (*Carica papaya*), limón (*Citrus limon*),

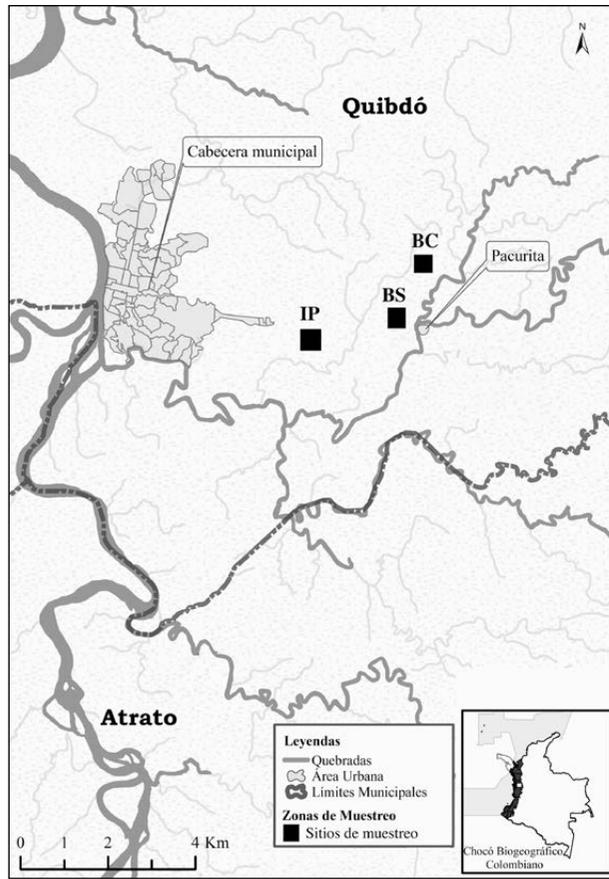


Figura 1. Localización geográfica de tres hábitats en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó, Chocó. BC: bosque conservado; BS: bosque secundario; IP: intervención permanente

milpesos (*Oenocarpus bátava*), guayaba (*Psidium guajava*) guamo (*Inga edulis*), paco (*Gustavia superba*), y yarumo uva (*Cecropia peltata*) (Quinto-Mosquera, et al., 2013).

Métodos de captura y determinación taxonómica de las mariposas. En cada hábitat se delimitó una parcela de 500 m de largo por 250 m de ancho, donde se capturaron las mariposas aplicando una combinación de técnicas de captura según las descritas por Villarreal, et al. (2004) y González-Valencia (2012), con algunas variaciones. Se emplearon seis trampas Van Someren-Rydon (VSR) instaladas en línea recta a una distancia de 50 m una de otra y colgadas en árboles a tres metros del suelo entre las 6:00 y las 18:00 horas durante 38 días. En cada trampa se pusieron cebos con atrayentes como pescado en descomposición y frutas fermentadas: banano (*Musa paradisiaca*, Linnaeus 1753), borojó (*Alibertia patinoi* Cuatrecasas 1949), lulo (*Solanum quitoense*, Lamarck 1794), guayaba (*Psidium guajava*, Linnaeus 1753) y mango (*Mangifera indica*, Linnaeus 1753). Las trampas se revisaban cada hora. Además, se empleó una red entomológica durante el mismo periodo de exposición de las trampas según las indicaciones de Villarreal, et al. (2004), con algunas modificaciones, es decir durante ocho (8) horas diarias (cuatro en la mañana y cuatro en la tarde).

Los especímenes capturados con estos métodos se sacrificaron mediante presión digital en el tórax (Neild, 1991) y se preservaron en sobres de papel milano, rotulado previamente con los datos de la captura (método de captura, hora y fecha, tipo de hábitat y recolector), siguiendo los protocolos descritos por Andrade, et al. (2013). Posteriormente fueron tratados en el laboratorio del Grupo de Investigación en Manejo y Gestión de la Vida Silvestre del Chocó, donde se hizo la extensión alar en cada individuo para luego identificarlo.

La determinación taxonómica de los ejemplares se hizo con base en claves y guías ilustradas especializadas (Andrade, 1990; Andrade, et al., 2007; García-Robledo, et al., 2002; Valencia, et al., 2005; D'Abbrera, 2006; Warren, et al., 2013), con ayuda de especialistas y mediante el contraste con el material de referencia de la colección entomológica de la Universidad Tecnológica del Chocó.

Análisis estadístico. Se graficaron las curvas de acumulación de especies de cada hábitat estudiado con base en el esfuerzo de muestreo como lo recomiendan Gotelli & Colwell (2001): al graficar, en el eje X se representa la acumulación de unidades de esfuerzo, por lo que la curva que se genera corresponde a la acumulación de nuevas especies en función del aumento del esfuerzo. Cada gráfica está compuesta de una curva de las especies observadas y curvas a partir de los diferentes estimadores de riqueza, calculados con el programa Estimates 9.1 (Colwell©, 2016), con una aleatorización de 100 iteraciones para crear curvas suavizadas y eliminar posibles errores debidos al orden de las muestras y la heterogeneidad ambiental (Colwell & Coddington, 1994; Moreno & Halffter, 2000). Se tuvieron en cuenta los estimadores de riqueza Chao 1 y Jack 1, los cuales usan algoritmos que predicen la diversidad esperada (Moreno, 2001). Debido a la desigualdad de las muestras se hizo una curva de rarefacción para estandarizar los muestreos y así poder hacer comparaciones (Moreno, 2001).

Se evaluó la similitud entre los hábitats mediante un análisis de similitudes (*analysis of similarities*, ANOSIM) y de agrupamiento de Bray-Curtis, escogido por ser uno de los métodos más ampliamente utilizados y de mayor confiabilidad para la comparación de comunidades (Bloom, 1981).

Resultados

Se registraron 284 individuos, con un esfuerzo de muestreo total de 3.040 horas/trampas (2.736 horas/trampas Van Someren-Rydon (VSR) y 304 horas/red -hombre), para un éxito de captura de 0,2840 individuos/horas/trampas y red entomológica (Tabla 1). El total de los registros comprendió cuatro familias, 11 subfamilias y 44 especies, de las cuales *Pierella luna lesbia* (n=56), *Anartia jatrophae* (n=36), *Heliconius erato venus* (n=31), *Archaeoprepona demophon muson* (n=14), *Stalachtis magdalena cleove* (n=13), *Colobura dirce* (n=11), *Pierella helvina hymettia* (n=11) y *Heliconius hecale melicerta* (n=10) fueron las más abundantes. La familia con mayor número de especies fue

Tabla 1. Esfuerzo y éxito de captura en tres hábitats en el corregimiento de Pacurita, Quibdó, Chocó, Colombia. BC: bosque conservado, BS: bosque secundario; IP: intervención permanente

Hábitats	Esfuerzo de muestreo (horas-trampa y horas-red/hombre)	Individuos capturados (n)	Éxito de captura (individuos/horas-trampa y red)
BC	1200	88	0,0733
BS	1040	119	0,1144
IP	800	77	0,0963
Total	3040	284	0,2840

la Nymphalidae, con 38 especies (n=264) equivalentes al 93 % de las capturas; las familias Papilionidae, Riodinidae y Pieridae tuvieron poca representatividad, con tan solo tres, dos y una especie, respectivamente. Asimismo, las subfamilias Satyrinae, con 11 especies, y Nymphalinae y Heliconiinae, con seis especies cada una, fueron las más abundantes y predominantes en los tres hábitats (Tabla 2, Figura 2).

Representatividad de los muestreos de mariposas en los tres hábitats estudiados. Las curvas de acumulación de especies para los tres hábitats no mostraron una asíntota en el número de especies capturadas, lo que sugiere que se requieren más muestreos para documentar una mayor cantidad de muestras y aumentar el número de especies de mariposas reportadas para los tres hábitats muestreados en el corregimiento de Pacurita, zona centro de la selva pluvial tropical del Chocó (Figura 3). Al estandarizar el esfuerzo de muestreo en los hábitats a partir de la curva de rarefacción con base en un número de 10 unidades de muestreos comparables, se estableció que el hábitat de bosque conservado arrojó el menor número de especies, mientras que los hábitats de bosque secundario e intervención permanente presentaron la mayor riqueza de especies (Figura 4).

Con esfuerzos de muestreo diferentes, se encontró que el hábitat de bosque secundario presentó la mayor abundancia y riqueza de especies (n=119, s=28) pertenecientes a 10 subfamilias y tres familias); las especies predominantes fueron *P. luna lesbia*, *H. erato venus*. En el hábitat de bosque conservado se capturaron 88 individuos agrupados en 24 especies de mariposas, 10 subfamilias y dos familias. Las especies predominantes en este hábitat fueron *P. luna lesbia*, *H. erato venus*, *A. demophon muson*, en tanto que en el hábitat de intervención permanente se capturaron 77 individuos agrupados en 16 especies, nueve subfamilias y tres familias. *Anartia jatrophae*, *H. erato venus* y *A. amathea* fueron las especies más predominantes en este hábitat (Tabla 2).

Según el índice de Bray-Curtis, se presentó una similitud del 62 % entre los hábitats de bosque conservado y bosque secundario, a diferencia del hábitat de intervención permanente que fue el hábitat más disímil, con tan solo un 18 % de especies compartidas (Figura 5). El hábitat de bosque conservado presentó ocho especies exclusivas, seguido por el hábitat de intervención permanente, con siete especies, y, por último, el hábitat de bosque secundario con

seis especies (Tabla 1). De las 44 especies capturadas en este estudio, solo tres se encontraron simultáneamente en los tres hábitats: *Adelpha boeotia boeotia* (C. Felder & R. Felder, 1867), *C. dirce* (Linnaeus, 1758) y *H. erato venus* (Staudinger, 1882) (Tabla 2).

Discusión

Los datos obtenidos en esta investigación permiten inferir que con el esfuerzo de muestreo y los dos métodos empleados, se logró la documentación de 44 especies de mariposas diurnas, que corresponden al 40,7 % de las especies reportadas por **González-Valencia** (2012) para tres hábitats con diferentes grados de perturbación en el corregimiento de Pacurita.

La mayor diversidad de la familia Nymphalidae en los tres hábitats estudiados concuerda con lo reportado por otros autores (**Prieto & Constantino**, 1996; **Fagua, et al.**, 1999; **Campos & Andrade**, 2007; **Ruiz**, 2009; **Orozco, et al.**, 2009; **González-Valencia**, 2012; **Salazar-Maya**, 2012; **Boom-Urueta, et al.**, 2013; **Vargas & Salazar**, 2014). Esta mayor representatividad puede estar relacionada con el hecho de que dicha familia presenta el mayor número de subfamilias, géneros y especies de mariposas diurnas (**Campos & Andrade**, 2007). Sumado a esto, la riqueza de Nymphalidae también se puede atribuir a la alta disponibilidad de plantas hospederas de las familias *Arecaceae*, *Maranthaceae* y *Heliconiaceae* en la región del Chocó (**Palacios & Constantino**, 2006), apreciación que compartimos, al ser esta familia una de las de mayor presencia en los hábitats donde se desarrollaron nuestros muestreos. Además, Nymphalidae posee cerca del 31 % de especies de mariposas diurnas del Neotrópico y el 30 % de las especies reportadas para Colombia (**Lamas**, 2000).

La baja representatividad de especies de mariposas en las otras familias, en particular la Papilionidae, puede deberse a la escasez de plantas hospederas de las familias *Aristolochiaceae* (**Prince-Chacón, et al.**, 2011), a lo cual se sumarían los posibles sesgos en las capturas debido a la coloración opaca que presentan la mayoría de especies de la familia Riodinidae, las cuales se ocultan en el follaje del sotobosque y en el borde de bosque, y a que algunas de sus especies habitan en las partes altas del dosel y pasan desapercibidas (**García-Robledo, et al.**, 2002; **Campos-Salazar & Andrade**, 2007).

Tabla 2. Composición taxonómica de mariposas diurnas (Papilionoidea) en tres hábitats en el corregimiento de Pacurita, Quibdó, Chocó, Colombia. BC: bosque conservado; BS; bosque secundario; IP: intervención permanente; RD: red entomológica; TVSR: trampas Van Someren-Rydon; n: número de individuos por especies

Familia/Subfamilia/Especie	Hábitats			Métodos de captura		Abundancia	
	BC	BS	IP	RED	TVSR	n	%
Nymphalidae (S=38; n=264)							
Biblidinae (S=3; n=5)							
<i>Catanophele orites</i> (Stichel, 1899)	1	2	0	2	1	3	0,01
<i>Hamadryas</i> sp	1	0	0	1	0	1	0,003
<i>Hamadryas feronia farinulenta</i> (Fruhstorfer, 1916)	0	0	1	1	0	1	0,003
Charaxinae (S=2;N=15)							
<i>Archaeoprepona demophon muson</i> (Fruhstorfer, 1905)	9	5	0	9	5	14	0,049
<i>Memphis pseudiphis</i> (Staudinger, 1887)	0	0	1	1	0	1	0,003
Danaeinae (S=5;N=23)							
<i>Aeria eurimedia</i> ssp.	3	3	0	6	0	6	0,021
<i>Hypoleria lavinia libera</i> (Godman & Salvin, 1879)	0	6	0	6	0	6	0,021
<i>Lycorea cleobaea atergatis</i> (Doubleday,1847)	0	1	1	1	1	2	0,01
<i>Napeogenes stella opacella</i> (Kaye, 1918)	1	6	0	7	0	7	0,024
<i>Oleria amalda amaldina</i> (Haensch, 1909)	1	1	0	2	0	2	0,007
Heliconiinae (S=6;N=50)							
<i>Dryas iulia iulia</i> (Fabricius, 1775)	0	1	1	2	0	2	0,007
<i>Heliconius cydno</i> ssp.	2	0	0	2	0	2	0,007
<i>Heliconius erato venus</i> (Staudinger, 1882)	10	9	12	27	4	31	0,109
<i>Heliconius hecale melicerta</i> (H. Bates, 1866)	0	5	5	9	1	10	0,035
<i>Heliconius hecalesia</i> ssp	0	2	1	1	2	3	0,01
<i>Heliconius</i> sp	0	2	0	1	1	2	0,007
Limnitiidae (S=2;N=5)							
<i>Adelpha</i> sp	0	1	1	0	2	2	0,007
<i>Adelpha boeotia boeotia</i> (C. Felder & R. Felder, 1867)	1	1	1	1	2	3	0,01
Morphinae (S=3;N=9)							
<i>Anthirrhoea tomasia</i> (Butler, 1875)	1	0	0	0	1	1	0,003
<i>Morpho cypris lelargei</i> (Oberthür, 1921)	1	0	0	0	1	1	0,003
<i>Morpho helenor macrophthalmus</i> (Fruhstorfer, 1913)	7	0	0	3	4	7	0,024
Nymphalinae (S=6;N=61)							
<i>Anartia amathea</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	9	9	0	9	0,031
<i>Anartia jatrophae</i> (Linnaeus, 1763)	0	0	36	35	1	36	0,126
<i>Colobura dirce</i> (Linnaeus, 1758)	3	6	2	7	4	11	0,038
<i>Historis acheronta acheronta</i> (Fabricius, 1775)	1	1	0	2	0	2	0,007
<i>Historis odius dious</i> (Lamas, 1995)	0	1	0	0	1	1	0,003
<i>Junonia genoveva</i> (Cramer,1768)	0	0	2	2	0	2	0,007
Satyrinae (S=11;N=96)							
<i>Caligo eurilochus</i> ssp	3	0	0	1	2	3	0,01
<i>Caligo idomeneus</i> ssp.	2	0	0	1	1	2	0,007
<i>Selenophanes josephus excisus</i> (Rothschild, 1916)	2	1	0	0	3	3	0,01
<i>Cithaerias pireta</i> (Stoll, 1780)	2	2	0	4	0	4	0,014
<i>Dulcedo polita</i> (Hewitson, 1869)	0	2	0	2	0	2	0,007
<i>Eryphanis automedon</i> (Cramer, 1775)	0	1	0	1	0	1	0,003
<i>Opsiphanes cassina</i> ssp.	1	6	0	5	2	7	0,024
<i>Pierella helvina hymettia</i> (Staudinger, [1886])	4	7	0	10	1	11	0,038
<i>Pierella luna lesbia</i> (Staudinger, 1887)	25	31	0	46	10	56	0,197
<i>Taygetis laches</i> ssp.	0	0	1	1	0	1	0,003
<i>Tigridia acesta columbina</i> (Neustetter, 1929)	5	1	0	1	5	6	0,021
Papilionidae (S=3; n=4)							
Papilioninae (S=3; n=4)							
<i>Heraclides thoas nealces</i> (Rothschild & Jordan, 1906)	0	2	0	2	0	2	0,007
<i>Parides eurimedes emilius</i> (Constantino, 1999)	0	1	0	1	0	1	0,003
<i>Protesilaus glaucolaus glaucolaus</i> (H. Bates, 1864)	0	0	1	1	0	1	0,003
Pieridae (S=1; n=2)							
Coliadinae (S=1; n=2)							
<i>Phoebis</i> sp	0	0	2	2	0	2	0,007
Riodinidae (S=2; n=14)							
Riodininae (S=2; n=14)							
<i>Necyria</i> sp	1	0	0	0	1	1	0,003
<i>Stalachtis magdalena cleove</i> (Staudinger, 1888)	1	12	0	13	0	13	0,045
Total de individuos	88	119	77	228	56	284	
Total de especies	24	28	16				
Especies exclusivas	8	6	7			21	
Especies compartidas	3	3	3				

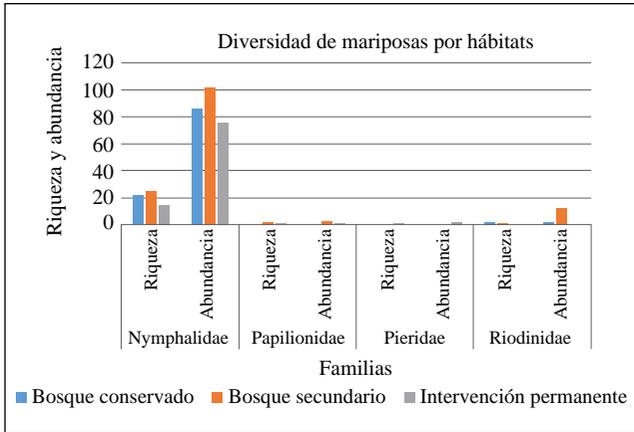


Figura 2. Riqueza y abundancia de mariposas diurnas (Papilionoidea) en tres hábitats con diferente grado de intervención en el corregimiento de Pacurita, Quibdó, Chocó, Colombia

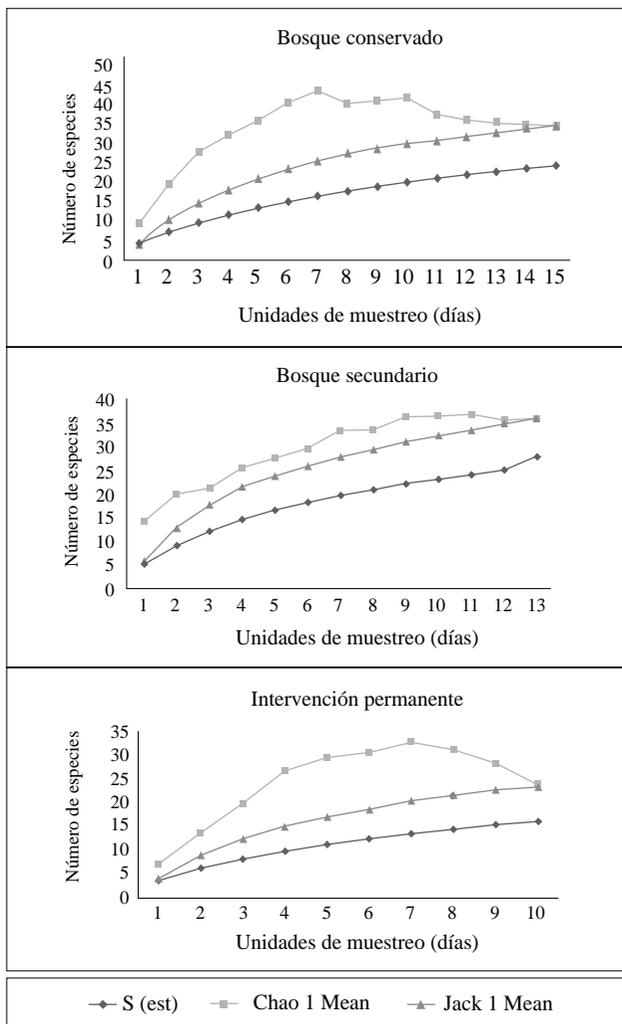


Figura 3. Curvas de acumulación de especies para los tres hábitats de muestreo en bosque conservado (BC), bosque secundario (BS) e intervención permanente (IP) en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó

Aunque los estimadores de riqueza indican la necesidad de sumar más unidades de muestreo, la mayor representatividad de las especies *P. luna lesbia*, *A. jatrophae*, *H. erato venus*, *C. dirce* y *P. helvina hymettia* (Tabla 1), coincide con lo encontrado por **González-Valencia** (2012) y **Salazar-Maya** (2012), quienes las reportan como las especies de mayor abundancia.

En este estudio se reportan 25 especies adicionales a las 108 registradas por **González-Valencia** (2012), lo cual incrementa a 132 el número de especies de mariposas diurnas en la zona, con una coincidencia de apenas 17,6 % de las especies encontradas por esta misma autora (*A. boeotia boeotia* (C. Felder y R. Felder, 1867), *Adelpha* sp., *Aeria eurimedia* ssp., *Caligo eurilochus* ssp., *Caligo idomeneus* ssp., (Cramer, 1775), *Dryas iulia iulia* (Fabricius, 1775), *Eryphanis automedon* (Cramer, 1775), *Hamadryas feronia farinulenta* (Fruhstorfer, 1916), *Hamadryas* sp., *Heliconius cydno* ssp, *Heliconius hecale melicerta* (H. Bates, 1866), *Heliconius hecalesia* ssp., *Heliconius* sp., *Hypoleria lavinia libera* (Godman y Salvin, 1879), *Lycorea cleobaea atergatis* (Doubleday, 1847), *Memphis pseudiphis* (Staudinger, 1887), *Napeogenes stella opacella* (Kaye, 1918), *Necyria* sp.,

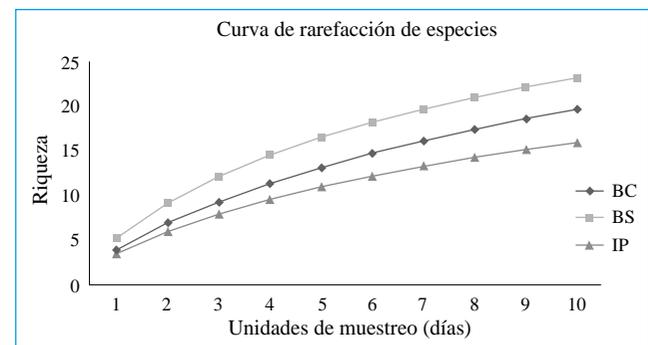


Figura 4. Curva de rarefacción de especies para los tres hábitats de muestreo en bosque conservado (BC), bosque secundario (BS) e intervención permanente (IP) en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó

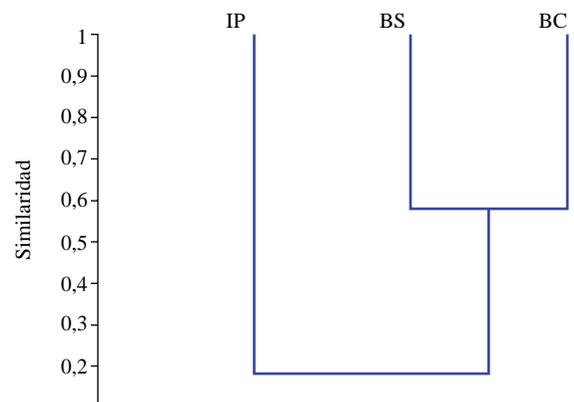


Figura 5. Análisis de similitud en los hábitats de bosque conservado (BC); bosque secundario (BS), e intervención permanente (IP)

Oleria amalda amaldina (Haensch, 1909), *Opsiphanes cassina* ssp., *Phoebis* sp., *Protesilaus glaucolaus glaucolaus* (H. Bates, 1864), *Selenophanes josephus excisus* (Rothschild, 1916), *Taygetis laches* ssp y *Tigridia acesta columbina* (Neustetter, 1929)). Se resalta el hecho de que en estas dos investigaciones los hábitats de bosque conservado y bosque secundario presentaron la mayor similitud.

La abundancia de la especie *Morpho helenor macrophthalmus* en el hábitat de bosque conservado puede relacionarse con su vuelo a la altura del dosel de bosques y bordes de bosques poco intervenidos (Andrade, et al., 2007). El predominio de la especie *P. luna lesbia* en los hábitats de bosque conservado y bosque secundario, se puede atribuir a su pertenencia a la tribu *Haeterini* (Satyrinae: Nymphalidae), que presenta especies que vuelan a ras del suelo y a baja altura en caminos sombreados, selvas y bosques tropicales, y se les considera indicadores ecológicos ideales (Constantino, 1995).

La abundancia de las especies *A. jatrophae* y *A. amatheia* en el hábitat de intervención permanente, se asocia a que pueden colonizar varios hábitats, por lo cual no se las considera buenas indicadores del estado de conservación de los bosques (Campos-Salazar, et al., 2011); estas, además, se encuentran en áreas transformadas y perturbadas por el uso del suelo para pastoreo y la presencia de espacios abiertos como bordes de bosque (Vargas-Zapata, et al., 2011). Además, son especies calificadas como indicadores de hábitats en intervención permanente (Árias & Huertas, 2001; Valencia, et al., 2005).

La presencia de *C. dirce* en los tres hábitats posiblemente se relaciona con su vuelo asociado a variedad de hábitats: bosques secundarios, claros de bosque, bordes de quebrada y bordes de bosque (Valencia, et al., 2005, Instituto Nacional de Biodiversidad-INBio Web, 2008). Asimismo, la presencia de *A. boeotia boeotia* se asocia con la amplia distribución neotropical del género *Adelpha*, cuyas especies frecuentan variedad de hábitats como bosques primarios, bosques húmedos, hábitats no perturbados y antropogénicos, por lo que se las considera indicadores de la calidad de los ecosistemas, siendo útiles en estudios de conservación y diversidad (Domínguez-Puerta, 2016).

El hallazgo de *H. erato venus* y su abundancia en los tres hábitats estudiados sugiere que la especie es tolerante a cambios en la arquitectura de la vegetación derivados de las condiciones ambientales. Vargas-Zapata, et al. (2012) señalan que los periodos de mayor precipitación y de cambios constantes en la temperatura favorecen la floración de las plantas y proporciona una mayor oferta alimenticia a las mariposas, lo cual incide en el establecimiento de especies del género *Heliconius*. A pesar de que los miembros de este género presentan alta especificidad ecológica, frecuentan áreas abiertas y bosques secundarios (Hay-Roe, 2008).

En las curvas de acumulación se evidenció la falta de registros de nuevas especies (Figura 3), lo cual coincide con lo señalado por González-Valencia (2012) en el sentido de

que las curvas de acumulación de especies no alcanzaron la asíntota para tres zonas en un gradiente de perturbación en el corregimiento de Pacurita (Quibdó), selva pluvial central del Chocó, Colombia.

Conclusiones

Las 44 especies reportadas en este estudio representan un porcentaje bajo de la riqueza estimada, según lo sugerido por los estimadores de riqueza, aunque se adicionaron 25 nuevos registros de especies para la localidad de Pacurita. Sin embargo, dada la heterogeneidad ambiental de esta zona, su riqueza de mariposas está aún subestimada.

Las especies *P. luna lesbia*, *A. jatrophae*, *H. erato venus*, *A. demophon muson* y *S. magdalena cleove* fueron las mejor representadas a pesar de que su abundancia reflejó cambios según el tipo de hábitat. Por otra parte, la familia Nymphalidae se reconoció como la más predominante, registrando una gran diversidad y el mayor número especies.

El aumento de zonas abiertas puede estar afectando la riqueza de mariposas, en tanto que las zonas más conservadas mantendrían la riqueza de especies en términos de su composición y estructura, lo que contrasta con la mayor similitud entre los hábitats de bosque conservado y bosque secundario.

Agradecimientos

Los autores expresamos los más sinceros agradecimientos al equipo de colaboradores del Grupo de investigación en Manejo y Gestión de la Vida Silvestre del Chocó por su apoyo logístico para el desarrollo de esta investigación; a la comunidad de Pacurita por su hospitalidad al permitirnos realizar el levantamiento de información en campo; al curador de la colección entomológica de la Universidad Tecnológica del Chocó, Leyser Rengifo Murillo, por sus aportes en el proceso curatorial de los ejemplares, y a Efraín Reinel Henao Bañol por su colaboración en la identificación de los especímenes.

Contribución de los autores

Víctor Danilo Palacios-Mayoral: revisión de la literatura, toma de datos en campo, preservación y montaje de mariposas en el laboratorio, identificación taxonómica, análisis estadísticos, redacción del manuscrito, proceso editorial. Leison Palacios-Mosquera: toma de datos en campo, revisión de la literatura, análisis de datos, redacción del manuscrito, proceso editorial. Alex Mauricio Jiménez-Ortega: análisis de datos, redacción del manuscrito

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias

- Andrade, M.G. (1990). Clave para las familias y subfamilias de Lepidóptera: Rhopalocerca de Colombia. *Caldasia*. **16**: 539-550.
- Andrade, M.G. (1998). Utilización de mariposas como biondicatoras del tipo de hábitats y su biodiversidad en Colombia. *Rev. Acad.Colomb. Cienc.* **22** (84): 407-421.

- Andrade, M.G., Campos-Salazar, L.R., González-Montaña, L.A., Pulido-B, H.W.** (2007). Santa María mariposas alas y color. Serie de Guías de Campo del Instituto de Ciencias Naturales No. 2. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia. p. 248.
- Andrade, M.G., Henao-Bañol, E.R., Triviño, P.** (2013). Técnicas y procesamiento para la recolección, preservación y montaje de Mariposas en estudios de biodiversidad y conservación. (Lepidóptera: Hesperioidea – Papilionoidea). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **37** (144): 311-325.
- Arias, J.J. & Huertas-H.B.C.** (2001). Mariposas diurnas de la Serranía de los Churumbelos, Cauca. Distribución altitudinal y diversidad de especies (Lepidóptera: Rhopalocera: Papilionoidea). Revista Colombiana de Entomología. **27** (3-4): 106-109.
- Bechara-Escudero, M. & Jiménez-Ortega, A.M.** (2009). Dieta entomofágica en una población de *Rinella marina* en la selva pluvial central, Chocó, Colombia. Investigación, Biodiversidad y Desarrollo. **28** (2): 216-21.
- Bloom, S.A.** (1981) Similarity indices in community studies: potential pitfalls. Marine Ecology Progress Series. **5**: 125-128.
- Boom-Urueta, C., Seña-Ramos, L., Vargas-Zapata, M., Martínez-Hernández, N.** (2013). Mariposas Hesperioidea y Papilionoidea (Insecta: Lepidóptera) en un fragmento de bosque seco tropical. Atlántico, Colombia. Bol.Cient. Mus. Hist. Nat. **17** (1):149-167.
- Brown, K.J. & Freitas, L.A.V.** (2000). Atlantic forest butterflies: Indicators for Landscape Conservation. Biotropica. **32** (4b): 934-956.
- Brown, K.J. & Freitas, L.A.V.** (2002). Butterfly communities of the urban forest fragments in Campinas, Sao Paulo, Brazil: Structure, instability and environmental correlates and conservation. Journal of Insect Conservation. **6**: 217-231.
- Camero, E. & Calderón, A.M.** (2007). Comunidad de mariposas diurnas (Lepidóptera: Rhopalocera) en un gradiente altitudinal del cañón del Río Combeima-Tolima, Colombia. Acta biol. Colomb. **12** (2): 295-110.
- Campos-Salazar, L.N & Andrade-C, M.G.** (2007). Lepidópteros (Mariposas). En: Estudio de la caracterización biológica y ecológica integral, Fase I: diagnóstico, evaluación y planificación del proceso de recuperación, protección y conservación del bosque natural del Agüil en el municipio de Aguachica, y Fase II: formulación del área protectora del Agüil, municipio de Aguachica-Cesar. Rangel-Ch., editor. p. 103-116.
- Campos-Salazar, L.R., Gómez-Bulla, J., Andrade-C, M.G.** (2011). Mariposas (Lepidóptera: Hesperioidea-Papilionoidea) de las áreas circundantes a las ciénagas del Departamento de Córdoba, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 45-60.
- Critical Ecosystem Partnership Funf-CEPF.** (2002). Corredor Chocó-Manabí. Ecorregión (Hotspots) de Biodiversidad del Chocó- Darién-Ecuador Occidental. Hoja de Datos del CEPF. Washington, DC.
- Constantino, L.M.** (1995). Revisión de la tribu Haeterini Herrich-Schaffer, 1864 en Colombia (Lepidoptera: Nymphalidae, Satyrinae). SHILAP Revta. /lepid. **23** (89): 49-76.
- Colwell, R.K. & Coddington, J.A.** (1994). Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. Philosophical Transactions of the Royal Society (Series B). **345**: 101-118.
- Colwell, R.K.** (2016). EstimateS: Biodiversity estimation. Current Version Estimates 9.1.0. Fecha de consulta: entre Junio y diciembre de 2017. Disponible en: viceroy.eeb.uconn.edu/estimates
- D'Abbrera, B.** (2006). World Butterflies. Hill House. Publishers. Melbourne/London. p. 272.
- Domínguez-Puerta, K.L.** (2016). Sistemática y distribución del género *Adelpha* Hübner, [1819] (Lepidoptera: Nymphalidae: Limenitidinae) en Colombia. (MSc). Universidad Nacional. p. 278.
- Fagua, G., Amarillo-S, A.R., Andrade-C, M.G.** (1999). Mariposas (Lepidoptera) como bioindicadores del grado de intervención en la cuenca del Río Pato (Cauquetá). P. 285-315. En: Amat-G, G., Andrade-C, M.G., Fernández, F. (editores). Insectos de Colombia. Volumen II. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras N°13. Bogotá. p. 433.
- Fratello, S.A., Nakahara, S., Brévignon, C.R., Harvey, D.J.** (2015). Two new species of *Euptychia* Hübner, 1818 (Lepidoptera: Nymphalidae: Satyrinae) from the Guiana Shield, with notes on *E. marceli* Brévignon, 2005 and *E. rufocincta* Weymer, 1911. The Journal of the Lepidopterists' Society. **69** (4): 293-306.
- García, J.A.** (2008). Diagnóstico ambiental del relleno sanitario praderas del Magdalena, Girardot (Cundinamarca) empleando mariposas (Lepidóptera: Papilionoidea y Hesperioidea) como indicador de tipo de calidad de hábitat. Revista Tumbaga. **3**: 92-108.
- García-Robledo, C.A., Constantino, L.M., Heredia, M.D., Katan, J.** (2002). Mariposas comunes de la cordillera Central de Colombia. Wildlife Conservation Society, Programa Colombia. Cali, Colombia. p. 130.
- Gaviria-Ortiz, F.G. & Henao-Bañol, E.R.** (2011). Diversidad de mariposas diurnas (Hesperioidea-Papilionoidea) del Parque Natural Regional el Vínculo (Buga-Valle del Cauca). Boletín Científico Museo Historia Natural. **15**: 115-133.
- González-Valencia, E.L.** (2012). Estructura y composición de ensamblaje de mariposas Diurnas (Rhopalocera) en un gradiente de perturbación en la selva pluvial central del Chocó, Colombia. Tesis de Pregrado. Quibdó-Colombia, Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luis Córdoba”. Facultad de Ciencias Básicas. p. 66.
- Gotelli, N.J. & Colwell, R.K.** (2001). Quantifying biodiversity: Procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. Ecology Letters. **4**: 379-391.
- Hay-Roe, M.M.** (2008). Races of *Heliconius erato* (Nymphalidae: Heliconiinae) found on different sides of the Andes show wing size differences. McGuire Center for the Lepidoptera and Biodiversity. Florida Entomologist. **91** (4): 711-712.
- Huertas, B. & Ríos, J.C.** (2006). Estudio de las mariposas diurnas de la serranía de los Yariagués y su conservación (Lepidóptera: Papilionoidea) (en) Huertas, B.C & Donegan, T.M. (Editores.). Proyecto Yaré: Investigación y evaluación de las especies amenazadas de la serranía de los Yariagués, Santander, Colombia. BP Conservation Programme. Colombian EBA Project Report Series. **7**: 44.55.
- Instituto Nacional de Biodiversidad - INBio.** (2008). Servicios de información. Fecha de consulta: octubre de 2008. Disponible en: <http://www.inbio.ac.cr/otus/servicios.html>
- Kremen, C, Colwell, R.K., Erwin, T.L., Murphy, D.D., Noss, R.F. Sanjkayan, M.A.** (1993). Terrestrial arthropod assemblages: Their use in Conservation Planning. Conservation Biology. **7** (4): 796-808.

- Lamas, G.** (2000). Estado actual del conocimiento de la sistemática de los lepidópteros, con especial referencia a la región neotropical. *Monografías Tercer Milenio*. **1**: 253-260.
- Marín, M.A., Álvarez, C.F., Giraldo, C.E., Pycrz, T.W., Uribe, S.I. Vila, R.** (2014). Mariposas en un bosque de niebla andino periurbano en el valle de Aburrá, Colombia. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. **85**: 200-208.
- Myers, N., Mittermeier, R.A., Mittermeier, C.G., Fonseca, G.A.B., Ken D.A.J.** (2000). Biodiversity Hotspots for Conservation Priorities. *Nature*. **403** (24): 853-859.
- Moreno, C.E. & Halffter, G.** (2000). Assessing the completeness of bat biodiversity inventories using species accumulation curves. *Journal of Applied Ecology*. **37**: 149-158.
- Moreno CE.** 2001. Métodos para medir la biodiversidad. M & T- Manuales y Tesis SEA. vol.1. Zaragoza, p. 84.
- Neild, A.F.E.** (1991). The butterflies of Venezuela. Part 1. (Nymphalidae. I. Limetidineae, Apaturinae, Charaxinae). A comprehensive guide to identification of adult Nymphalidae, Papilionidae and Pieridae. Meridian Publications, London, p. 1-144.
- Orozco, S., Muriel, S.B., Palacios, J.** (2009). Diversidad de lepidópteros diurnos en un área de bosque seco tropical del occidente Antioqueño. *Actual Biol.* **31** (90): 31-41.
- Palacios, M. & Constantino, L.M.** (2006). Diversidad de lepidópteros Rhopalocera en un gradiente altitudinal en la reserva natural el pangan, Nariño, Colombia. *Bol.Mus. Ent.Univ.* **10**: 258-278.
- Poveda, I.C., Rojas, C., Rudas, A. Rangel-CH, J.O.** (2004) El Chocó biogeográfico: ambiente físico. In: Rangel-Ch., JO., *Diversidad Biótica IV, El Chocó Biogeográfico/ Costa Pacífica Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.* 1-22.
- Prieto-M, A.D. & Constantino, L.M.** (1996). Abundancia, distribución y diversidad de mariposas (Lep. Rhopalocera) en el río Tatabro, Buenaventura (Valle-Colombia). *Bol. Mus. Ent.Univ. Valle.* **4** (2):11-18.
- Prince-Chacón S., Vargas-Zapata M.V., Salazar J. Martínez-Hernández N.J.** (2011). Mariposas Papilionoidea y Hesperioidea (Insecta: Lepidoptera) en dos fragmentos de bosque seco tropical en corrales de San Luis, Atlántico, Colombia. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa (S.E.A.)*. **48**: 243-252.
- Quinto-Mosquera, J., Moreno-Amud, L.A., Mosquera-Mosquera, S., Mantilla-Meluk, H. Jiménez-Ortega, A.M.** (2013). Cambios en el ensamblaje de murciélagos filostómidos producto de la perturbación en el distrito Alto Atrato-San Juan, Chocó, Colombia. *Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*. **32** (2): 121-32.
- Ruiz, R.C.Y.** (2009). Caracterización taxonómica y ecológica de la comunidad de Lepidópteros Rhopalocera en la Cuenca del río Cabí, Chocó, Colombia. Tesis de postgrado. Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luís Córdoba”, Facultad Ciencias Básicas. p. 48.
- Salazar-Maya, M.C.** (2012). Diversidad de lepidópteros Rhopalocera en un bosque de la selva pluvial central (sector La Platina, Chocó-Colombia) y descripción del ciclo de vida de una especie presente en la zona de estudio. Tesis de Pregrado. Quibdó-Chocó, Universidad Tecnológica del Chocó “Diego Luís Córdoba”, Facultad Ciencias Básicas. p. 95.
- Van Nieuwerkerken, E.J., Kaila, L., Kitching, I.J., Kristensen, N.P., Lees, D.C., Minet, J., Mitter, C., Mutanen, M., Regier, J.C., Simonsen, T.J., Wahlberg, N., Yen, S.-H., Zahiri, R., Adamski, D., Baixeras, J., Bartsch, D., Bengtsson, B.Å., Brown, J.W., Bucheli, S.R., Davis, D.R., De Prins, J., De Prins, W., Epstein, M.E., Gentili-Poole, P., Gielis, C., Hättenschwiler, P., Hausmann, A., Holloway, J.D., Kallies, A., Karsholt, O., Kawahara, A.Y., Koster, J.C., Kozlov, M.V., Lafontaine, J.D., Lamas, G., et al.** (2011). Order Lepidoptera Linnaeus, 1758. In Z.-Q. Zhang (editor.), *Animal biodiversity: An outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness*. *Zootaxa*. **3148**: 212-221.
- Valencia, M., Gil, Z.N. Constantino, L.M.** (2005). Mariposas diurnas de la zona central cafetera colombiana. Guía de campo, Chinchiná (Colombia). *Cenicafe*. p. 244.
- Vargas-CH, J.J., Salazar-E, C.A.** (2014). Biodiversidad y mariposas en una región del alto Chocó, San José del Palmar, Colombia. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas*. **18** (1): 259-284.
- Vargas-Zapata, M.A., Martínez-Hernández, N.J., Gutiérrez-Moreno, L.C., Prince-Chacón, S., Herrera-Colon, L.F.** (2011). Riqueza y abundancia de Hesperioidea y Papilionoidea (Lepidoptera) en la Reserva Natural Las Delicias, Santa Marta, Magdalena, Colombia. *Acta Biol. Colomb.* **16** (1): 43-60.
- Vargas-Zapatás, M.A, Prince-Chacón, S., Martínez-Hernández, N.J.** (2012). Estructura poblacional de *Heliconius erato* Hewitson, 1867 (Lepidoptera: Nymphalidae) en la reserva campesina la montaña (RCM), departamento del Atlántico, Colombia. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa (S.E.A.)*. **51**: 273-281.
- Villarreal, H., Álvarez, H.M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña, A.M.** (2004). Insectos. En: *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Bogotá (Colombia): Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. p. 151-183.
- Warren, A.D., Davis K.J., Stangeland, E.M., Pelham, J.P., Grishinn, V.** (2013). *Illustrated List of American Butterflies*. [20- VII- 2013].
- Willmott, K. R., Simon, M. J., Ortiz-Acevedo, E., Hall, J.P.** (2017). First record of the enigmatic tribe Anaeomorhini (Lepidoptera, Nymphalidae, Charaxinae) outside of the Amazon basin: A new species of *Anaeomorpha* Rothschild, 1894, from the Chocó region of western Ecuador. *Publicación Insecta Mundi*. **0548**: 1-10.

Dinámica temporal de la riqueza de especies y la abundancia de mariposas frugívoras (Lepidoptera: Nymphalidae) en la sabana inundable del municipio de Arauca (Colombia)

©Juan Carlos Agudelo-Martínez*, ©Evelin María Gómez-Tapia, ©Néstor Pérez-Buitrago

Universidad Nacional de Colombia, Sede Orinoquia, Arauca, Colombia

Resumen

El orden Lepidoptera es uno de los taxones más diversos y conocidos de insectos. Sin embargo, hay aspectos ecológicos de este grupo que se han investigado poco en la Orinoquia colombiana. En el estudio se documenta la dinámica temporal de la riqueza y la abundancia de mariposas frugívoras en la sabana inundable del municipio de Arauca y su relación con las variables climáticas de temperatura y precipitación. El muestreo se realizó a 9 km de la cabecera municipal de Arauca, usando seis trampas Van Someren Rydon durante cinco días al mes a lo largo de 24 meses. Se registraron 227 individuos de 21 especies. Los estimadores no paramétricos de diversidad indicaron que el muestreo tuvo una representatividad de 87,9 a 91,2 % de las mariposas frugívoras del área. Los análisis de agrupamiento y de similitudes (ANOSIM) indicaron que la respuesta de la comunidad de mariposas corresponde al régimen unimodal de precipitación de la Orinoquia, con mayor riqueza de especies y abundancia durante los meses de lluvia. Se estableció que las temperaturas en los días de muestreo tuvieron un efecto negativo en las tasas de captura. Este trabajo representa la primera aproximación a la dinámica temporal de la riqueza y la abundancia de lepidópteros y su relación con las variables climáticas en el norte de la Orinoquia colombiana. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Estacionalidad; Mariposas diurnas; Orinoquia; Biodiversidad.

Temporal dynamics of species richness and abundance of fruit-feeding butterflies (Lepidoptera: Nymphalidae) in the flooding savannas of Arauca (Colombia)

Abstract

The insect order Lepidoptera is one of the most diverse and well known. However, the ecological aspects of this group in the Colombian Orinoquia have been poorly investigated. In this study, we documented the temporal dynamics of species richness and abundance of fruit-feeding butterflies in the flooded savanna of the municipality of Arauca. These temporal dynamics were related to the climatic variables of temperature and precipitation. The study was conducted near the town of Arauca (9 km). We sampled for five days per month for 24 months. We captured 227 butterflies from 21 species representing between 87.9 % and 91.2 % of fruit-feeding butterflies in the study area as shown by the non-parametric estimators of diversity. Cluster and ANOSIM analyses evidenced a positive relationship with rainfall resulting in greater species richness and abundances during the rainy season. There was a negative correlation between the temperatures during sampling days and the number of butterflies captured. This study is the first approach to the temporal dynamics of the richness and abundance of Lepidoptera and their relationship with climatic variables in the northern Colombian Orinoquia. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Seasonality; Diurnal butterflies; Orinoquia; Biodiversity.

Introducción

El estudio de las interacciones entre los organismos y los factores abióticos es una de las preguntas fundamentales de la ecología (Odum, 1959; Chapin, *et al.*, 1997). Actualmente, muchos científicos adelantan proyectos encaminados a entender dichas interacciones; en el Neotrópico algunas instituciones como la Organización de Estudios Tropicales, el Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura (INPA) y el Instituto Smithsonian los promueven por su

importancia para la comprensión de la biodiversidad con fines de conservación, para determinar los valores que los ecosistemas proveen e, incluso, para el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en las adaptaciones que los organismos han desarrollado frente al entorno (Godfaurd, *et al.*, 2005).

*Correspondencia:

Juan Carlos Agudelo-Martínez; jcagudelo@gmail.com

Recibido: 15 de junio de 2018

Aceptado: 21 de agosto de 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

En Colombia los estudios ecológicos son relativamente pocos, en parte porque las políticas nacionales de investigación que rigen para las instituciones gubernamentales establecen que esta debe proveer beneficios inmediatos a la sociedad (**Departamento Nacional de Planeación-DNP**, 2014). Además, la megadiversidad del país ha implicado que gran parte de la comunidad científica encamine sus esfuerzos a documentar la riqueza de especies mediante listados de presencia y ausencia de especies en los ecosistemas colombianos (**Arbeláez-Cortes**, 2013; **Mittermeir, et al.**, 1997). Por razones históricas, los estudios ecológicos en Colombia se han concentrado en la región Andina y la costa Caribe, donde se concentran la población general y de académicos del país, así como en la Amazonia, por su mayor visibilidad y la importancia del bosque húmedo tropical (**Arbeláez-Cortés**, 2013; **Regalado**, 2013). Sin embargo, las regiones del Chocó biogeográfico, una de las zonas más lluviosas del mundo y cuya diversidad de especies todavía está por documentarse, y la Orinoquia, con su aparente simpleza estructural (predominantemente sabanas), se han estudiado poco desde la perspectiva ecológica (**Arbeláez-Cortés**, 2013). Una de las consecuencias de esta situación es que por décadas los ecosistemas chocoanos y orinoquenses se han visto expuestos a la explotación de los recursos naturales con poco control o cautela, al margen del sentido común, de las leyes vigentes y del conocimiento científico (**Peña-Pirazán**, 2003). En el caso de la Orinoquia, la perspectiva es que sus paisajes seguirán expuestos a transformaciones drásticas a causa de la deforestación asociada con la explotación de hidrocarburos, la minería legal e ilegal, y la agricultura y la ganadería extensivas, marcando, así, un precedente nefasto para una región donde el estado del conocimiento de los procesos ecológicos y de los patrones de la diversidad son escasos (**Agudelo & Pérez-Buitrago**, 2015; **Romero-Ruiz, et al.**, 2011; **Sánchez-Cuervo & Aide**, 2013). La Orinoquia colombiana es considerada como una de las últimas áreas silvestres (**Rivas, et al.**, 2002; **Salinas**, 2011), y, a pesar de ser el resultado de una larga historia de interacciones e interdependencia entre la naturaleza y las sociedades indígenas y, más recientemente, de los colonos, ha sido reconocida por el Fondo Mundial para la Conservación de la Naturaleza como uno de los ocho ecosistemas estratégicos para la humanidad (**Correa, et al.**, 2005) y un punto caliente de biodiversidad (**Lasso, et al.**, 2011). Paradójicamente, la Orinoquia no tiene unidades de conservación (es decir, parques naturales, o reservas estatales o privadas) que representen la diversidad de ecosistemas de la región (**Sánchez-Cuervo & Aide**, 2013), lo que, sumado al desconocimiento de su biodiversidad, las interacciones ecológicas y los servicios que proveen sus ecosistemas, conlleva la subestimación de su potencial estratégico y aumenta el riesgo de no poder garantizar su persistencia en el futuro (**Agudelo & Pérez-Buitrago**, 2015). En este contexto, surge la necesidad de promover estudios sobre los ecosistemas de la Orinoquia para fomentar su conocimiento

y fortalecer lo que podría ser una herramienta eficaz para la evaluación a mediano y largo plazo de los procesos de transformación que se llevan a cabo en los ecosistemas de la región (**Correa, et al.**, 2005).

La Orinoquia colombiana constituye el 22 % del país y su paisaje está constituido por un mosaico de ecosistemas, entre ellos bosques, bosques de galería y morichales rodeados en una matriz de sabanas de altillanura y sabanas inundables que ocupan la mayor extensión de la región (**Rippstein, et al.**, 2001). Esa configuración espacial del paisaje obliga a muchos animales a desplazarse entre fragmentos en busca de los recursos que necesitan para suplir sus necesidades vitales (**Forman**, 1997), en tanto que la marcada estacionalidad climática asociada con el régimen de lluvias unimodal genera dinámicas temporales en cuanto a la disponibilidad de los recursos bióticos (refugios en el follaje, alimento) o abióticos (recurso hídrico), lo que, a su vez, podría repercutir en la abundancia y riqueza de las especies en este ecosistema de sabana inundable.

Los lepidópteros cumplen con importantes funciones ecológicas y, además, por su ciclo biológico rápido, especificidad ecológica, taxonomía relativamente estable y facilidad de muestreo e identificación se les considera buenos bioindicadores (**Fagua**, 1999; **Brown**, 1991; **DeVries, et al.**, 1997; **Bonebrake, et al.**, 2010). En este sentido, se plantea la hipótesis de que, dado que los sustratos para la postura de huevos y la dieta de los estadios larvales de muchas mariposas están asociados a la vegetación, y esta a su vez depende del recurso hídrico, existe una respuesta de la comunidad de las mariposas frugívoras asociada con el régimen climático. El objetivo de este estudio fue documentar la dinámica temporal de la riqueza y la abundancia de especies de mariposas frugívoras y su asociación con el régimen climático de la sabana inundable del municipio de Arauca, lo cual aportaría al conocimiento de la comunidad de lepidópteros frugívoros en la zona norte de la región de la Orinoquia colombiana.

Métodos

Área de estudio. El sitio de estudio se ubicó a 9 km de la cabecera municipal de Arauca (Arauca), en el campus de la Sede Orinoquia de la Universidad Nacional de Colombia. El campus tiene 50 hectáreas, de las cuales 1,5 corresponden a edificaciones rodeadas de un paisaje predominantemente compuesto por sabanas inundables y, en menor proporción, terraplenes con bosques secundarios. La altitud es de 128 m, presenta una temperatura media anual de 30 °C, con una humedad relativa promedio de 80 % en la época lluviosa y de 65 % en temporada seca. La precipitación media anual se acerca a los 2.200 mm, con un régimen unimodal que presenta un periodo de lluvias de ocho meses comprendidos desde finales de abril hasta principios de noviembre, cuando cae el 95 % de la lluvia del año, y un periodo seco de cuatro meses desde diciembre hasta marzo (**Rippstein, et al.**, 2001).

Datos climatológicos. Los datos de los parámetros climatológicos se obtuvieron de una estación meteorológica Vantage Pro2 (Davis® Instruments Inc.), instalada en

la sede Orinoquia desde el mes de octubre de 2013. La estación se configuró para transmitir cada hora información de temperatura, precipitación, humedad, velocidad y rumbo del viento, sensación térmica, punto de rocío e índice de calor. A partir de esta información se elaboró un climograma en el que se registraron las temperaturas promedio, máxima y mínima, así como la precipitación mensual. Los datos de clima previos a la instalación de esta estación (mayo de 2013 a septiembre de 2013) se obtuvieron de la que está instalada en el aeropuerto Santiago Pérez Quiroz, localizado a seis km del sitio de estudio.

Muestreo e identificación de especímenes. El muestreo para la recolección de mariposas frugívoras se llevó a cabo usando seis trampas Van Someren-Rydon cebadas con banano en descomposición, que se instalaron durante cinco días cada mes, desde mayo del 2013 hasta abril de 2015 (24 meses). Cada muestreo mensual representó 12 horas por trampa por día, para un total de 1.440 horas/trampa durante todo el estudio. Las trampas se distribuyeron cada 20 metros y se colgaron a una altura promedio de tres metros en los árboles de una cerca viva aledaña a uno de los estacionamientos vehiculares del campus. Las trampas se revisaban y se volvía a poner cebo entre las 16:30 y 17:30 diariamente. Todos los especímenes capturados se recolectaron y almacenaron en sobres, siguiendo la metodología propuesta por Villarreal, *et al.* (2006) y reposan en la Colección Entomológica de la Orinoquia (CEO) de la Sede Orinoquia de la Universidad Nacional. La identificación se llevó a cabo por comparación con diferentes fuentes bibliográficas: Warren, *et al.* (2013), D'Abbrera (1987,1988) y García, *et al.* (2002).

Análisis de los datos. Se emplearon los componentes alfa, beta y gamma de diversidad como una herramienta metodológica que no refleja el concepto espacial para el cual se formularon originalmente (Ricklefs, 2005), pero que permite hacer comparaciones en escalas temporales durante el muestreo, tal como fueron empleados por DeVries, *et al.* (1997) y DeVries & Walla (2001). En este trabajo se consideraron de la siguiente manera: la diversidad alfa hace referencia a la diversidad puntual en cada uno de los meses de muestreo (α'); la diversidad beta hace referencia al recambio de especies entre meses (β'), y la diversidad gama, al total de las especies observadas en los 24 meses de muestreo (γ'). La diversidad β' se calculó mediante la fórmula: $1 - [\log((2a+b+c)/(a+b+c))/\log 2]$ (Lennon, *et al.*, 2001; Koleff, *et al.*, 2003) para cada uno de los pares posibles de meses que presentaban capturas, por lo tanto, se excluyeron los meses de febrero y marzo de 2014 y el mes de marzo de 2015 de este análisis. El cálculo se llevó a cabo usando la librería Vegan (Oksanen, *et al.*, 2016) con el programa estadístico R (R Core Team, 2003). Los resultados del cálculo de la diversidad β' se tomaron como una matriz de distancias y se representaron en un dendrograma usando como método de agrupación el enlace completo mediante la función "hclust" en el programa estadístico R (R Core Team, 2003).

Para documentar y determinar con certeza la riqueza de especies de mariposas durante los meses de muestreo, se proyectaron curvas de acumulación de especies a partir de los estimadores no paramétricos con algoritmos formulados para especies raras (Chao1: Chazdon, *et al.*, 1998), especies únicas y especies duplicadas (Chao2: Colwell & Coddington, 1994), especies únicas y número de muestreos (*Jackknife* de primer orden: Chazdon *et al.*, 1998), especies únicas y duplicadas y el número de muestreos (*Jackknife* de segundo orden: Chazdon, *et al.*, 1998), y análisis basados solo en la presencia o la ausencia (*Bootstrap*: Chazdon, *et al.*, 1998). Estos estimadores se calcularon en el programa EstimateS 9.1.0 (Colwell, 2013).

Para la comparación de las temporadas, se hizo un análisis de similitud (ANOSIM) usando cada una de las temporadas climáticas como grupo. En este análisis se obtiene una prueba de significación entre los grupos con base en el cálculo de una matriz de distancias convertidas en rangos de las medidas obtenidas, en lugar de trabajar con las medidas de riqueza y abundancia obtenidas en cada uno de los meses (Clarke, 1993). En este se utilizó la función "anosim" de la librería Vegan (Oksanen, *et al.*, 2016) ejecutada mediante el programa estadístico R (R Core Team, 2003).

Para relacionar la abundancia y la riqueza de especies con los factores climáticos se usó la correlación de Spearman, específicamente con los parámetros de temperatura mínima, temperatura máxima y temperatura media, considerando únicamente las horas de sol (6:00 am – 6:00 pm) durante los días de muestreo de cada mes. La relación de la riqueza y la abundancia de mariposas con la precipitación se evaluó con el total de la precipitación mensual con el programa PAST 2.17C (Hammer, *et al.*, 2001).

Para comparar cada uno de los ciclos de doce meses se realizó una prueba de t pareada (Sokal & Rohlf, 1979), con el fin de evaluar si existían diferencias estadísticamente significativas con respecto a la riqueza y la abundancia de especies tomando dos ciclos de doce meses cada uno (ciclo 1: mayo de 2013 a abril de 2014, ciclo 2: mayo de 2014 a abril de 2015).

Resultados y discusión

Durante los 24 meses de muestreo se registraron 227 individuos pertenecientes a 21 especies y 20 géneros de la familia Nymphalidae. Las subfamilias representadas fueron Biblidinae (28,6 %), Satyrinae (23,8 %), Nymphalinae (23,8 %) Charaxinae (14,3 %), y Morphinae (9,5 %). Las especies más representativas en el muestro fueron: *Hamadryas feronia* (Linnaeus, 1758) (26,9 %), *Callicore pitheas* (Latreille, 1813) (20,7 %), *Temenis laothoe* (Cramer, 1777) (9,7 %), *Hermeuptychia sp1* (8,4 %), *Taygetis laches* (Fabricius, 1793) y *Zaretis ellops* (Ménétries, 1855) (5 % cada una) y *Hermeuptychia hermes* (Fabricius, 1775) (4,8 %) (Figura 1) (Tabla 1). Además, se registraron 14 especies con abundancias menores de diez individuos, que representaron el 19 % de los especímenes capturados durante el estudio.

Diversidad alfa'. El mes con mayor número de especies fue octubre de 2013, con nueve especies, seguido de septiembre y noviembre del mismo año, y de octubre y de diciembre de 2014, con ocho especies cada uno. Estos

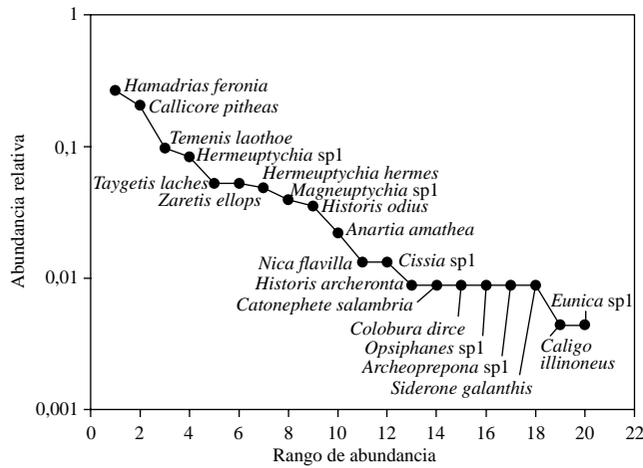


Figura 1. Curva de rango de la abundancia de especies de mariposas frugívoras recolectadas durante 24 meses en Arauca, Colombia

Tabla 1. Listado de especies recolectadas y su presencia en cada una de las temporadas climáticas

Especie	Invierno	Verano
<i>Callicore pitheas</i> (Latreille, 1813)	45	2
<i>Hamadrias feronia</i> (Linnaeus, 1758)	51	10
<i>Hermeuptychia hermes</i> (Fabricius, 1775)	10	1
<i>Historis archeronta</i> (Fabricius, 1775)	1	1
<i>Nica flavilla</i> (Godart, [1824])	3	0
<i>Temenis laothoe</i> (Cramer, 1777)	21	1
<i>Historis odius</i> (Fabricius, 1775)	8	0
<i>Caligo illioneus</i> (Cramer, 1775)	1	0
<i>Taygetis laches</i> (Fabricius, 1793)	12	0
<i>Zaretis ellops</i> (Ménétriés, 1855)	10	2
<i>Anartia amathea</i> (Linnaeus, 1758)	4	1
<i>Catonephele salambria</i> (Hewitson, 1852)	1	1
<i>Colobura dirce</i> (Linnaeus, 1758)	2	0
<i>Magneuptychia sp1</i>	7	2
<i>Opsiphanes cassina</i> (C. Felder y R. Felder, 1862)	2	0
<i>Siproeta stelenes</i> (Linnaeus, 1758)	1	0
<i>Hermeuptychia sp1</i>	17	2
<i>Cissia sp1</i>	1	2
<i>Archeoprepona amphimachus</i> (Fabricius, 1775)	2	0
<i>Eunica sp1</i> Hübner, [1819]	1	0
<i>Siderone galanthis</i> (Cramer, 1775)	0	2

meses, con excepción de diciembre de 2014, corresponden a la temporada de lluvias. Por otra parte, los meses de febrero y marzo de 2013, y de marzo de 2015 fueron los menos diversos y no se registraron capturas, lo cual refleja las condiciones climáticas extremas durante la temporada de sequía.

Diversidad beta'. El análisis de similitud llevado a cabo con el producto del cálculo de la β' diversidad, entendida como el recambio de especies entre cada uno de los meses, generó la formación de cuatro grupos (Figura 2) con un 90 % de diferencia que, de izquierda a derecha en esta Figura corresponden, primero, a los meses de enero de 2014 y enero de 2015 (temporada de sequía); segundo, al mes julio de 2013 (temporada de lluvias); tercero, a los meses de abril de 2014 y 2015, diciembre y mayo de 2013 y febrero de 2015 (meses de sequía, excepto mayo) y, por último, los meses restantes que corresponden a la temporada de lluvias, con excepción de diciembre de 2014. Los grupos formados en este análisis reflejaron la tendencia de la riqueza y la abundancia de especies a lo largo del año; así, los meses con mayores abundancias, riqueza y recambio de especies correspondieron al grupo de los meses de lluvias, en tanto que los meses de menor valor en estos parámetros fueron de sequía. Según el análisis de similitud (ANOSIM) hubo una diferencia estadísticamente significativa entre las épocas de lluvias y sequía ($p=0,032$), lo cual confirma la tendencia observada en el análisis anterior.

Diversidad Gamma'. Las curvas de acumulación de especies evidenciaron entre 21 y 24 especies usando diferentes estimadores no paramétricos. Para los 24 eventos de muestreo, las 21 especies recolectadas representaban el 97,6 % de las especies calculadas por el estimador *Jackknife* de segundo orden. Los estimadores no paramétricos de riqueza Chao1 y Chao2 predijeron valores de riqueza de

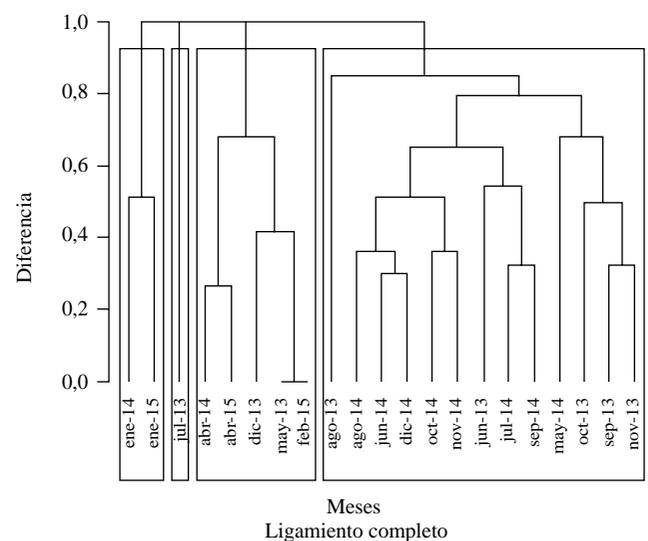


Figura 2. Dendrograma para los meses de muestreo con capturas de mariposas frugívoras en Arauca. Los recuadros indican diferencias del 90 % entre los grupos formados.

21,4 y 21,3, respectivamente, lo cual significa que las muestras recolectadas representaban entre el 98 % y el 98,3 % de las especies predichas por ellos. Además, con el estimador *Bootstrap* se calcularon 23 especies, lo que indica que se obtuvo el 91,2 % de las especies predichas por el estimador. Por último, en el estimador *Jackknife* de segundo orden se presentó un valor estimado de 23,9, u 87,9 % de las especies esperadas en el área de estudio (Figura 3). Así, independientemente del algoritmo usado para el cálculo del valor esperado para la riqueza de especies, los muestreos reflejaron una buena representatividad de las mariposas frugívoras que habitan la sabana inundable del municipio de Arauca.

Este resultado es comparable con el estudio de **Urbano, et al.** (2014), quienes reportaron 32 de especies de *Nymphalidae* en dos localidades del departamento de Casanare, cuyas características paisajísticas son comparables con los ambientes de sabana inundable y con parámetros abióticos similares, como la temperatura y el régimen unimodal de lluvias, de la Orinoquia. La diferencia de 34,4 % en este resultado es atribuible a la diferencia en el tipo de técnicas usadas en cada uno de los trabajos, pues **Urbano, et al.** (2014) usaron dos técnicas complementarias (trampas Van Someren Rydon y red entomológica), en tanto que en este estudio solo se emplearon trampas Van Someren Rydon.

En la región de la Orinoquia se han reportado 158 especies de mariposas diurnas, de las cuales 100 pertenecen a la familia *Nymphalidae* (**Andrade, 2002**). En este estudio se registró el 21 % de esa riqueza de especies de la comunidad de *Nymphalidae*, las cuales pueden considerarse importantes en el ecosistema de sabana inundable característico del área de estudio, siendo un taxón que ocupa una gran diversidad de hábitats con amplios rangos de distribución en el trópico (**DeVries, et al., 1997; Chacón & Montero, 2007**). A nivel de subfamilias, los valores de riqueza encontrados para *Biblidinae* (seis especies) y *Nymphalinae* (cinco especies) reflejan su alto grado de versatilidad (**Orozco, et al., 2009**), el cual les permite explotar los recursos de forma generalista, en diferentes estratos vegetales y con variedad de estrategias contra los depredadores (**Vargas, et al., 2011**).

La riqueza de las especies y la abundancia registraron una estrecha relación ($r=0,7985$; $p<0,0001$; $n=24$). La riqueza de especies promedio por mes fue de 4,12 ($\pm 2,9$; rango: 0 – 9 especies), en tanto que la abundancia fue, en promedio, de 9,4 individuos ($\pm 9,5$; rango: 0 – 30 individuos) y se concentró en los meses de lluvias (abril – octubre) (**Minorta-Cely & Rangel, 2014**), cuando se recolectaron 178 especímenes, es decir, el 78 % del total de mariposas capturadas en el estudio (Figura 4). La prueba de t pareada usada para evaluar si existió variación en la riqueza o la abundancia en los dos ciclos de 12 meses documentados, indicó que, globalmente, los dos años fueron similares, pues no se detectaron diferencias significativas (abundancia: $U=0,046$; $p=0,9641$; $gl=11$. riqueza: $U=1,0235$; $p=0,328$; $gl=11$).

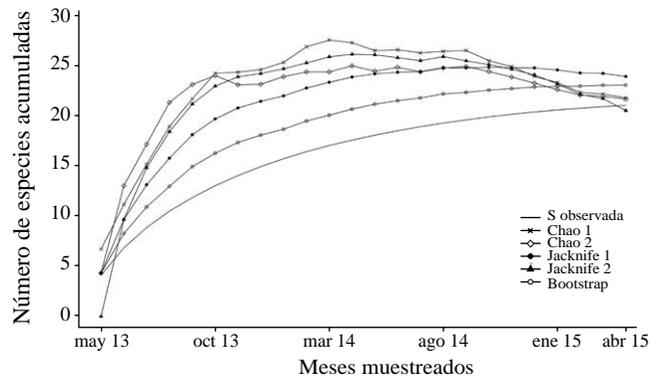


Figura 3. Curvas de acumulación de especies y estimadores paramétricos de riqueza para los muestreos de mariposas frugívoras realizados entre mayo de 2013 y abril de 2015 en el área muestreada

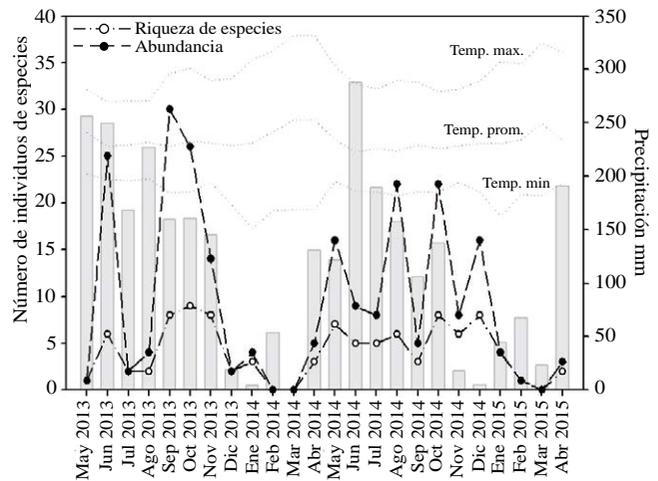


Figura 4. Abundancia y riqueza de especies de mariposas frugívoras durante los 24 meses de muestreo.

Los análisis de correlación de Spearman evidenciaron una tendencia positiva de la precipitación con respecto a la riqueza ($r=0,39$; $p=0,0875$; $n=24$; $gl=22$) y una relación significativa de la precipitación con la abundancia ($r=0,5$; $p=0,00262$; $n=24$; $gl=22$). Este patrón de respuesta de la comunidad de mariposas a la precipitación concuerda con lo reportado en múltiples estudios (**DeVries, et al., 1997; Shahabuddin & Terborgh, 1999; Hilt, et al., 2007; Luna, et al., 2010; Hussain, et al., 2011; Vargas, et al., 2011; Grøtan, et al., 2012; Sorto, 2013; Brito, et al., 2014; Kishimoto-Yamada & Itioka, 2015; Franzen, et al., 2017; Habel, et al., 2018**). El mecanismo que subyace a este patrón es que la disponibilidad del recurso hídrico tiene un efecto en la fenología, induciendo en la vegetación la producción de nuevos brotes de hojas y, posteriormente, de flores y frutos (**Pollard, 1988**). En el caso de las mariposas, esto implica una mayor oferta de alimento durante la fase larval y, debido al aumento de la cobertura vegetal, una mayor disponibilidad de refugios (**Grøtan, et al., 2012; Valtonen, et al., 2013**).

Asimismo, los análisis de correlación indicaron que hubo un efecto negativo en la abundancia y la riqueza de especies asociado con las temperaturas máximas (riqueza: $r=-0,62$; $p=0,0033$; abundancia: $r=-0,64$; $p=0,02$) y temperaturas promedio (riqueza: $r=-0,52$; $p=0,02$; abundancia: $r=-0,6$; $p=0,005$) durante los días y horas de muestreo. A pesar de que muchas especies de mariposas diurnas poseen mecanismos de termorregulación que inciden en sus periodos y actividades diarias de forrajeo, búsqueda de pareja, postura de huevos y reducción del riesgo de depredación (Kingsolver, 1985; Shelly & Ludwig, 1985; Chai & Srygley, 1990; Clench, 1966; Sparks & Yates, 1997; Bandini, et al., 2010), las máximas temperaturas en el sitio de estudio pudieron ser excesivas en los días de muestreo (media= $33,0 \pm 1,8$; rango: $30,8$ a $37,5^{\circ}\text{C}$). En este sentido, son relativamente pocos los estudios hechos sobre la ecología de la termorregulación en mariposas tropicales, pero Fischer, et al., (2010) y Karl, et al. (2011) usaron en experimentos de laboratorio una temperatura de 34°C en los tratamientos con temperaturas elevadas para mariposas tropicales. Las temperaturas altas pueden tener efectos negativos en la riqueza y la abundancia de mariposas, ya que pueden causar estrés fisiológico y ello restringe los periodos de actividad (Roy, et al., 2001), afecta negativamente el sistema inmunitario (Karl, et al., 2011), y reduce la supervivencia y la fecundidad (Kingsolver & Watt, 1983). Además, Vargas, et al., (2011) plantearon que en los meses de poca pluviosidad la pérdida de follaje en la vegetación ocasiona mayor incidencia de la radiación solar sobre la superficie del suelo, incrementando las temperaturas del sotobosque y disminuyendo la actividad de muchos lepidópteros diurnos.

Los patrones de abundancia de las especies detectados a lo largo del estudio son variados. Los picos de abundancia de algunas de ellas parecen reflejar la existencia de los ciclos de vida multivoltinos en especies como *H. feronia* y *C. pitheas*, con registros de abundancias relativamente consistentes a lo largo del año, especialmente, durante los meses en que ocurren las mayores precipitaciones en la sabana inundable de la Orinoquia (Figura 5). Aunque en menor grado, el multivoltinismo también fue evidente en *T. laothoe*, a pesar de la ausencia de capturas en los meses de sequía, lo que concuerda con lo reportado por Hernández-Mejía, et al., (2008) en México. El multivoltinismo, es decir la aparición de varias generaciones a lo largo del año, se ha relacionado con la sincronización generacional frente a las condiciones ambientales y la disponibilidad de recursos durante los diferentes estadios del ciclo de vida de las mariposas (Wolda, 1988; Hernández-Mejía, et al., 2008). Shapiro (1974) sugirió que el multivoltinismo ocurre en especies con estrategias polífagas generalistas, lo que les permite sobrevivir y estar en la comunidad a lo largo del año, incluso en densidades poblacionales relativamente bajas, como es el caso durante los meses de sequía para especies como *H. feronia*, y *C. pitheas*.

Los datos sobre la abundancia también indican que

algunas especies como *Hermeuptychia* sp1 (Figura 6) estuvo ausente en el primer año de muestreo y solo se registró en el segundo, alcanzando la cuarta mayor abundancia (8 %) de todas las especies registradas en el estudio. Ese comportamiento, aparentemente univoltino, podría deberse a lo planteado por Shapiro (1974) en cuanto a que el univoltinismo está asociado a especies monófagas. Otro factor que puede afectar negativamente las poblaciones de mariposas es que las lluvias tienen efectos sobre la fenología vegetal, y modifican la naturaleza y la concentración

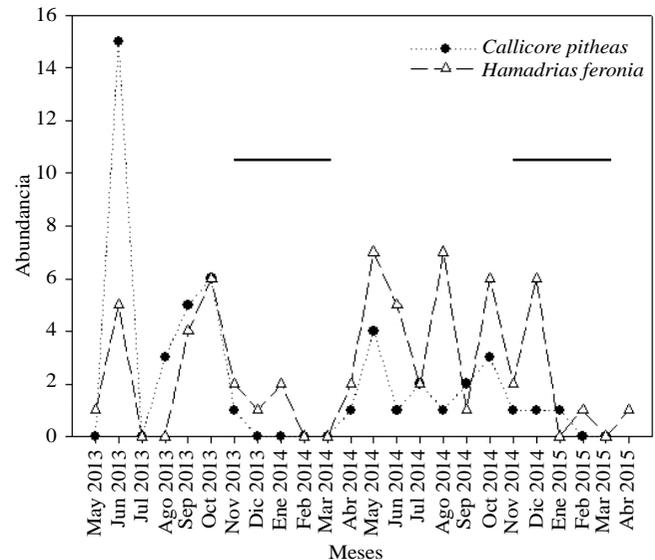


Figura 5. Variación en la abundancia de *C. pitheas* y *H. feronia* durante los 24 meses de muestreo. Las líneas horizontales representan los meses de sequía.

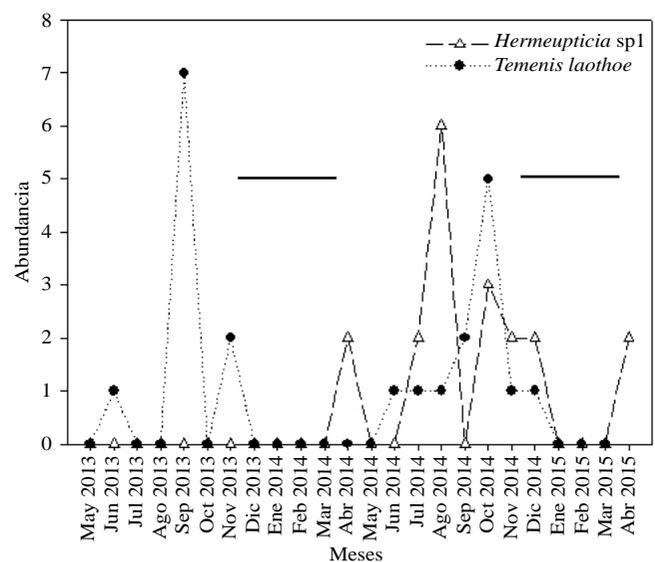


Figura 6. Abundancias de *T. laothoe* y *Hermeuptychia* sp1 en los 24 meses de estudio. Las líneas horizontales representan los meses de sequía.

de algunos compuestos presentes en las plantas (Scott & Epstein, 1987). Por esta razón, a lo largo del año hay meses que no son aprovechables nutricionalmente por los estadios inmaduros de algunas especies y el desarrollo de sus ciclos de vida responden a estas fluctuaciones (Hernández-Mejía, *et al.*, 2008). Por último, los patrones de abundancia de cada población también podrían reflejar aspectos específicos relacionados con la historia natural de cada especie, los cuales no fueron considerados en la presente investigación.

Conclusiones

Este trabajo es la primera aproximación a la ecología de las mariposas frugívoras en el ambiente de sabana inundable del norte de la Orinoquia colombiana, y es novedoso también por la escala bianual que documenta. Se determinó que hay relación entre factores abióticos como la temperatura y la precipitación y la abundancia y riqueza de las especies de mariposas frugívoras en una escala temporal relativamente amplia. La respuesta de las mariposas frugívoras a los factores abióticos refleja la capacidad de algunas especies para sobrellevar condiciones ambientales mediante estrategias como la aparición de varias generaciones a lo largo del año (multivoltinismo), lo cual les permite explotar de forma más efectiva los recursos alimenticios disponibles.

Una de las implicaciones de la estrecha relación de la riqueza de especies con la estacionalidad tiene que ver con el diseño de futuros inventarios de la diversidad de las mariposas en la Orinoquia, dado que hacerlo exclusivamente durante la época seca puede subestimar la diversidad local y regional en términos de la riqueza de especies y su abundancia. El presente estudio funciona como un referente para la planeación e implementación de otros similares en esta región del país.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a los alumnos Ángel Matiz, Yilmer Mina, Nelly Carolina Torres Rivera, Sebastián Peralta Pérez, Maikol Jiménez, Carlos Gamba, Miguel Ángel Martínez Quiroga, Neisdan Iván Serrano Pardo, Liseth Andrea Prieto Torres, Yonatan Moreno Casteblanco y Nixon Andrés Castillejo Lozano, por su trabajo en la curaduría y la captura de buena parte de los especímenes relacionados en este artículo.

Contribución de los autores

Juan Carlos Agudelo Martínez: formulación de la idea general, recolección de muestras, identificación taxonómica, análisis de datos y preparación del manuscrito. Evelin María Gómez Tapia: recolección de muestras, identificación taxonómica, análisis de datos y preparación del manuscrito. Néstor Pérez-Buitrago: formulación de la idea general, análisis de datos, preparación y revisión del manuscrito

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Referencias

- Agudelo, J.C., Pérez-Buitrago, N. (2015). Notas acerca de la distribución de Papilionidae (Lepidoptera: Papilionoidea) en el norte de la Orinoquia colombiana. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas.* **19**: 203-214.
- Andrade, G.M. (2002). Biodiversidad de las mariposas (Lepidoptera: Rhopalocera) de Colombia. Proyecto de Red Iberoamericana de Biogeografía y Entomología Sistemática. *Lepidoptera Tercer Milenio.* SEA, España. **2**: 153-172.
- Arbeláez-Cortés, E. (2013). Knowledge of Colombian biodiversity: Published and indexed. *Biodivers Conserv.* **22**: 2875-2906.
- Bandini, R.D., Prado P.I., Brown, K.S., Freitas A.V. (2010). Temporal Diversity Patterns and Phenology in Fruit-feeding Butterflies in the Atlantic Forest. *Biotropica.* **42**: 710-716.
- Bonebrake, T.C., Ponisio, L.C., Boggs, C.L., Ehrlich P.R. (2010). More than just indicators: A review of tropical butterfly ecology and conservation. *Biological Conservation.* **143**: 1831-1841.
- Brown, K. (1991). Conservation of Neotropical Environments: Insects as Indicators. En: Collins N., Thomas J., editores. *The Conservation of Insects and Their Habitats.* London, Reino Unido: Academic Press Limited. p. 349-404.
- Brito, M.M., Ribeiro, D.B., Raniero, M., Hasui, E., Ramos, F.N., Arab, A. (2014). Functional composition and phenology of fruit-feeding butterflies in a fragmented landscape: Variation of seasonality between habitat specialists. *J Insect Conserv.* **18**: 547-560.
- Chai, P., Srygley, R.B. (1990). Predation and the flight, morphology, and temperature of Neotropical rain forest butterflies. *Rev. The American Naturalist.* **135**: 748-765.
- Chacón, I., Montero, J. (2007). *Mariposas de Costa Rica.* Costa Rica: Editorial INBio. p. 366.
- Chapin, F. S., Walker, B. H., Hobbs, R. J., Hooper, D. U., Lawton, J. H., Sala, O. E., Tilman, D. (1997). Biotic control over the functioning of ecosystems. *Science.* **277**: 500-504.
- Chazdon, R.L., Colwell, R.K., Denslow, J.S., Guariguata, M.R. (1998). Statistical methods for estimating species richness of woody regeneration in primary and secondary rain forests of NE Costa Rica. In: Dallmeier, F., Comiskey, J.A. Editores. *Forest biodiversity research, monitoring and modelling: Conceptual background and Old World case studies.* Paris, France: Parthenon Publishing. p. 285-309.
- Clarke, K.R. (1993). Non-parametric multivariate analysis of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology.* **18**: 117-143.
- Clench, H.K. (1966). Behavioral thermoregulation in butterflies. *Ecology.* **47**: 1021-1034.
- Colwell, R.K., Coddington, J.A. (1994). Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.* **345**: 101- 118.
- Colwell, R. (2013). *Estimates: Statistical estimation of species richness and shared species from samples.* Versión 9. Fecha de consulta: enero-junio de 2015. Disponible en: <http://purl.oclc.org/estimates>, accedida entre enero y junio de 2015.
- Correa, H.D., Ruiz, S.L., Arévalo, L.M. (2005). Plan de acción de biodiversidad de la cuenca del Orinoco – Colombia / 2005 - 2015 – Propuesta Técnica. Bogotá D.C. Corporinoquia, Cormacarena, IAvH, Unitrópico, Fundación Omacha, Fundación Horizonte Verde, Universidad Javeriana, Unillanos, WWF - Colombia, GTZ. Bogotá, Colombia: ARFO editores. p. 273.

- D'abrera, B.** (1987). Butterflies of the Neotropical Region. Part IV. Nymphalidae (partim). Victoria, Australia: Hill House. p. 526-678.
- D'abrera, B.** (1988). Butterflies of the Neotropical Region. Part V. Nymphalidae (conc.) & Satyridae. Victoria, Australia: Hill House. p. 679-877.
- DeVries, P.J., Murray, D., Lande, R.** (1997). Species diversity in vertical, horizontal, and temporal dimensions of a fruit-feeding butterfly community in an Ecuadorian rainforest. *Biol. J. Linn. Soc.* **62**: 343-364.
- DeVries, P.J., Walla, T.R.** (2001). Species diversity and community structure in Neotropical fruit-feeding butterflies. *Biol. J. Linn. Soc.* **74**: 1-15.
- Departamento Nacional de Planeación.** (2014). Bases del plan Nacional de Desarrollo 2014-2018. Bogotá D.C. Colombia. DNP.
- Fagua, G.** (1999). Variación de las mariposas y hormigas de un gradiente altitudinal de la cordillera Oriental (Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.* **2**: 75-90.
- Fischer, K., Dierks, A., Franke, K., Geister, T.L., Liszka, M., Winter, S., Pflücke, C.** (2010). Environmental effects on temperature stress resistance in the tropical butterfly *Bicyclus anynana*. *PLoS ONE.* **5**: e15284.
- Forman, R.** (1997). Land mosaics: The ecology of landscapes and regions. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press. p. 632.
- Franzen, M., Schrader, J., Sjöberg, G.** (2017). Butterfly diversity and seasonality of Ta Phin mountain area (N. Vietnam, Lao Cai province). *J Insect Conserv.* **21**: 465-475.
- García, C., Constantino, L., Heredia, M., Kattan, G.** (2002). Mariposas comunes de la cordillera Central de Colombia. *Wildlife Conservation Society. Feriva editores, Cali. Colombia.* p. 120.
- Godfaurd, J., Clements-Croome, D., Jeronimidis, G.** (2005). Sustainable building solutions: A review of lessons from the natural world. *Building and Environment.* **40**: 319-328
- Gørtan, V., Lande, R., Engen, S., Sæther, B.E., DeVries, P.J.** (2012). Seasonal cycles of species diversity and similarity in a tropical butterfly community. *Journal of Animal Ecology.* **81**: 714-723.
- Habel, J.C., Seibold, S., Ulrich, W., Schmitt, T.** (2018). Seasonality overrides differences in butterfly species composition between natural and anthropogenic forest habitats. *Anim Conserv.* doi:10.1111/acv.12408
- Hammer, O., Harper, D., Ryan, P.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Paleontología Electrónica.* **4**: 9.
- Hernández-Mejía, C., Llorente, J., Vargas, I., Luis A.** (2008). Las mariposas (Hesperioidea y Papilionoidea) de Malinalco, Estado de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad.* **79**: 117-130.
- Hilt, N., Brehm, G., Fiedler, K.** (2007). Temporal dynamics of rich moth ensembles in the Montane Forest Zone in Southern Ecuador. *Biotropica.* **39**: 94-104.
- Hussain, K.J., Ramesh, T., Satpathy, K.K., Selvanayagam, M.** (2011). Seasonal dynamics of butterfly population in DAE Campus, Kalpakkam, Tamil Nadu, India. *Journal of Threatened Taxa.* **3**: 1401-1414.
- Karl, I., Stoks, R., Block, M., Janowitz, S.A., Fischer, K.** (2011). Temperature extremes and butterfly fitness: conflicting evidence from life history and immune function. *Global Change Biology.* **17**: 676-687.
- Kingsolver, J.G.** (1985). Butterfly thermoregulation: Organismic mechanisms and population consequences. *Journal of Research on the Lepidoptera.* **24**: 1-20.
- Kingsolver, J.G., Watt, W.B.** (1983). Thermoregulatory strategies in Colias Butterflies: Thermal stress and the limits to adaptation in temporally varying environments. *The American Naturalist.* **121**: 32-55.
- Kishimoto-Yamada, K., Itioka, T.** (2015). How much have we learned about seasonality in tropical insect abundance since Wolda (1988)? *Entomological Science.* **18**: 407-419.
- Koleff, P., Gaston, K.J., Lennon, J.J.** (2003). Measuring beta diversity for presence-absence data. *Journal of Animal Ecology.* **72**: 367-382.
- Lamas, G.** (2004). Atlas of Neotropical Lepidoptera. Checklist: Part 4A. Hesperioidea - Papilionoidea. ATL + Scient. Publ. Gainesville, Florida, USA: Scientific Publishers. p. 439.
- Lasso, C., Rial, A., Matallana, C., Ramírez, W., Señaris, J., Díaz, A., Corzo, G., Machado, A.** (2011). Biodiversidad de la Cuenca del Orinoco. II Áreas prioritarias para la conservación y el uso sostenible. Instituto de investigación de recursos biológicos Alexander von Humboldt, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle de Ciencias Naturales e Instituto de Estudios de la Orinoquia (Universidad Nacional de Colombia). Bogotá, D.C., Colombia. p. 304.
- Lennon, J.J., Koleff, P., Greenwood, J.J., Gaston, K.J.** (2001). The geographical structure of British bird distributions: diversity, spatial turnover and scale. *Journal of Animal Ecology.* **70**: 966-979.
- Luna, M., Llorente, J., Martínez, A., Vargas, I.** (2010). Composición faunística y fenología de las mariposas (Rhopalocera: Papilionoidea) de Cañón de Lobos, Yauatepec, Morelos, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad.* **81**: 315-342.
- Minorta-Cely, V., Rangel, C.J.** (2014). El clima de la Orinoquia Colombiana. Colombia Diversidad Biótica XIV. La región de la Orinoquia de Colombia, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia. p. 533-612.
- Mittermeir, R., Robles, P., Mittermeir, C.** (1997). Megadiversidad. Los países biológicamente más ricos del mundo. Cemex. México. p. 501.
- Odum, H. T.** (1959). *Fundamentals of ecology.* Philadelphia. United States of America. W. B. Saunders Company. p. 383.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Wagner, H.** (2016). *Community Ecology Package.* Versión 2.3-3. Fecha de consulta: enero-junio de 2015. Disponible en: <https://github.com/vegandevs/vegan>
- Orozco, S., Muriel, S.B., Palacio, J.** (2009). Diversidad de lepidópteros diurnos en un área de bosque seco tropical del occidente antioqueño. *Actualidades Biológicas.* **31**: 31-41.
- Peña-Pirazán, J.D.** (2003). Minería y medio ambiente en Colombia. Una síntesis histórica de la mala administración de nuestros recursos naturales mineros de la degradación ambiental y de la generación conflictos sociales, asociados a desastres naturales. Una mirada hacia el futuro económico y ambiental de este importante sector productivo. Tesis de Especialización, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá.
- Pollard, E.** (1988). Temperature, rainfall and butterfly numbers. *Journal of Applied Ecology.* **25**: 819-828.

- R Core Team.** (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. Fecha de consulta: enero – junio de 2015. Disponible en: <http://www.R-project.org/>
- Regalado, A.** (2013). Venturing back into Colombia. *Science*. **341**: 450-452.
- Ricklefs, R.E.** (2005). Historical and ecological dimensions of global patterns in plant diversity. *Biol. Skr.* **55**: 583-603.
- Rippstein, G., Escobar G., Motta, F.** (2001). Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical: Publicación CIAT. p. 302.
- Rivas, J., Rodríguez, J., Mittermeier, C.** (2002). Los llanos. En: Robles, G.P. Áreas silvestres: Las últimas regiones vírgenes del mundo. México: Cemex, Conservación Internacional. p. 576.
- Romero-Ruiz, M.H., Flantua, S.G.A., Tansey, K., Berrio, J.C.** (2011). Landscape transformations in savannas of northern South America: Land use/ cover changes since 1987 in the Llanos Orientales of Colombia. *Applied Geography*. **32**: 766-776.
- Roy, D.B., Rothery, P., Moss, D., Pollard, E., Thomas, J.A.** (2001). Butterfly numbers and weather: Predicting historical trends in abundance and the future effects of climate change. *Journal of Animal Ecology*. **70**: 201-217.
- Salinas, Y.** (2011). Dinámicas en el mercado de la tierra en Colombia. Documento elaborado para la oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe Home.
- Sánchez-Cuervo, A.M., Aide, T.M.** (2013). Identifying hotspots of deforestation and reforestation in Colombia (2001–2010): implications for protected areas. *Ecosfera*. **4**: 21.
- Sokal, R.R. & Rohlf, F.J.** (1979). *Introducción a la bioestadística*. Madrid. España. Reverte. p. 380.
- Scott, J.A., Epstein, M.E.** (1987). Factors affecting phenology in a temperate insect community. *The American Midland Naturalist*. **117**: 103-118.
- Shahabuddin, G., Terborgh, J.W.** (1999). Frugivorous Butterflies in Venezuelan Forest Fragments: Abundance, Diversity and the Effects of Isolation. *Journal of Tropical Ecology*. **15**: 703-722.
- Shapiro, A.M.** (1974). The butterfly fauna of the Sacramento Valley, California. *Journal of the Lepidopterists Society*. **13**: 73-82.
- Shelly, T.E., Ludwig, D.** (1985). Thermoregulatory behavior of the butterfly *Calisto nubila* (Satyridae) in a Puerto Rican forest. *Oikos*. **44**: 229-233.
- Sorto, R.E.** (2013). Diversidad de mariposas diurnas en la reserva de la biósfera, Sierra Apaneca –Lamatepec, el Salvador. *Revista Bioma*. **1**: 31-35.
- Sparks, T.H., Yates, T.J.** (1997). The effect of spring temperature on the appearance dates of British butterflies 1883-1993. *Ecography*. **20**: 368-374.
- Urbano, P., Munevar, J., Mahecha, J., Hincapie, E.** (2014). Diversidad y estructura de las comunidades de lepidóptera en la zona del ecotono entre el piedemonte llanero y la sabana inundable en Casanare-Colombia (Lepidóptera: Papilionoidea). *SHILAP Revista de Lepidopterología*. **42**: 433-437.
- Valtonen, A., Molleman, F., Chapman, C.A., Carey, J.R., Ayres, M.P., Roininen, H.** (2013). Tropical phenology: Bi-annual rhythms and interannual variation in an Afrotropical butterfly assemblage. *Ecosphere*. **4**: 36
- Vargas, M., Martínez, N., Gutiérrez, L., Prince, S., Herrera, V., Torres, L.** (2011). Riqueza y abundancia de Hesperoidea y Papilionoidea (Lepidóptera) en la Reserva Natural Las Delicias, Santa Marta, Magdalena, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. **16**: 43-60.
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña, A.** (2006). *Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad*. Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, Colombia: Segunda Edición. p. 236.
- Warren, A. D., Davis, K. J., Stangeland, E. M., Pelham, J. P. & Grishin, N. V.** (2013). *Illustrated Lists of American Butterflies*. Fecha de consulta: enero-junio de 2018. Disponible en: <http://www.butterfliesofamerica.com/>
- Wolda, H.** (1988). Insect seasonality: Why? *Ann. Rev. Ecol. Syst.* **19**: 1-18.

Evaluación del efecto de *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) en el crecimiento de plántulas de *Oreopanax floribundus* (Araliaceae)

Manuela Calderón-Hernández

Línea de investigación en Especies y Propagación, Sublínea en Conservación de Semillas, Subdirección Científica, Jardín Botánico de Bogotá “José Celestino Mutis”, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

Trialeurodes vaporariorum (Westwood) es un insecto fitófago que afecta diversos tipos de cultivos. En las labores del Jardín Botánico de Bogotá para la propagación masiva de especies nativas de bosque altoandino y páramo, se ha evidenciado la presencia de la mosca blanca. El objetivo del presente estudio fue documentar si *Oreopanax floribundus* podía ser una planta huésped de *T. vaporariorum*, y determinar si la presencia de este fitófago afectaba su crecimiento. El experimento incluyó tres tratamientos: T1 = control, T2 = plántulas con una infestación baja de *T. vaporariorum*, y T3 = plántulas con una infestación alta. El registro se realizó en dos momentos, al inicio del experimento (t0) y dos meses después de la infestación (t1). Se registró la altura, el número de hojas y el peso seco en los dos momentos, así como la cantidad de ninfas en el t1 en hojas nuevas y viejas. Se encontraron diferencias entre el número de ninfas presentes en hojas nuevas y hojas viejas ($p < 0,05$), pero no se encontraron diferencias entre los tratamientos en cuanto al crecimiento medido en peso seco y número de hojas ($p > 0,05$). Se presentaron diferencias ($p < 0,05$) en la altura entre los tratamientos, siendo mayor el crecimiento con T2 y T3 que con T1. En conclusión, se aportó evidencia que permite catalogar a *O. floribundus* como una planta huésped de *T. vaporariorum*, y se abrió la posibilidad de estudiar con mayor profundidad si *O. floribundus* puede ser una planta tolerante a *T. vaporariorum*, lo cual es favorable para la propagación masiva de esta especie. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Fitófago; Herbivoría; Mano de oso; Mosca blanca; Westwood.

Evaluation of the effect of *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) on the growth of *Oreopanax floribundus* (Araliaceae) seedlings

Abstract

Trialeurodes vaporariorum (Westwood) is a phytopathic insect that affects different types of crops. The Botanical Garden of Bogota carries out the massive propagation of native species from the high Andean forest and páramo, in which the presence of whitefly has been evidenced. Our aim was to document if *Oreopanax floribundus* can be a host plant for *T. vaporariorum* and to determine if its presence affects the growth of the plant. The experiment consisted of three treatments: T1 = control, T2 = seedlings with a low infestation of *T. vaporariorum*, and T3 = seedlings with a high infestation. The record was made in two moments, at the beginning of the experiment (t0) and two months after the infestation (t1). The height, the number of leaves, and the dry weight were recorded in t0 and t1 and the number of nymphs in t1 in new and old leaves. Differences were found between the number of immature flies present in new leaves and old leaves ($p < 0,05$), but no differences were found between treatments in growth measured in dry weight and number of leaves ($p > 0,05$). There were differences ($p < 0,05$) in the height between treatments where T2 and T3 showed a higher growth than T1. In conclusion, evidence was provided that can classify *O. floribundus* as a host plant of *T. vaporariorum*, and the opportunity opens up to further study if *O. floribundus* can be tolerant to *T. vaporariorum*, which is favorable for the massive propagation of this species. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: *Mano de oso* tree; Herbivory; Phytophagous; Westwood; Whitefly.

Introducción

La mayor limitante en la producción de cultivos en Colombia, como en muchas partes del mundo, son los insectos herbívoros, lo que causa pérdidas significativas a los agricultores y amenaza la seguridad alimentaria (FAO, 2017; Vilaseca, et al., 2008). La propagación de estos insectos ha aumentado drásticamente en los últimos años por diferentes causas, entre ellas el comercio del material vegetal (plantas,

flores o frutos), el cambio climático y la poca capacidad de recuperación de los sistemas de producción debido a la intensificación de la agricultura durante años (FAO, 2017).

Correspondencia:

Manuela Calderón-Hernández, mchernandez@jbb.gov.co; macahek@hotmail.com

Recibido: 25 de mayo de 2018

Aceptado: 29 de agosto de 2018

Editor: Marta Ramírez Pinilla

Por ese motivo, y con el fin de generar las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo de las plantas cultivadas, se crean los invernaderos, los cuales, básicamente, son una estructura cubierta y cerrada que permite la entrada de luz solar y facilita la acumulación de calor durante el día, el cual se pierde lentamente durante la noche (FAO, 2002). Entre los beneficios que ofrece un invernadero se destaca el hecho de que permite cultivar y producir diferentes tipos de plantas, protegiéndolas de condiciones climáticas extremas, así como una producción continua, mejor calidad y reducción en los costos de producción al permitir un control y uso adecuado de plaguicidas, agua, fertilizantes y sustratos (Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, 2014; Estrada, 2012). Sin embargo, según Monroy (2010), los invernaderos presentan condiciones adecuadas no solo para las plantas, sino también para la proliferación de una gran cantidad de insectos y enfermedades que pueden atacar los cultivos, por lo cual deben contar con programas para su manejo.

En diversos estudios se reporta cómo las moscas blancas se han convertido en unas de las plagas de mayor importancia para diferentes variedades de plantas silvestres y cultivadas en el mundo (Navarro, 2005). Las moscas blancas (Hemiptera: Aleyrodidae) son insectos fitófagos que ocasionan daños directos en las plantas, ya que en los estadios adulto e inmaduro se alimentan del floema de la planta succionando los fotoasimilados con sus estiletes (Rosell, *et al.*, 1995), los cuales inserta en los tejidos de la hoja ocasionando ligeros daños físicos difíciles de cuantificar (Gullan & Cranston, 2010), así como daños indirectos, ya que son vectores de virus (Navas-Castillo, *et al.*, 2011) y, además, promueven el crecimiento de hongos sobre el haz de la hoja de la plantas debido a la excreción de sustancias azucaradas, reduciendo la tasa fotosintética y causando la muerte prematura de los tejidos y estructuras (Carapia & Castillo-Gutiérrez, 2013; López & Segade, 2017). Mound & Halsey (1978) reportaron más de 1.200 especies de moscas blancas en el mundo, sin embargo, los registros más comunes en Colombia, y los de mayor importancia económica, son *Bemisia tabaci*, *Trialeurodes vaporariorum* y *Aleurotrachelus socialis* (Navarro, 2005; Quintero, *et al.*, 2001).

Trialeurodes vaporariorum es conocida como la mosca blanca de los invernaderos (Westwood) (Martín, 2005); su ciclo de vida dura, en promedio, 22 a 30 días a una temperatura promedio de 19 °C y una humedad relativa del 80 % (Cardona, *et al.*, 2005; Insecticide Resistance Action Committee-IRAC, 2017; Manzano & Van Lenteren, 2009; Navarro, 2005). Se ha documentado que tiene cerca de 249 especies de plantas huéspedes (Quintero, *et al.*, 2001; Vet, *et al.*, 1980) distribuidas en 80 familias botánicas, de las cuales Astereaceae presenta el mayor registro, con 44 especies, seguida por Solanaceae (22) y Malvaceae (18) (Mound & Halsey, 1978).

Esta lista de especies tiende a aumentar, y en algunos estudios se ha reportado la presencia de la mosca blanca en plantas silvestres aledañas a invernaderos; Roiditakis (1990) reportó la presencia de la mosca blanca en 52 nuevas especies de plantas huéspedes en Creta y Grecia; en Kola, Rusia, Rak & Litvinova (2010) registraron la plaga en las plantas de la colección viva del Jardín Botánico Kola y Ovčarenko, *et al.* (2016) reportaron cinco nuevas especies de plantas huéspedes en los alrededores de los invernaderos del oeste de Finlandia.

En los invernaderos del Jardín Botánico de Bogotá actualmente se realiza la propagación masiva de diferentes especies de plantas nativas y silvestres de los bosques altoandinos y de páramo, las cuales brindan diferentes servicios ecosistémicos pertinentes para la conservación, y durante las actividades de monitorización del crecimiento y la supervivencia del material propagado se reportó la presencia de *T. vaporariorum* en algunas de las especies.

Una de las plantas que se ha visto atacada por este fitófago es *Oreopanax floribundus* (Schult.) Decne. & Planch (Araliaceae), un árbol nativo de Colombia (Rivera-Díaz & Celis, 2015) conocido comúnmente como mano de oso (Bernal, *et al.*, 2017), especie de rápida germinación y crecimiento, usada comúnmente para la producción de combustible y también como especie ornamental en el arbolado urbano de Bogotá (Jardín Botánico de Bogotá-JBB, 2016), además de ser útil en la primeras etapas de restauración de ecosistemas degradados (Castillo, 2007). Aunque Mound & Halsey (1978) reportaron a *Aralia cordata* y *Oplopanax elatus*, dos especies de la familia Araliaceae, como plantas huéspedes de *T. vaporariorum*, aún no hay reportes de que *O. floribundus* también pueda serlo. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue documentar si *O. floribundus* podía ser una planta huésped de *T. vaporariorum* y, asimismo, determinar si su presencia afectaba el crecimiento de sus plántulas.

Materiales y métodos

El estudio se hizo en los invernaderos y laboratorios de la Subdirección Científica del Jardín Botánico de Bogotá (JBB), el cual está ubicado en la capital de Colombia (4°39'58.0"N, 74°05'56.4"O).

Material biológico. Las plántulas utilizadas en la investigación son el producto de las semillas de un individuo de *O. floribundus* que se encuentra en la colección viva del Jardín Botánico de Bogotá, las cuales fueron sembradas en julio del 2016 en un sustrato de tierra, humus y cascarilla en proporción de 50:30:20, respectivamente, y cuya edad era de un año y dos meses a partir de la siembra en el momento de comenzar el experimento. Cada planta se introdujo en una bolsa de plástico negro y se revisó para asegurarse de que no presentara patógenos o enfermedades antes de ser utilizada. Durante la evaluación del experimento las plantas no fueron fertilizadas y se las regó diariamente de manera uniforme humedeciendo directamente el sustrato sin mojar las hojas, para evitar la muerte de moscas adultas.

La identificación taxonómica del fitófago de estudio se basó en la descripción morfológica comparativa de *B. tabaci* y *T. vaporariorum* propuesta por Carapia & Castillo-Gutiérrez, (2013).

Se hizo una infestación dirigida con ninfas de los últimos estadios de desarrollo obtenidas de una cría de mosca blanca llevada a cabo en individuos de *Solanum quitoense* (planta huésped) en jaulas plásticas con un fotoperiodo de 12 horas, temperatura promedio de 17 °C y una humedad relativa promedio de 74 %, valores que se tomaron con un Datalogger EBCHQ 94150 (China).

Evaluación experimental. El experimento se llevó a cabo en los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2017; se utilizaron 90 plántulas con una altura promedio de 73 mm, divididas en tres tratamientos (30 plantas), cada uno con tres réplicas (10 plantas).

Se construyeron nueve invernaderos pequeños (uno para cada réplica) de 32 cm x 62 cm x 96 cm con canastas plásticas y palos de madera, recubiertos en su totalidad por plástico transparente para evitar la salida y entrada de las moscas o cualquier otro artrópodo; estos invernaderos, además, se aislaron en una casa de malla (Figura 1a).

El experimento consistió en comparar el crecimiento de plantas de *O. floribundus* expuestas a diferentes densidades de *T. vaporariorum*. Para esto se utilizaron tres tratamientos de la siguiente manera: el tratamiento uno, o de control, (T1), sin infestación y libre del fitófago; el tratamiento dos (T2), con una infestación baja (5 ninfas por planta), y el tratamiento tres (T3), con una infestación alta (200 ninfas por planta). Las plantas se infestaron cortando partes de hojas de *S. quitoense* que contaban con el número de ninfas

deseadas en los estadios III o IV de desarrollo (Carapia & Castillo-Gutiérrez, 2013), cuyos trozos se colocaron sobre las hojas de las plantas que se deseaban infestar (Figura 1b).

Los datos se registraron en dos momentos: al inicio del experimento, tiempo cero de evaluación (t_0), y pasados dos meses de la infestación de las ninfas, tiempo 1 (t_1), con el fin de no interferir en el desarrollo y el ciclo de vida de las moscas. A cada planta se le registró la altura y el número de hojas en el t_0 y el t_1 , y la cantidad de ninfas presentes en el t_1 , diferenciando si se encontraban en hojas nuevas o viejas; a una muestra de cinco plantas por réplica se le calculó el peso seco total, el peso seco de la parte aérea y la parte terrestre en el t_0 y en el t_1 , y a otras cinco plantas se les contaron la cantidad de tricomas presentes en el envés de las hojas nuevas y viejas antes de dividir los individuos por réplica. El recuento se hizo con ayuda de un estereoscopio Motic® SMZ-168 (Hong Kong, China), promediando en tres hojas por categoría la cantidad de tricomas presentes en dos cuadros de 1 cm².

Análisis estadístico. A cada conjunto de datos a evaluar se le probó el supuesto de normalidad con la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov utilizando un intervalo de confianza del 95 %. Se hizo un análisis de varianza ANOVA simple, modelo I, también con un intervalo de confianza del 95 %, seguido del test de Tukey cuando fue necesario para evaluar si existían diferencias en: 1) el número de tricomas presentes en *O. floribundus* en hojas nuevas y en hojas viejas; 2) el número de ninfas reportadas en el t_1 en hojas nuevas y el número de ninfas en hojas viejas; 3) el número de ninfas reportadas en el t_1 para los diferentes tratamientos, y 4) el peso seco, la altura y el número de hojas medidos en el t_0 y el t_1 . Para los análisis se utilizó el programa estadístico StatGraphics® Centurion XVI, versión 16.1.11.

Resultados y discusión

Oreopanax floribundus puede ser una planta huésped para la mosca blanca *T. vaporariorum*, ya que se evidenció que después de mover ninfas criadas en una planta huésped conocida (*S. quitoense*) a una planta alternativa, en este caso la planta de estudio, los individuos aceptaron la planta alternativa como su huésped, lo cual se evidenció con la alimentación y la oviposición, que se toma como la deposición de uno o más huevos (Schoonhoven, et al., 2005), o la oviposición sostenida en el tiempo (César, et al., 2011). En este caso se evidenció la oviposición hasta de una segunda generación, ya que en el tiempo de evaluación t_1 se encontraron ninfas de los últimos estadios, así como huevos recién puestos. Esta aceptación puede estar relacionada con el hecho de que *T. vaporariorum* es un insecto polífago y, tal como lo demostraron Tapia, et al. (2015) en su investigación, los generalistas poseen habilidades que les permiten aprender y hacer uso de nuevos huéspedes fácilmente.

Se encontraron diferencias en la densidad de los tricomas presentes en el envés de las hojas nuevas y viejas de *O. floribundus* ($F_{1,9} = 80,29$; $p < 0,05$), siendo significativamente



Figura 1. Etapas de desarrollo del experimento. a) Montaje de los invernaderos. b) Infestación con ninfas de *T. vaporariorum* de plantas de *O. floribundus*. c) Presencia de los primeros adultos después de la infestación en el tratamiento 3

más abundantes en las hojas nuevas (Figura 2a). Asimismo, se encontraron diferencias entre el número de ninfas presentes en las hojas nuevas y las hojas viejas tanto en el tratamiento dos ($F_{1,59} = 10,31$; $p < 0,05$) como en el tratamiento tres ($F_{1,59} = 24,31$; $p < 0,05$), dado que el mayor número de posturas se presentó en las hojas viejas que presentaban menor densidad de tricomas (Figura 2b-c). Estos resultados concuerdan con lo encontrado por **Oriani & Vendramim (2010)** en diferentes genotipos de tomate, en los cuales encontraron que a mayor número de tricomas menor era el atractivo para la oviposición de la mosca blanca *B. tabaco*. Sin embargo, en el caso de la planta del algodón, **Boiça Júnior, et al. (2007)** encontraron que en las variedades estudiadas se presentó una mayor oviposición en genotipos de hojas pubescentes. Los tricomas son estructuras que pueden dificultar el movimiento y el comportamiento de la alimentación, especialmente de insectos pequeños, y se la ha reportado como una estrategia de resistencia constitutiva de las plantas para evitar el ataque de herbívoros (**Schoonhoven, et al., 2005**), sin embargo, no es la única variable a tener en cuenta para determinar la preferencia de un insecto por una planta. Es necesario profundizar en el papel de las toxinas o metabolitos secundarios que la planta puede producir y los mecanismos de defensa con los que cuenta el insecto (**Boiça Júnior, et al., 2007**), pues en los tejidos jóvenes, en general, se hallan mayores concentraciones de toxinas y antimetabolitos, lo que lleva a que los insectos polívoros prefieran tejidos más viejos, ya que en muchas ocasiones no cuentan con los mecanismos necesarios para asimilar y expulsar dichas toxinas (**Cardona & Mesa, 2011**).

Se encontraron diferencias en el número de ninfas hallado en las plantas sometidas a los diferentes tratamientos ($F_{2,87} = 31,39$; $p < 0,05$) (Figura 3), lo cual es importante, ya que de no haberlas encontrado no se podría comparar el efecto de la cantidad de individuos de mosca blanca en el crecimiento de la planta de estudio. Cabe resaltar que en la evaluación realizada en el t1 solo se contaron las ninfas que se encontraban entre los estadios II y IV y que correspondían a la primera generación de las ninfas introducidas en el t0, ya que, además del elevado número de adultos en el T3, se evidenció la presencia de un gran número de huevos e individuos de estadio I (Figura 1c).

En cuanto al crecimiento que presentaron las plantas con los diferentes tratamientos, no se encontraron diferencias en el peso seco total ($F_{3,19} = 1,72$; $p = 0,235$), el peso seco de la parte aérea ($F_{3,19} = 2,6$; $p = 0,088$) y el peso seco de la raíz ($F_{3,19} = 2,38$; $p = 0,107$) de las plantas en el t0 y el t1, y, aunque sí hubo un aumento del peso seco en el tiempo, este no se vio influenciado por la presencia de las moscas blancas (Figura 4). El peso seco es una de las variables más confiables para evaluar el crecimiento de una planta (**Cardona & Mesa, 2011**; **Suárez, et al., 2015**), sin embargo, ya que las plantas con las cuales se trabajó hacen parte del activo biológico del JBB, su número fue muy bajo, por lo cual este resultado debió complementarse con la altura y el número de hojas antes de plantear conclusiones.

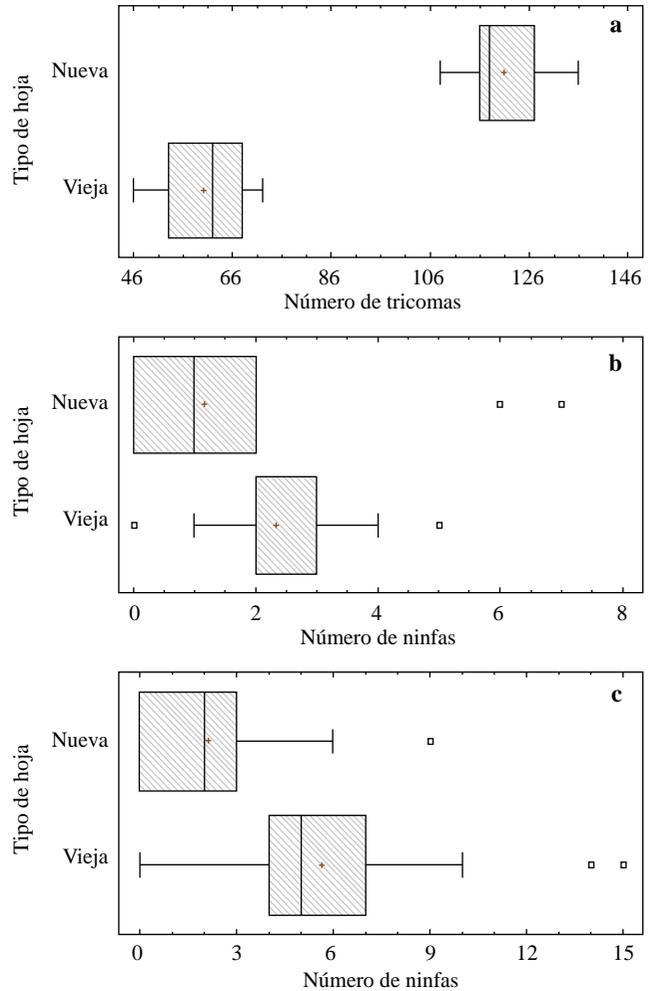


Figura 2. Tendencia central y dispersión de: **a)** número de tricomas en *O. floribundus* en hojas nuevas y viejas; **b)** número de ninfas de *T. vaporariorum* presentes en hojas nuevas y viejas con el T2; **c)** número de ninfas de *T. vaporariorum* presentes en hojas nuevas y viejas con el T3

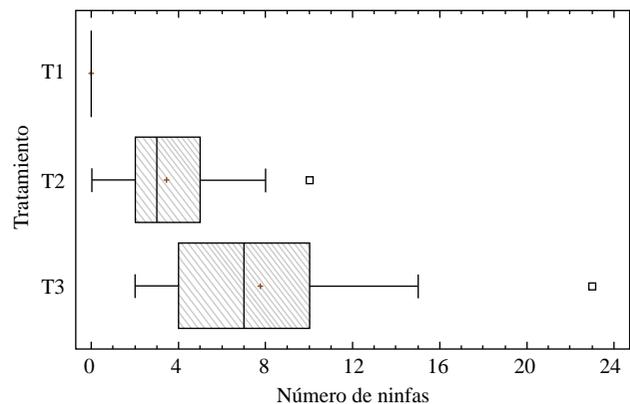


Figura 3. Tendencia central y dispersión del número de ninfas presentes en el tiempo de evaluación t1 (dos meses después de la infestación) con los diferentes tratamientos (T). T1: sin infestación, T2: baja infestación (5 ninfas por planta), T3: alta infestación (200 ninfas por planta)

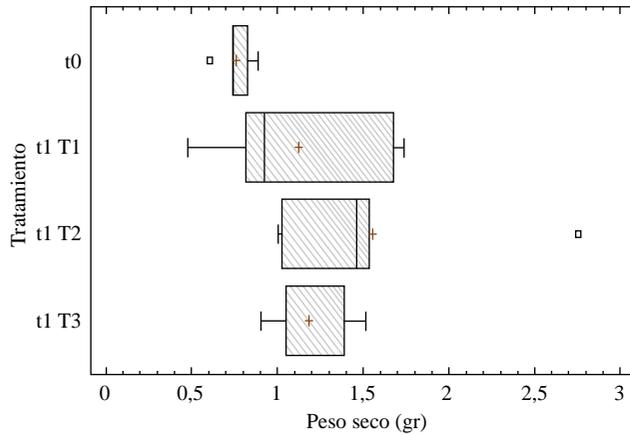


Figura 4. Tendencia central y dispersión del peso seco en plantas de *O. floribundus* sometidas a tres tratamientos (T) con diferente grado de infestación de ninfas de *T. vaporariorum* evaluadas en el tiempo (t). t0: promedio del peso seco de las plantas en el tiempo inicial; t1: dos meses después de la infestación; T1: sin infestación; T2: baja infestación (5 ninfas por planta); T3: alta infestación (200 ninfas por planta)

La altura y el número de hojas se compararon entre las plantas de cada tratamiento, no entre tratamientos, ya que se contaba con el registro de los individuos en el tiempo, lo cual permite evaluar mejor el cambio. En cuanto al número de hojas, no se presentaron diferencias en el T1 ($F_{1,58}=0,99$; $p=0,32$) ni en el T3 ($F_{1,58}=0,14$; $p=0,71$), en tanto que en el T2 sí se encontraron diferencias ($F_{1,58}=7,97$; $p=0,006$), al aumentar en una hoja, en promedio, durante el tiempo evaluado (Figura 5). Debe tenerse en cuenta que el mantener el mismo número de hojas a lo largo del tiempo también puede deberse a su recambio, ya que continuamente brotan nuevas hojas, al tiempo que se caen las más viejas. Sin embargo, los datos sustentan los resultados relacionados con el peso en el sentido de que el grado de infestación de la mosca blanca no afectó el desarrollo de las plantas.

Por último, en cuanto a la altura no se presentaron diferencias con el T1 ($F_{1,58}=2,92$; $p=0,09$), pero sí con el T2 ($F_{1,58}=21,21$; $p<0,05$) y el T3 ($F_{1,58}=9,15$; $p=0,003$). En este sentido, se evidenció que la altura parece ser la variable más sensible al cambio en el crecimiento de las plantas a lo largo del tiempo, ya que en los tratamientos con infestación media y alta se presentó un mayor crecimiento que en el tratamiento control (Figura 6). Con estos resultados y en el marco del tiempo de evaluación del cambio en el crecimiento de las plantas de *O. floribundus*, se podría concluir que esta especie es tolerante a *T. vaporariorum*, entendiendo como tolerancia una respuesta expresada en la fisiología de los metabolitos primarios que le permite a la planta compensar el daño ocasionado por herbívoros (Schoonhoven, et al., 2005; Stout, 2013).

En conclusión este trabajo aportó evidencia que puede catalogar a *O. floribundus* como una planta hospedera de *T. vaporariorum*. Esta planta presenta una resistencia constitutiva que disminuye la oviposición en hojas nuevas, lo

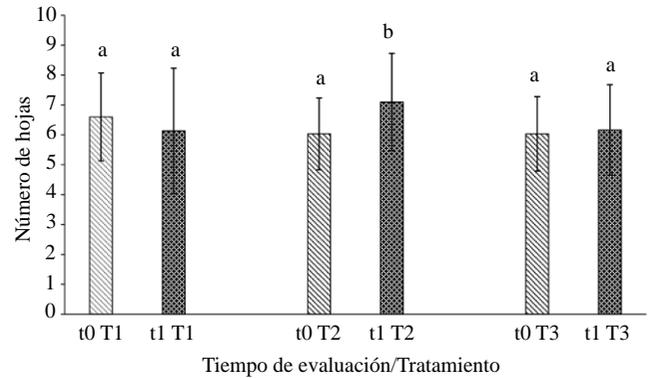


Figura 5. Número de hojas presentes en plantas de *O. floribundus* sometidas a tres tratamientos (T) con diferente grado de infestación de ninfas de *T. vaporariorum* evaluadas en el tiempo (t). Las letras iguales indican que no hubo diferencias significativas en cada tratamiento según el Test de Tukey ($p<0,05$). Las líneas verticales indican la desviación estándar. t0: tiempo inicial; t1: dos meses después de la infestación; T1: sin infestación; T2: baja infestación (5 ninfas por planta); T3: alta infestación (200 ninfas por planta)

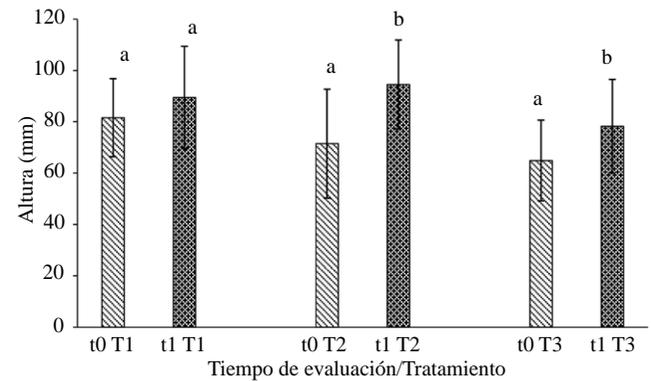


Figura 6. Altura de las plantas de *O. floribundus* sometidas a tres tratamientos (T) con diferente grado de infestación de ninfas de *T. vaporariorum* evaluadas en el tiempo (t). Las letras iguales indican que no hubo diferencias significativas en cada tratamiento según el test de Tukey ($p<0,05$). Las líneas verticales indican la desviación estándar. t0: tiempo inicial; t1: dos meses después de la infestación; T1: sin infestación; T2: baja infestación (5 ninfas por planta); T3: alta infestación (200 ninfas por planta)

que lleva a este insecto hacer uso de las hojas viejas ya que presentan menos resistencia a la oviposición al presentar menos tricomas en el envés de la hoja. Queda planteada la necesidad de profundizar más en la posible tolerancia de *O. floribundus* a *T. vaporariorum*, lo cual es favorable para la propagación masiva de esta especie, pues con niveles controlados de la plaga, se evitarían pérdidas del material propagado y podrían emplearse técnicas poco invasivas de control, como el uso de enemigos naturales.

Agradecimientos

Al Jardín Botánico de Bogotá por la financiación de la investigación; a la Dra. Helena Brochero, profesora de la

Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, y al ingeniero Álvaro Perdomo, investigador en fitosanidad del Jardín Botánico de Bogotá, por su asesoría en diferentes etapas de la investigación; al estudiante de biología John Sebastián Muñoz y a la operaria Ana Milena Torres por el apoyo en la recopilación de datos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Bernal, R., Galeano, G., Rodríguez, A., Sarmiento, H., Gutiérrez, M.** (2017). Nombres Comunes de las Plantas de Colombia. Fecha de consulta: 24 de septiembre de 2018. Disponible en: <http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/es/nombrescomunes/resultados/ncomun/mano%20de%20oso/>
- Boiça Júnior, A. L., Campos, Z. R., Lourenção, A. L., Campos, A. R.** (2007). Adult attractiveness and oviposition preference of *Bemisia tabaci* (Genn.) (Homoptera: Aleyrodidae) B-biotype in cotton genotypes. *Scientia Agricola*, **64** (2): 147-151. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000200007>
- Carapia, V. E., & Castillo-Gutiérrez, A.** (2013). Estudio Comparativo sobre la Morfología de *Trialeurodes Vaporariorum* (Westwood) y *Bemisia Tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae). *Acta Zoológica Mexicana*, **29** (1): 178-193.
- Cardona, C. & Mesa, N. C.** (2011). Resistencia varietal a insectos. Palmira: Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. p. 144.
- Cardona, C., Rodríguez, I., Bueno, J., Tapia, X.** (2005). Biología y manejo de la mosca blanca *Trialeurodes vaporariorum* en habichuela y frijol. Cali: Publicación CIAT. Fecha de consulta: 24 de septiembre de 2018. Disponible en: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=ZERwcoGwY24C&oi=fnd&pg=PA1&dq=Biología+y+Manejo+de+la+Mosca+Blanca+Trialeurodes+vaporariorum+en+Habichuela+y+Frijol&ots=ElI5ajKop2&sig=jp2tE3X3If7ob2SsmKAtErTjc0EA>
- Castillo, A.** (2007). La investigación. Un aporte continuo del programa hojas verdes para la restauración ecológica del bosque andino en el Parque Ecológico la Poma. Fecha de consulta: 28 de agosto de 2017. Disponible en: <http://www.caem.org.co/img/Castillo.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE.** (2014). El cultivo del tomate de mesa bajo invernadero, tecnología que ofrece mayor producción, calidad e inocuidad del producto. Fecha de consulta: 28 de agosto de 2017. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/sipsa/insumos_factores_de_produccion_dic_2014.pdf
- Estrada, J. J. P.** (2012). Guía para la construcción de invernaderos o fitotoldos. FAO Bolivia. p. 80.
- FAO.** (2002). El cultivo protegido en clima mediterráneo. Estudio FAO, producción y protección vegetal, 90. Roma. Fecha de consulta: 28 de agosto de 2017. Disponible en: <https://doi.org/ISBN%2092-5-302719-3>
- FAO.** (2017). Plagas y enfermedades de las plantas: FAO in Emergencias. Fecha de consulta: 26 de noviembre de 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/emergencias/tipos-de-peligros-y-de-emergencias/plagas-y-enfermedades-de-las-plantas/es/>
- IRAC.** (2017). *Trialeurodes Vaporariorum*. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. Disponible en: <http://www.irac-online.org/pests/trialeurodes-vaporariorum/>
- JBB.** (2016). Sistema de información para la gestión del arbolado urbano de Bogotá (Documento interno). Bogotá D.C.
- López, S. N. & Segade, G.** (2017). Moscas blancas y enemigos naturales asociados al cultivo de naranja bajo dos tipos de manejo sanitario en San Pedro, provincia de Buenos Aires. *Revista de La Sociedad Entomológica Argentina*, **76**: 11-21.
- Manzano, M. R. & van Lenteren, J. C.** (2009). Life history parameters of *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood) (Hemiptera: Aleyrodidae) at different environmental conditions on two bean cultivars. *Neotropical Entomology*, **38** (4): 452-458.
- Martin, J. H.** (2005). Whiteflies of Belize (Hemiptera: Aleyrodidae) Part 2—a review of the subfamily Aleyrodinae Westwood. *Zootaxa*, **1098**: 1-116. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. Disponible en: <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Martin2005a.pdf>
- Monroy, L. M. R.** (2010). Manejo de las plagas y enfermedades en invernaderos. *Tecnoagro*, **54**. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. Disponible en: <https://tecnoagro.com.mx/revista/2009/no-54/manejo-de-las-plagas-y-enfermedades-en-invernaderos/>
- Mound, L. & Halsey, S.** (1978). Whitefly of the world a systematic catalogue of the Aleyrodidae (Homoptera) with host plant and natural enemy data. Richard Clay and Company Limited., Editors (William Cl). Great Britain. p. 340.
- Navarro, V. R.** (Editor). (2005). Manejo integrado de las moscas blancas. Bogotá, D.C Colombia: Produmedios. **41**: 60.
- Navas-Castillo, J., Fiallo-Olivé, E., Sánchez-Campos, S.** (2011). Emerging Virus Diseases Transmitted by Whiteflies. *Annual Review of Phytopathology*, **49**: 219-248. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095235>
- Oriani, M. A. de G. & Vendramim, J. D.** (2010). Influence of trichomes on attractiveness and ovipositional preference of *Bemisia tabaci* (Genn.) B biotype (Hemiptera: Aleyrodidae) on tomato genotypes. *Neotropical Entomology*, **39** (6): 1002-1007. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000100006>
- Ovčarenko, I., Lindström, L., Saikkonen, K., Jauhiainen, L., Kaseva, J., Vänninen, I.** (2016). Preconditioning of the generalist herbivore *Trialeurodes vaporariorum* to greenhouse monocultures and its subsequent performance on wild polycultures. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, **159** (1): 1-16. <https://doi.org/10.1111/eea.12428>
- Quintero, C., Rendón, F., García, J., Cardona, C., López-Avila, A., Hernández, P.** (2001). Especies y biotipos de moscas blancas (Homoptera: Aleyrodidae) en cultivos semestrales de Colombia y Ecuador. *Revista Colombiana de Entomología*, **27** (1-2): 27-31.
- Rak, N. & Litvinova, S.** (2010). Hazardous organisms migration and acclimatization during the plant introduction in the far North Russia greenhouses. *Hortus Botanicus*, **5**: 1-5. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. Disponible en: <http://hb.karelia.ru>
- Rivera-Díaz, O. & Celis, M.** (2015). *Oreopanax*. En R. Bernal, S. Gradstein, & M. Celis (Editores). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Fecha de consulta: 10 de octubre de 2017. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co/es/resultados/especie/Oreopanax%20floribundus/>

- Roditakis, N. E.** (1990). Host plants of greenhouse whitefly *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Homoptera: Aleyrodidae) in Crete. Attractiveness and impact on white-fly life stages. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. **31** (3): 217-224. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(90\)90221-X](https://doi.org/10.1016/0167-8809(90)90221-X)
- Rosell, R. C., Lichty, J. E., Brown, J. K.** (1995). Ultrastructure of the mouthparts of adult sweetpotato whitefly, *Bemisia tabaci* Gennadius (Homoptera: Aleyrodidae). *Int. J. Insect Morphol. & Embryol.* **24** (3): 297-306.
- Schoonhoven, L., van Loon, J., Dicke, M.** (2005). *Insect-Plant Biology*. Great Britain: Oxford University Press. p. 421.
- Stout, M. J.** (2013). Reevaluating the conceptual framework for applied research on host-plant resistance. *Insect Science*. **20** (3): 263-272. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12011>
- Suárez, L., Díaz, M., Rodríguez, D., Cantor, F.** (2015). Medición indirecta de la tasa de consumo de adultos e inmaduros de *Trialeurodes vaporariorum* (Hemiptera: Aleyrodidae) sobre frijol. *Acta Biológica Colombiana*. **20** (3): 99-109. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n3.44073>
- Tapia, D. H., Silva, A. X., Ballesteros, G. I., Figueroa, C. C., Niemeyer, H. M., Ramírez, C. C.** (2015). Differences in learning and memory of host plant features between specialist and generalist phytophagous insects. *Animal Behaviour*. **106**: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2015.04.027>
- Vet, L. E. M., Lenteren, J. C., Woets, J.** (1980). The parasite-host relationship between *Encarsia formosa* (Hymenoptera: Aphelinidae) and *Trialeurodes vaporariorum* (Homoptera: Aleyrodidae). *Zeitschrift Für Angewandte Entomologie*. **90** (1-5): 26-51. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.1980.tb03499.x>
- Vilaseca, C. J., Baptiste, L. G., López-Ávila, A.** (2008). Incidencia de los márgenes sobre el control biológico natural de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) en cultivos de arroz. *Corpoica- Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. **9** (2): 45-54.

Evaluación de resistencia de cultivares de soya (*Glycine max* L.) a aislamientos de *Phytophthora sojae* Kaufm. & Gerd. de la altillanura colombiana

©Nathali López-Cardona*, ©Marcela López-Casallas

Centro de Investigación La Libertad, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA, Villavicencio, Meta, Colombia

Resumen

Una de las enfermedades que más afecta el cultivo de la soya es causada por *Phytophthora sojae*, un patógeno del suelo que pudre el tallo y la raíz de las plantas, ocasionando importantes pérdidas económicas para los productores. En la Orinoquia colombiana el patógeno se ha visto favorecido por la interacción de las características de los suelos ácidos y con problemas de drenaje, la introducción de variedades altamente susceptibles, la siembra directa y condiciones ambientales muy favorables para el desarrollo de la enfermedad. Dado que el mejor método de manejo de la enfermedad se logra con el uso de variedades tolerantes o resistentes, se evaluó la reacción a la infección con aislamientos locales de *P. sojae* en 18 cultivares de soya. Las pruebas de patogenicidad en los materiales de soya de la oferta genética de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia) evidenciaron la posibilidad de seleccionar fuentes de resistencia en la variedad Corpoica La Libertad 4, la cual demostró resistencia moderada específica frente a la virulencia de los aislamientos inoculados. La Línea Élite 105, desarrollada en el programa de mejoramiento del 2016, la variedad Corpoica Orinoquia 3, Superior 6 y la variedad introducida BRS_Corisco, fueron altamente susceptibles a *P. sojae*. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Pudrición radicular; Soya; Virulencia; Resistencia.

Evaluation of soybean (*Glycine max* L.) cultivars resistance to *Phytophthora sojae* isolates from the Colombian eastern high plains

Abstract

One of the most limiting diseases of soybean crop is caused by *Phytophthora sojae*, a soil pathogen that causes stem and root rot resulting in important economic losses for producers. In the Colombian Orinoquia, the pathogen has been favored by the intrinsic soil properties such as low pH and drainage impediments, as well as the introduction of highly susceptible varieties, direct sowing and highly favorable environmental conditions for the development of the disease. Eighteen soybean cultivars were evaluated for their reaction to the infection with local *P. sojae* isolates as the disease is managed by using tolerant and/or resistant varieties. Pathogenicity tests on soybean materials from the Colombian Agricultural Research Corporation (Agrosavia) indicated potential sources of resistance in the variety Corpoica La Libertad 4, which showed a moderate specific resistance to the virulence of the inoculated isolates. The Elite Line 105, developed in 2016 by Agrosavia, the varieties Corpoica Orinoquia 3, Superior 6 and the introduced variety BRS_Corisco, were highly susceptible to *P. sojae*. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Root rot; Soybean; Virulence; Resistance.

Introducción

Una de las enfermedades más limitantes del cultivo de la soya es causada por *Phytophthora sojae* Kaufm. & Gerd, un patógeno del suelo que pudre el tallo y la raíz de la planta. Entre 1996 y 2009 se la consideró como la segunda enfermedad más limitante de la producción de soya a nivel mundial y causante de pérdidas que fluctuaban entre 4 y 100 %, es decir, cifras anuales por encima del billón de dólares (Tyler, et al., 2007; Sugimoto, et al., 2012; Schneider, et al., 2016). En Colombia se reportó por primera vez en el

Valle del Cauca en 1985 (Granada & Varon de Agudelo, 1986) y posteriormente en los Llanos Orientales, en 1991 (Montoya, 1991). Desde entonces, la interacción entre las características de los suelos ácidos y con problemas de drenaje, la introducción de la variedad de soya Orinoquia 3,

*Correspondencia:

Nathali López-Cardona; nlopezc@corpoica.org.co

Recibido: 10 de julio de 2018

Aceptado: 4 de septiembre de 2018

Editor: Jairo Castaño Zapata

altamente susceptible a la enfermedad, la popularización de la siembra directa y la aparición de condiciones ambientales muy favorables, han sido motivo de alarma sobre el impacto económico que la enfermedad puede tener en los cultivos de soya de la Orinoquia colombiana (Tapiero, 2001).

Dada la importancia de la enfermedad y al hecho de que en la agricultura moderna la práctica más eficiente para la reducción de pérdidas en las cosechas ocasionadas por *P. sojae* ha sido la utilización de variedades con genes de resistencia, las investigaciones recientes se han enfocado en identificar ocho alelos de genes *Rps* con la habilidad diferencial para reconocer la virulencia de poco más de las 45 razas del patógeno encontradas hasta ahora en el mundo (Schneider, et al., 2016). La caracterización de la población de *P. sojae* según los ecosistemas es indispensable para identificar los genes de resistencia más apropiados para el mejoramiento genético de la soya.

Las poblaciones de este oomicete están constituidas por numerosas razas fisiológicas o patogénicas, las cuales se clasifican con base en su fórmula de virulencia en un conjunto de variedades de soya diferenciales (Keeling, 1979; Layton & Khun, 1990; Schmitthener, et al., 1994; Wagner & Wilkinson, 1992). Catorce genes *Rps* se han asignado a ocho loci en el genoma de la soya, con una serie alélica en dos de ellos: *Rps1* (1a, 1b, 1c, 1d y 1k), *Rps2*, *Rps3* (3a, 3b y 3c), *Rps4*, *Rps5*, *Rps6*, *Rps7* (Dorrance, et al., 2004) y *Rps8* (Burnham, et al., 2003; Gordon, et al., 2006). Recientemente se describieron dos nuevos genes, uno de los cuales se ha designado provisionalmente como *RpsYu25* (Sun, et al., 2011); el otro se halló en el cultivar japonés Waseshiroge. Los dos son alelos de *Rps1*, o se ubican en un locus estrechamente vinculado con un grupo de genes (Sugimoto, et al., 2012). Entre estos genes *Rps* solo cinco se han utilizado ampliamente en cultivares de soya: *Rps1a*, *Rps1c*, *Rps1k*, *Rps3a* y *Rps6* (Abney, et al., 1997; Dorrance, et al., 2003). Con el fin de estandarizar los diversos aspectos de tales hallazgos y facilitar la notificación de resultados, la comunidad científica ha optado por la caracterización del patógeno en términos de patotipos, o fórmulas de virulencia, en lugar de razas, y se ha adoptado el uso de códigos octales para comparar los resultados (Dorrance, et al., 2003; Nelson, et al., 2008).

En el 2001, Agrosavia logró los primeros avances en la metodología de aislamiento y conservación del patógeno en el Centro de Investigación La Libertad. Posteriormente, se aplicaron las técnicas desarrolladas por el laboratorio de Scot Abney de la Universidad de Purdue (EE.UU.) (Tapiero, 2001). En los estudios de Tapiero (2004) y Tapiero, et al. (2006), se sugiere que los aislamientos colombianos de *P. sojae* se clasifican en cuatro grupos según su virulencia: la fórmula más común de virulencia es 3a 3c 5 6 7, correspondiente a 34 % de los aislamientos, seguida por 2 3c 5 6 7, con el 25 %, por 2 3c 6 7, con el 22 % y por 2 3a 3c 5 6 7 con el 9 %. Los trabajos de Garnica, et al. (2007) confirmaron que la población colombiana de *P. sojae* es muy poco diversa,

no presenta polimorfismos, y registra valores relativamente bajos de frecuencia de heterocigotos, así como en el índice de Shannon, indicadores que establecen la diversidad genética dentro de una población o entre poblaciones.

Actualmente, se desconoce en el país la resistencia a *P. sojae* de las variedades y líneas promisorias de soya que hacen parte de la oferta genética de Agrosavia, por lo cual se desarrolló este trabajo de investigación.

Materiales y métodos

Inóculo de *P. sojae*. Se emplearon dos aislamientos puros, con los códigos 5057301 y 5057302, para determinar la resistencia en los cultivares de soya con edades entre 10 y 15 días en medio agar V8. Los aislamientos se obtuvieron de la colección de oomicetes recolectados en el 2016 en el municipio de Puerto López, vereda Carubare, en la Estación Experimental Taluma en el Meta. Las cepas pertenecen a zonas representativas de la producción de soya de la altillanura del Meta, en la que previamente se habían hecho muestreos y estudios que demuestran la ausencia de diversidad genética en la población colombiana de *P. sojae* (Garnica, et al., 2007). En la selección de las cepas fue determinante la alta virulencia en las variedades Orinoquia 3 y Williams, consideradas como altamente susceptibles al patógeno.

Las cepas se identificaron por secuenciación de productos de la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) con el uso de los cebadores universales ITS4/ITS5 de la región ITS del ADN nuclear ribosómico (White, et al., 1990). Se hizo el análisis y la edición de las secuencias de la región ITS empleando el programa Geneious 8.1 (Geneious biologics). Las secuencias de consenso generadas a partir del ensamblaje de las reacciones 5' y 3' secuenciadas se analizaron con la herramienta BLAST® en la base de datos del *National Center for Biotechnology Information*. Los aislamientos reportados mostraron una homología de 97 y 99 % con *P. sojae*.

Fórmulas de virulencia. La inoculación de los aislamientos 5057301 y 5057302 se hizo con la metodología de palillos colonizados desarrollada por Keeling (1982) y modificada por Yorinori (1996). Se inocularon los aislamientos 5057301 y 5057302 en 14 líneas diferenciales de soya: Unión (*Rps1a*), Haro 13 (*Rps1b*), L 75 – 3735 (*Rps1c*), Haro 16 (*Rps1d*), Williams 82 (*Rps1k*), L 76 – 1988 (*Rps2*), PI – 171442 (*Rps3a*), L 91 – 8347 (*Rps3b*), L 92 – 7857 (*Rps3c*), L 85 – 3059 (*Rps5*), Altona (*Rps6*), Harosoy (*Rps7*), Williams (*Rps*), y Sloan (*Rps*). La caracterización se hizo en términos de fórmula de virulencia en lugar de razas, empleando códigos octales para que los resultados fueran comparables y con el fin de estandarizar y facilitar la notificación de resultados (Dorrance, et al., 2003; Nelson, et al., 2008). Bajo las condiciones del Centro de Investigación La Libertad (altitud de 336 msnm, 04° 03' latitud norte y 73° 29' longitud oeste, temperatura máxima promedio de 30,9 °C, temperatura mínima promedio de 22,01 °C, y humedad relativa promedio de 81,45 %), y utilizando casa de malla,

se sembraron 12 semillas de las 14 variedades diferenciales en macetas que contenían suelo encalado con corrección de pH extraído del mismo centro de investigación. Estas se inocularon con dos aislamientos de *P. sojae* (cepas 5057301 y 5057302) a los 10 a 12 días de edad, y ya inoculadas se mantuvieron en condiciones de cámara húmeda durante 48 horas y se evaluaron diariamente hasta la aparición de síntomas. La clasificación de las reacciones a cada tratamiento se basó en la metodología descrita por **Yorinori** (1996) y **Embrapa** (2016). Las plantas se inocularon tres a cuatro veces para confirmar el resultado.

Cultivares de soya. Se evaluaron 18 líneas de soya: tres de la nueva oferta genética del programa de mejoramiento de Agrosavia desarrolladas entre el 2012 y el 2017, las líneas 105, 224 y 233. Seis variedades desarrolladas por Embrapa introducidas de Brasil para adaptarlas a las condiciones de la altillanura y el piedemonte del Meta: los cultivares BRS_Gralha, BRS_252, BRS_Serena, BRS_Corisco, BRS 314 y BRS_Barreiras. Nueve variedades liberadas de Agrosavia: Obando, Orinoquia 3, Superior 6, Sabana 7, Taluma 5, Libertad 4, Achagua 8, Guayuriba 9 e Iraca 10, las cuales conforman actualmente la oferta genética de soya de Agrosavia, y la Panorama 29 como testigo comercial. Se sembraron 15 semillas de todos los materiales de soya en macetas que contenían aproximadamente 2 kg de suelo, suficientes para obtener 10 a 15 plantas, en promedio, para la inoculación. De 11 a 15 días después de la siembra, las plántulas se inocularon mediante el método de palillos colonizados a 1 cm por debajo del cotiledón, aproximadamente. Después de la inoculación las plantas se mantuvieron en cámara húmeda durante 48 horas y se evaluaron diariamente hasta la aparición de síntomas. Las plantas se inocularon entre 3 y 4 veces para confirmar el resultado.

Calificación de los materiales. Las lecturas de las reacciones se hicieron diariamente hasta la aparición de síntomas siguiendo los criterios de clasificación de **Yorinori** (1996) y **Embrapa** (2016): resistente (R) si había entre 0 y 25 % de plantas muertas; moderadamente resistente (MR), entre 26 y 50 % de plantas muertas, y susceptible (S), más de 50 % de plantas muertas.

Análisis estadístico. Se empleó un diseño completamente al azar con dos aislamientos de *P. sojae*, 18 materiales de soya evaluados (cada uno con 8 a 12 unidades experimentales) y tres repeticiones. Los datos se analizaron con el programa estadístico JMP® SAS, versión 13.1.0.

Resultados y discusión

Determinación de las fórmulas de virulencia. Además de los testigos susceptibles Williams y Sloan (genes *Rps*), todos los aislamientos infectaron por lo menos a ocho variedades diferenciales de soya. Ningún aislamiento logró infectar la totalidad de variedades ni la portadora de los genes 1a, 1b, 1c, 1d, 1k y 3b. Las variedades con los alelos *Rps* 2, 3a, 3c, 5, 6 y 7, fueron sensibles a los dos aislamientos de *P. sojae*, los cuales correspondían a la fórmula de virulencia 2 3a 3c 5 6 7 (Tabla 1).

Según **Tapiero** (2004), la patogenicidad de una colección de 40 aislamientos colombianos de *P. sojae* obtenidos de las zonas más representativas del cultivo (Valle del Cauca y Llanos Orientales), caracterizada mediante inserción en el hipocótilo en 14 variedades diferenciales, indicó que los aislamientos del Valle presentaban dos fórmulas de virulencia: una patogénica frente a *Rps* 2 3c 5 6 7 y otra que, además, lo era a *Rps* 1b 3a 3b. En los Llanos, los aislamientos provenientes de Villavicencio se diferencian de los de Granada porque, además de ser patogénicos frente a *Rps* 2 3c 6 7, también lo son frente a *Rps* 3a. Los dos aislamientos evaluados fueron patogénicos en variedades diferenciales que contenían el gen 3a y constituían buenos representantes de la población de *P. sojae* en los Llanos Orientales. El conocimiento sobre la composición de la virulencia de *P. sojae* es fundamental para determinar el programa de manejo apropiado de la resistencia genética a este oomycete. Por lo menos seis variedades diferenciales, además de los testigos, fueron sensibles al ataque del patógeno, lo que indica que la capacidad de virulencia de *P. sojae* en la altillanura del Meta superpone individualmente la resistencia combinada de por lo menos seis genes de resistencia específicos para este patógeno, los cuales deben tenerse en cuenta en el programa de mejoramiento genético de soya en Agrosavia.

Tabla 1. Fórmula de virulencia asignada a los aislamientos inoculados de *Phytophthora sojae* en variedades diferenciales de soya con presencia de genes *Rps*

Diferencial	<i>Rps</i>	Calificación de aislamientos ¹	
		Cepa 5057301	Cepa 5057302
Unión	1a	MR	MR
Haro 13	1b	MR	MR
L 75 – 3735	1c	MR	MR
Haro 16	1d	MR	MR
Williams 82	1k	MR	MR
L 76 – 1988	2	S	S
Pi – 171442	3a	S	S
L 91 – 8347	3b	MR	MR
L 92 – 7857	3c	S	S
L 85 – 3059	5	S	S
Altona	6	S	S
Harosoy	7	S	S
Williams	<i>Rps</i>	S	S
Sloan	<i>Rps</i>	S	S
Fórmula de virulencia		2 3a 3c 5 6 7	2 3a 3c 5 6 7

¹ Los materiales se calificaron como: resistentes (R), con 0 a 25 % de plantas muertas; moderadamente resistentes (MR), con 26 a 50% de plantas muertas, y susceptibles (S), con más de 50 % de plantas muertas.

Generalmente, cuando una enfermedad introducida en una región o país, se encuentra una raza predominante. Por ejemplo, en Estado Unidos y en Canadá prevaleció la fórmula *Rps7* (raza 1) hasta la década de 1990 (Anderson & Buzzell, 1992; Laviolette & Athow, 1981; Schmitthenner, et al., 1994). Tanto en Argentina como en Brasil, los primeros aislamientos de *P. sojae* encontrados en esa misma década pertenecieron exclusivamente a la fórmula *Rps 7* (Barreto, et al., 1995; Costamilan & Bonato, 1996). Sin embargo, hay evidencia de que aparecieron nuevos patotipos a medida que la enfermedad adquirió importancia en el cultivo y se fueron liberando variedades resistentes con genes *Rps*. Es así como en la zafra 2013-2014 en el sudeste bonaerense de Argentina, se determinaron 12 patotipos distintos en 18 aislamientos, ninguno de los cuales correspondió a la raza 1 (Grijalba, et al., 2015).

En Heilongjiang, China, con la caracterización fisiológica de *P. sojae*, se identificaron ocho fórmulas de virulencia, incluidas las 1, 3, 4, 5, 9, 13, 44 y 54. De la fórmula *Rps 7* (antes raza 1) se identificaron 56 aislamientos que representaban el 60 % de la población del patógeno. La fórmula *Rps 1a*, *Rps 7* (raza 3) abarcó 14 aislamientos correspondientes al 7 % de la población del patógeno. Las fórmulas 4, 5, 44 y 54 se identificaron por primera vez en Heilongjiang, cada una representada por dos o tres aislamientos solamente (Zhang, et al., 2010). En cuanto a la reacción diferencial a las ocho fórmulas encontradas de los 62 materiales sembrados comúnmente en la provincia, 44 cultivares fueron resistentes (<30 % de mortalidad) a por lo menos una raza (Zhang, et al., 2010), lo que demostró la resistencia parcial de los cultivares. Por otra parte, en Uruguay el 57 % de los aislamientos de *P. sojae* pertenecían a un único patotipo (fórmula 1b, 3a, 3b, 5) (Sans, et al., 2017). El conocimiento de los patotipos de *P. sojae* predominantes en las regiones productoras de soya resulta fundamental en los programas de mejoramiento para la selección según la resistencia, así como para determinar su compatibilidad con las variedades comerciales.

Evaluación de cultivares de soya por su reacción a *Phytophthora sojae*. En la Tabla 2 se presentan los resultados de significación de la prueba F para las variables de plantas muertas (%) y de líneas de soya evaluadas. Se observaron diferencias significativas ($p < 0,01$) entre los diferentes materiales de soya, la mayoría de los cuales fueron sensibles a *P. sojae*, con valores por encima del 50 % de plantas muertas después de la inoculación. Solamente la variedad Corpoica La Libertad 4 fue moderadamente resistente a los dos aislamientos de *P. sojae* evaluados con las fórmulas de virulencia 2 3a 3c 5 6 7 (Figura 1, Tabla 3).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Tapiero (2004), quien encontró que la variedad Corpoica La Libertad 4 era resistente al patógeno cuando se la inoculaba con aislamientos de las fórmulas de virulencia 2 3c 6 7, 3a 3c 5 6 7 y 2 3c 5 6 7. El autor menciona, asimismo, que la variedad Taluma 5 fue resistente a los aislamientos con las fórmulas 2 3c 6 7 y 3a 3c 5 6 7.

Según Tapiero (2004), la prueba de patogenia con las variedades de soya colombianas evidenció las posibilidades de selección de fuentes de resistencia en la variedad Corpoica La Libertad 4. Las variedades Corpoica Iraca 10 (% de plantas muertas: 61,36) y Corpoica Taluma 5 (% de plantas muertas: 60,22), aunque se comportaron como susceptibles, presentaron valores relativamente bajos de plantas muertas (Tabla 2), razón por la cual deberían ser inoculadas nuevamente con el fin de confirmar su verdadera reacción a *P. sojae*. Cabe resaltar la reacción de los materiales Corpoica Orinoquia 3, la Línea_105, Corpoica Superior 6 y BRS_Corisco, los cuales resultaron altamente sensibles

Tabla 2. Cuadros medios del análisis de varianza y comparación de las medias del porcentaje de plantas muertas por cultivar de soya evaluado

Fuente de variación	G.L.	Cuadros medios	
		A1	A2
Línea	17	435,321*	388,252*
Error	36	171,153	173,619
R2		0,54	0,51

*: nivel de significación de 0,05. R2: coeficiente de determinación. G.L.: Grados de libertad

Tratamiento	Comparación de medias Plantas muertas (%)			
	A1		A2	
Línea_105	94,44	A	70,83	AB
Corpoica Superior 6	93,05	A	69,09	AB
BRS_Corisco	91,54	A	74,26	AB
Corpoica Guayuriba 9	85,83	AB	77,77	AB
Corpoica Orinoquia 3	85,41	AB	95,37	A
BRS_314	76,11	AB	61,80	AB
Williams	75,25	AB	77,77	AB
Corpoica Achagua 8	73,33	AB	66,66	AB
Línea_224	72,87	AB	62,75	AB
Corpoica Sabana 7	72,85	AB	55,41	AB
BRS_Gralha	72,22	AB	68,68	AB
BRS_Barreiras	71,66	AB	73,61	AB
Panorama 29	69,20	AB	68,05	AB
BRS_Serena	68,93	AB	57,57	AB
Línea_233	63,14	AB	64,01	AB
Corpoica Iraca 10	61,36	B	51,28	B
Corpoica Taluma 5	60,22	B	51,66	B
Corpoica Libertad 4	50,00	B	50,00	B

¹ Las medias con la misma letra en sentido vertical fueron estadísticamente iguales ($p < 0,05$, Tukey). Los materiales se calificaron como resistentes (R) con 0 a 25 % de plantas muertas, como moderadamente resistentes (MR) con 26 a 50 % de plantas muertas y como susceptibles (S) con más de 50 % de plantas muertas.

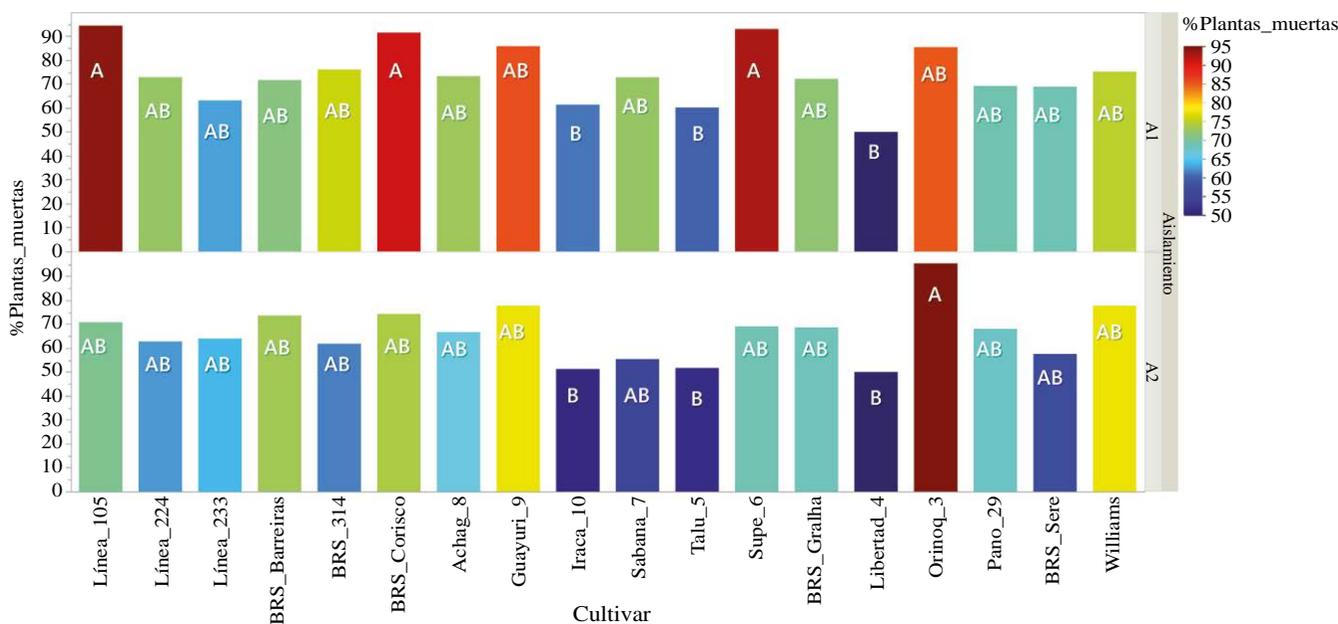


Figura 1. Porcentaje de plantas muertas por aislamiento de *P. sojae* inoculado y cultivares de soja evaluados. Las letras diferentes denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$ en el test de Tukey).

Tabla 3. Reacción de patogenicidad de los aislamientos de *Phytophthora sojae* del departamento del Meta en los cultivares de soja evaluados

Cultivar	Promedio_PM (%)		Calificación ¹
	A1	A2	
Línea_105	94,44	70,83	S
Corpoica Superior 6	93,06	69,09	S
BRS_Corisco	91,54	74,27	S
Corpoica Guayuriba 9	85,83	77,78	S
Corpoica Orinoquia 3	85,42	95,37	S
BRS_314	76,11	61,81	S
Línea_224	75,97	62,75	S
Corpoica Achagua 8	73,33	66,67	S
Corpoica Sabana 7	72,86	55,42	S
BRS_Gralha	72,22	68,69	S
BRS_Barreiras	71,67	73,61	S
Williams	71,21	72,92	S
Panorama 29	69,21	68,06	S
BRS_Serena	68,94	57,58	S
Línea_233	65,56	64,02	S
Corpoica Iraca 10	61,36	51,28	S
Corpoica Taluma 5	60,23	51,67	S
Corpoica Libertad 4	50,00	50,00	MR

¹S: susceptible. MR: moderadamente resistente. PM: plantas muertas. Los materiales se calificaron como resistentes (R) con 0 a 25 % de plantas muertas, como moderadamente resistentes (MR) con 26 a 50 % de plantas muertas y como sensibles (S) con más de 50 % de plantas muertas.

al patógeno con valores promedio de plantas muertas más altos: 95,37 94,44, 93,05 y 91,54 %, respectivamente, cuando fueron inoculados con los aislamientos de *P. sojae* con la fórmula de virulencia 2 3a 3c 5 6 7. En el caso de la Línea_105 y de BRS_Corisco, no se recomienda su liberación como posible oferta genética de Agrosavia debido a su gran sensibilidad al patógeno. Se recomienda no sembrar las variedades Orinoquia 3 y Corpoica Superior 6 en suelos compactados y con problemas de drenaje, ya que dichas condiciones aumentan la predisposición a la presencia de la enfermedad.

Conclusiones

Las pruebas de patogenicidad en los cultivares de soja que conforman la oferta genética de Agrosavia evidenciaron las posibilidades de selección de fuentes de resistencia en el germoplasma de soja, en especial con la variedad Corpoica La Libertad 4, la cual demostró resistencia moderada específica frente a la virulencia de los aislamientos utilizados.

La Línea_105, desarrollada en el esquema de mejoramiento del 2016, y las variedades Corpoica Orinoquia 3, Superior 6 y BRS_Corisco fueron muy susceptibles a *P. sojae*. En el caso de la Línea_105 y de BRS_Corisco, no se recomienda su liberación como nueva oferta genética debido a su gran sensibilidad al patógeno.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR) por la financiación de este trabajo de investigación. Al Dr. Anibal Tapiero de Agrosavia por suministrarnos una copia de las 14 líneas diferenciales de soja y por toda la información compartida. Al Dr.

Samuel Caicedo de Agrosavia por facilitarnos la semilla de los cultivares de soya evaluados. A Andrea Mayorga y Luis Lizarazo de Agrosavia por el apoyo en laboratorio y mantenimiento de las plantas en casa de malla.

Contribución de los autores

Nathali López-Cardona y Marcela López-Casallas contribuyeron a la concepción, realización y desarrollo de la idea de investigación, así como a la obtención de los datos, la interpretación de los resultados, la redacción y la revisión de la versión final.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses que puedan influir en el proceso de publicación, y que el apoyo financiero recibido para la investigación ha sido reconocido.

Referencias

- Abney, T. S., Melgar, J. C., Richards, T. L., Scott, D. H., Grogan, J., Young, J. (1997). New races of *Phytophthora sojae* with *Rps1-d* virulence. *Plant Disease*. **81**: 653-655.
- Anderson, T. R., Buzzell, R. I. (1992). Diversity and frequency of races of *Phytophthora megasperma* f. sp. *glycinea* in soybean fields in Essex County, Ontario, 1990- 1989. *Plant Disease*. **76**: 587-589
- Barreto, D., Stegman de Gurfinkel, B., Fortugno, C. (1995). Races of *Phytophthora sojae* in Argentina and reaction of soybean cultivars. *Plant Disease*. **79**: 599-600.
- Burnham, K. D., Dorrance, A. E., Francis, D. M., Fioritto, R. J., St. Martin, S. K. (2003). *Rps8*, a new locus in soybean for resistance to *Phytophthora sojae*. *Crop Science*. **43**: 101-105.
- Costamilan, L. M., Bonato, E. R. (1996). Identificação de raça de *Phytophthora sojae* e avaliação da resistência de cultivares de soja à podridão da raiz e da haste. *Fitopatologia Brasileira*. **21** (Supl.): 353.
- Dorrance, A. E., Jia, H., Abney, T. S. (2004). Evaluation of soybean differentials for their interaction with *Phytophthora sojae*. *Plant Health Progress Online*. Fecha de consulta: julio de 2018. Disponible en: <http://www.plantmanagementnetwork.org/pub/php/research/2004/psojae>
- Dorrance, A. E., McClure, S. A., De Silva, A. (2003). Pathogenic diversity of *Phytophthora sojae* in Ohio soybean fields. *Plant Disease*. **87**: 139-146.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA. (2016). Moreira, S. R. & Arrabal, C.A. Seleção de linhagens de soja da Embrapa para resistência a doenças: histórico de 2008 a 2014. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Documentos 376. p. 42.
- Garnica, D.P. (2007). Microsatélites en *Phytophthora* spp.: exploración *in silico*-evaluación *in vivo*. Tesis de maestría para optar al título de Magister en Microbiología. Universidad de los Andes. p. 87.
- Gordon, S. G., St. Martin, S. K., Dorrance, A. E. (2006). *Rps 8* maps to a resistance gene rich region on soybean molecular linkage group F. *Crop Science*. **46**: 168-173.
- Granada, G.A. & Varón de Agudelo, F. 1986. Pudrición por *Phytophthora* en soya. *Revista ASIAV A*. Cali No. **19**: 17- 18.
- Grijalba, P., Ridao, A. del C., Steciow, M., Gimenez Zapiola, M. (2015). Razas de *Phytophthora sojae* obtenidas de suelos de la Región Sudeste de la provincia de Buenos Aires. En Libro de resúmenes de XV Jornada Fitosanitarias Argentinas (76). Esperanza, Santa Fe: Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Litoral.
- Keeling, B. L. (1979). *Phytophthora* root and stem rot: Isolation, testing procedures, and seven new physiologic races. In: Proc. World soybeans Res. Conf., II. F.T. Corbin, editors. Westview Press, Boulder, CO. p. 367-370.
- Keeling, B. L. (1982). A Seedling Test for Resistance to Soybean Stem Canker Caused by *Diaporthe phaseolorum* var. *caulivora*. *Phytopathology*. **72**: 807-809.
- Lavolette, F. A., Athow, K. L. (1981). Physiologic races of *Phytophthora megasperma* f. sp. *glycinea* in Indiana, 1973-1979. *Plant Disease*. **65**: 884-885
- Layton, A. C., Kuhn, D. N. (1990). *In planta* formation of heterokaryons of *Phytophthora megasperma* f.sp. *glycinea*. *Phytopathology*. **80**: 602-606.
- Montoya, C. (1991). Pudrición del tallo y raíz de la soya por *Phytophthora* en los Llanos Orientales. ASCOLFI informa, Cali, Colombia, p. 35-38.
- Nelson, B. D., Mallik, I., McEwen, D., Christianson, T. (2008). Pathotypes, distribution, and metalaxyl sensitivity of *Phytophthora sojae* from North Dakota. *Plant Disease*. **92**: 1062-1066.
- Sans, A., Rodríguez, M., Silva, P., Stewart, S. (2017). Primer reporte de *Phytophthora sojae* y sus patotipos afectando soja en Uruguay. *Agrociencia Uruguay*. **21** (1): 89-94. Fecha de consulta: julio de 2018. Disponible en: <http://www.scielo.edu.uy/pdf/agro/v21n1/2301-1548-agro-21-01-00089.pdf>
- Schmitthenner, A. F., Hobe, M., Bhat, R. G. (1994). *Phytophthora sojae* races in Ohio over a 10-year interval. *Plant Disease*. **78**: 269-276.
- Schneider, R., Rolling, W., Song, Q., Cregan, P., Dorrance, A. E., McHale, L. K. (2016). Genome-wide association mapping of partial resistance to *Phytophthora sojae* in soybean plant introductions from the Republic of Korea. *BMC Genomics*. **17** (1): 607. Doi: /10.1186/s12864-016-2918-5
- Sugimoto, T., Kato, M., Yoshida, S., Matsumoto, I., Kobayashi, T., Kaga, A., Ishimoto, M. (2012). Pathogenic diversity of *Phytophthora sojae* and breeding strategies to develop *Phytophthora*-resistant soybeans. *Breeding Science*. **61** (5): 511-522. Doi: /10.1270/jsbbs.61.511
- Sun, S., Wu, X. L., Zhao, J. M., Wang, Y. C., Tang, Q. H., Yu, D. Y., Gai, J. Y., Xing, H. (2011). Characterization and mapping of *RpsYu25*, a novel resistance gene to *Phytophthora sojae*. *Plant Breeding*. **130**: 139-143.
- Tapiero A. (2001). Desarrollo y adaptación de un plan para el manejo de la pudrición de la raíz y el tallo causada por *Phytophthora sojae* en cultivos de soya en los Llanos Orientales. Informe técnico final convenio Corpoica – Coagro. p. 19.
- Tapiero A. (2004). Generación de tecnologías para el manejo integrado de plagas y enfermedades en el sistema de producción de soya. Informe final convenio de inversión MADR - 040 de 2004. p. 16.
- Tapiero, A., Garnica, D., Gordillo, A., Bernal, A., Restrepo, S. (2006). Molecular and pathogenic variability in colombian isolates of *Phytophthora sojae*. APS-CPS-MSA Joint Meeting. Poster.

- Tyler, B. M.** (2007). *Phytophthora sojae*: Root rot pathogen of soybean and model oomycete. *Molecular Plant Pathology*, **8**: 1-8. Doi: 10.1111/j.1364-3703.2006.00373
- Wagner, R. E., Wilkinson, H. T.** (1992). A new physiological race of *Phytophthora sojae* on soybean. *Plant Disease*. **76**: 212.
- White, T. J., Bruns, T., Lee, S., Taylor, J.** (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: Innis, M. A., Gelfand, D. H., Sninsky, J. J., White, T. J. PCR protocols - a guide to methods and applications. Academic Press, San Diego, Calif. p. 315-322.
- Yorinori, T.** (1996). Reação ao cancro da haste (*Phomopsis phaseoli* var. *meridionalis*/*Diaporthe phaseolorum* var. *meridionalis*). *Tropical Melhoramento e Genética -TMG*, Cambé, PR. 4.
- Zhang, S. Z., Xu, P. F., Wu, J. J., Xue, A. G., Zhang, J. X., Li, W. B., Chen, C., Chen, W. Y., Lv, H. Y.** (2010). Races of *Phytophthora sojae* and their virulences on soybean cultivars in Heilongjiang, China. *Plant Disease*. **94**: 87-91.

Patrones altitudinales de las comunidades vegetales en el Chocó biogeográfico del Valle del Cauca, Colombia

María Paula Moreno Cavazos*, Edier Alberto Soto Medina, Alba Marina Torres González, Martín Llano-Almarino

Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Resumen

Se estudió la estructura y la diversidad vegetal de cinco localidades en el Chocó biogeográfico para determinar los patrones altitudinales de la vegetación leñosa y evaluar el efecto de los parámetros climáticos. En cada localidad se muestrearon diez parcelas de 50 x 2m, y se incluyeron todos los individuos con un diámetro a la altura del pecho de 2,5 cm o mayor. Además, se tuvieron en cuenta los datos de siete localidades del Chocó biogeográfico muestreadas con el mismo método. Las familias *Arecaceae*, *Rubiaceae* y *Melastomataceae* fueron las más ricas y abundantes, con los más altos índices de valor de importancia. La diversidad alfa fue más alta en las elevaciones bajas y menor en la zona más alta. Al agregar las otras localidades, el patrón altitudinal de riqueza disminuyó al aumentar la altitud. La riqueza de las plantas tuvo una acusada relación lineal con la temperatura, y una relación logarítmica con la precipitación, de tal manera que las zonas del Chocó biogeográfico con una temperatura y humedad relativa más altas presentaron mayor riqueza, aunque la precipitación podría alcanzar un punto de saturación, limitando así el aumento de la diversidad de plantas. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Biodiversidad; Gradiente altitudinal; Riqueza de especies; Transecto de cinturón.

Altitudinal patterns of plant communities in the Chocó biogeographical region of Valle del Cauca, Colombia

Abstract

In order to identify altitudinal patterns of woody plant diversity in the biogeographical region of Chocó and to evaluate the effect of climatic parameters on these, we studied the structure and plant diversity of five localities. In each locality, we sampled ten subplots of 50 x 2m including all individuals with a diameter at breast height of ≥ 2.5 cm. Additionally, we considered the data from seven biogeographic Chocó localities sampled with the same method. *Arecaceae*, *Rubiaceae* and *Melastomataceae* families dominated in richness and abundance, with the highest importance value indexes. Alpha diversity was higher at low elevations and lower at higher elevations. When adding the other localities, the altitudinal pattern of richness decreased with increasing altitude. The richness of plants had a strong linear relationship with temperature and a logarithmic relationship with precipitation. In this sense, the greatest richness was registered in the areas of the biogeographic Chocó with a higher temperature and relative humidity, although precipitation could reach a saturation point where the increase of plant diversity would be limited. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Biodiversity; Altitudinal gradient; Species richness; Belt transect.

Introducción

Desde hace dos siglos naturalistas y geólogos, como von Humboldt, Wallace y Darwin, han emprendido viajes alrededor del mundo con el propósito de entender el origen, la distribución y la diversificación de las especies a lo largo de gradientes latitudinales y altitudinales, y de observar los patrones que han permitido el desarrollo de importantes teorías en los campos de la ecología y la evolución (Fischer, *et al.*, 2011). Sus registros han servido para documentar cómo la diversidad de las especies aumenta a medida que disminuye la latitud, lo que se refleja en el Neotrópico, donde se alberga el 37 % de las plantas del mundo (90.000 a 110.000 especies de plantas con semillas), con una diversidad mayor que la

de las dos regiones del Paleotrópico combinadas (Antonelli & Sanmartín, 2011). Desde el punto de vista de la altitud, se han descrito cuatro tendencias principales de distribución de las especies a lo largo de un gradiente: el patrón de disminución de riqueza, es decir, del número de especies al aumentar la elevación; el patrón de meseta baja, con una gran riqueza en la porción consecutiva baja del gradiente (hasta los 300 m), que decrece al aumentar la altitud; el patrón de meseta baja con pico de riqueza en la mitad del dominio, en

*Correspondencia:

María Paula Moreno Cavazos; maria.moreno.cavazos@correounivalle.edu.co

Recibido: 15 de junio de 2018

Aceptado: 25 de septiembre de 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

donde la riqueza es alta por debajo de los 300 m, pero el pico se alcanza en la mitad del gradiente y de ahí decrece; y, por último, el patrón de pico en altitud media, con un máximo de diversidad unimodal en elevación intermedia. (superior a 300 m) con un 25 % adicional de especies comparada con la base y la cima de la montaña (McCain & Grytnes, 2010).

Estos patrones de distribución altitudinal son mediados por distintos factores, clasificados por Antonelli & Sanmartín (2011) en dos grandes grupos: bióticos (adaptación al suelo, interacción con polinizadores, dispersión y herbívoros, conservación del nicho) y abióticos (relieve, energía disponible, tiempo, precipitación, temperatura, área, estacionalidad, tipo de suelo, frecuencia y grado de perturbación, cambios hidrológicos y geológicos). Estos factores varían a lo largo de una montaña de manera no aleatoria y, por lo tanto, predecible, y su interacción determina el patrón de distribución de la riqueza de especies observado en cada caso (Lomolino, 2001; McCain & Grytnes, 2010). De hecho, en un estudio realizado con base en una recopilación de datos de Gentry (1982), Phillips & Miller (2002) aseguraron que los análisis estadísticos multivariados evidenciaban que los niveles de diversidad podían pronosticarse con una alta confiabilidad a partir de diversas variables ambientales (los sitios con mayor riqueza son las áreas ecuatoriales, bajas y húmedas), siendo la precipitación el factor abiótico más estrechamente correlacionado con la diversidad de los bosques tropicales (Gentry, 1982; Kreft & Jetz, 2007).

El Chocó biogeográfico es una región interesante para desarrollar este tipo de estudios, ya que es una ecorregión de la América tropical con una gran diversidad, concentración de especies endémicas y pérdida rápida de hábitat, lo que la convierte en uno de los veinticinco puntos calientes de biodiversidad en el mundo, por lo cual muchos esfuerzos se han orientado hacia la conservación del 24,2 % que aún se conserva de la extensión original de esta zona (Myers, *et al.*, 2000). La mayoría de los especialistas coinciden en que esta zona abarca desde la provincia del Darién, al occidente de Panamá, hasta la provincia de Manabí, en la costa noroccidental de Ecuador y a lo largo de toda la costa colombiana del Pacífico. El límite occidental está definido claramente por el océano Pacífico y, según algunos autores, el límite oriental está demarcado por las estribaciones occidentales de la cordillera de los Andes, en tanto que otros lo sitúan en la línea divisoria de aguas de los Andes occidentales en Colombia y Ecuador (Otero, *et al.*, 2009).

En Colombia, esta región ocupa territorios de los departamentos del Chocó, Antioquia, Valle del Cauca, Risaralda, Cauca y Nariño, con una extensión aproximada de 113.000 km², lo que representa casi el 70 % de toda la ecorregión y el 10 % del territorio colombiano (Otero, *et al.*, 2009). Esta zona se caracteriza por presentar elevaciones desde el nivel del mar hasta aproximadamente los 3.500 m, niveles muy variables de precipitación y temperatura, con medias anuales de 9.000 mm y 27 °C, lo que permite la existencia de una gran diversidad de ecosistemas como manglares,

terrazas aluviales, bosques pluviales tropicales, y bosques premontanos y montanos (Kelleher, *et al.*, 1995). Desde la perspectiva de la diversidad y composición florística, esta ecorregión es una de las menos conocidas del país y el promedio de nuevas especies vegetales por descubrir es mucho más elevado que el de otras (Gentry, 1986; Bernal, *et al.*, 2015); sin embargo, presenta altas tasas de deforestación por la tala indiscriminada de árboles, el cambio del uso de la tierra, la contaminación doméstica, la minería ilegal y los problemas sociales (Rangel & Lowy, 1993; Bernal, *et al.*, 2015).

Con el objetivo de determinar los patrones de distribución de las comunidades vegetales en un rango altitudinal, y relacionarlos con las variables climáticas de temperatura y precipitación, en este estudio se caracterizaron cinco comunidades vegetales del Chocó biogeográfico del Valle del Cauca según su fisionomía y su estructura; además, se tuvieron en cuenta otras localidades previamente muestreadas en el Chocó biogeográfico de Colombia y Ecuador.

Materiales y métodos

Área de estudio. El estudio se hizo en cinco localidades ubicadas a diferentes altitudes en el Chocó biogeográfico del Valle del Cauca, Colombia (Tabla 1), las cuales se eligieron por su buen estado de conservación, pues hacen parte del sistema de Parques Nacionales Naturales o reservas regionales.

Asimismo, con el objetivo de mejorar la precisión de los modelos de regresión para la riqueza de especies, se utilizó la información de siete localidades de Colombia y Ecuador ubicadas dentro del Chocó biogeográfico, que cumplieran con las mismas condiciones de muestreo de este estudio (ubicación geográfica, área muestreada y método de muestreo), y reportadas en los estudios de Phillips & Miller (2002) y Kappelle & Brown (2001).

Estructura y diversidad vegetal. Se utilizó el método de Gentry (1982), según el cual se traza un transecto de cinturón dividido en diez parcelas rectangulares consecutivas de 50 × 2 m, para un total de 0,1 hectáreas muestreadas en cada localidad. Se escogió el hábitat en el mejor estado de conservación posible para establecer el transecto. El muestreo incluyó toda la vegetación con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor o igual a 2,5 cm. Este método excluye la mayoría de hierbas y epífitas, pero incluye árboles, arbustos, lianas, hemiepífitas y hierbas grandes. Se midió la circunferencia a la altura del pecho (CAP) a 1,3 m de altura sobre el suelo usando una cinta métrica. Los tallos ramificados a menos de 1,3 m del suelo se midieron como individuos independientes. En los árboles con raíces tablares la medida se tomó por encima de estas. Se estimó la altura de cada individuo y se identificó hasta el mínimo nivel taxonómico reconocido en campo. Además, se consignaron los datos de hábito de crecimiento, presencia, color y olor de exudado, olor de la corteza y las hojas y color de la corteza, entre otros, lo que permitió el uso posterior de las claves taxonómicas. Se recolectó una muestra de herbario

Tabla 1. Localidades muestreadas en este estudio (EE) y tomadas de la literatura (TL) ubicadas entre los 36 y los 3.650 m de altitud en el Chocó biogeográfico de Colombia y Ecuador (**Gentry, 1988; Kappelle & Brown, 2001**)

Localidad	Ubicación	Coordenadas	Altitud (m)	Temperatura media anual (°C)	Precipitación (mm)	Zona de vida
Chucheros (EE)	Buenaventura, Valle del Cauca	3°55' N, 77°18' O	36	25,9	7.410	Bosque muy húmedo
Tutunendo (TL)	Quibdó, Chocó	5°46' N, 76°35' O	90	26,5	9.000	Bosque muy húmedo
Bajo Calima (TL)	Buenaventura, Valle del Cauca	3°55' N, 72°02' O	100	26,2	7.035	Bosque muy húmedo
Anchicayá (TL)	Buenaventura, Valle del Cauca	3°45' N, 76°50' O	300	25,0	3.423	Bosque muy húmedo
Pericos (EE)	Buenaventura, Valle del Cauca	3°51' N, 76°46' O	650	24,6	3.423	Bosque muy húmedo
Murrí (TL)	Frontino, Antioquia	6°35' N, 76°50' O	960	27,1	4.200	Bosque pluvial premontano
Antadó (TL)	Dabeiba, Antioquia	7°24' N, 75°96' O	1.560	16,3	3.800	Bosque muy húmedo premontano
Queremal (EE)	Dagua, Valle del Cauca	3°31' N, 76°44' O	1.573	20,2	1.621	Bosque muy húmedo premontano
Maquipucuna (TL)	Pichincha, Ecuador	0°07' N, 78°37' O	1.600	18,6	1.778	Bosque pluvial premontano
La Planada (TL)	Ricaurte, Nariño	1°10' N, 77°58' O	1.800	17,3	4.300	Bosque muy húmedo premontano
Hacienda Himalaya (TL)	La Cumbre, Valle del Cauca	3°35' N, 76°34' O	1.860	16,0	2.000	Bosque muy húmedo montano bajo
Cerro El Inglés (EE)	El Cairo, Valle del Cauca	4°45' N, 76°17' O	2.294	17,8	2.479	Bosque muy húmedo montano bajo
Pico Pance (EE)	Cali, Valle del Cauca	3°19' N, 76°69' O	3.650	12,3	1.439	Subpáramo

únicamente de las plantas que no fue posible identificar. Las muestras se prensaron y se conservaron en alcohol al 70 % hasta que fueron llevadas al herbario CUVC de la Universidad del Valle, donde fueron procesadas e identificadas con ayuda de la colección y de claves taxonómicas como la de **Gentry (1996)**. Las muestras fértiles fueron debidamente ingresadas en la colección.

Se estableció la fisionomía de cada localidad calculando los valores de riqueza, abundancia, frecuencia, densidad, área basal e índice de valor de importancia (IVI) de las especies. También se analizó su estructura o patrón espacial de distribución con clases diamétricas (DAP) y altura, utilizando las formulas descritas por **Rangel & Velázquez (1997)**.

Análisis de datos. Se utilizaron los valores observados totales (especies y morfoespecies) y los estimadores de riqueza Chao 1, *Jacknife 1* y *Bootstrap* para calcular la efectividad del muestreo con el programa EstimateS 9.1.0 (**Colwell, 2013**). Se construyó una curva de rarefacción en el programa PAST (**Hammer, et al., 2001**) para corregir las diferencias en la abundancia de plantas entre las localidades

y comparar la riqueza teniendo en cuenta la localidad con menor número de individuos registrados (**Gotelli & Graves, 1996; Chao, et al., 2016; Ibañez, et al., 2016**). Se evaluó la diversidad alfa de cada localidad como el promedio de la riqueza de especies por transecto, y la diversidad beta como el promedio de todas las posibles comparaciones entre parejas del índice de Sørensen en los diez transectos y, por último, la diversidad gamma como el número total de especies por localidad. Estos parámetros se compararon entre localidades utilizando una prueba Anova de una vía y, posteriormente, una prueba de Tukey para determinar las localidades entre las cuales existían diferencias empleando el programa Statistica 7.0 (**StatSoft, 2004**).

Relación de la vegetación con los parámetros climáticos. En este análisis se utilizaron las cinco localidades muestreadas y las ocho registradas por **Phillips & Miller (2002)**, así como las variables climáticas de precipitación media anual, variabilidad de la precipitación, temperatura media anual y variabilidad de la temperatura, tomadas de la base del WorldClim (**Hijmans, et al., 2005**) con resolución

de 5 minutos. Se hicieron correlaciones lineales de Spearman entre la riqueza de especies y las variables climáticas para establecer la relación entre estos factores utilizando el programa Statistica 7.0 (StatSoft, 2004). Asimismo, se realizaron análisis de regresión para determinar la relación entre la riqueza de especies y las variables climáticas.

Resultados

Caracterización fisionómica. La localidad Playa Chucheros presentó la mayor riqueza y abundancia, con 472 individuos de 201 especies (anexo 1), pertenecientes a 34 familias; a nivel de familia no se pudieron identificar 49 individuos de 37 morfoespecies diferentes. Por otra parte, en Queremal y Cerro El Inglés se registraron una riqueza y una abundancia similares, con 329 individuos de 98 especies y 31 familias en Queremal, y 371 individuos de 99 especies y 33 familias en Cerro El Inglés. En Queremal no se pudieron identificar 24 individuos de 20 morfoespecies y en Cerro El Inglés 12 individuos de nueve morfoespecies. La riqueza y la abundancia de las familias y las especies dominantes

variaron entre las localidades (Tabla 2), aunque siempre predominaron Rubiaceae, Melastomataceae y Arecaceae, tanto con número de especies como de individuos. Myrtaceae y Sapotaceae solo se registraron en Playa Chucheros; Araceae fue la única familia que no se registró en Chucheros y Malvaceae en Queremal. *Cyathea caracasana* (Klotzsch) Domin (Cyatheaceae) y *Elaeagia utilis* (Goudot) Wedd. (Rubiaceae) se registraron tanto en Queremal como en Cerro El Inglés. En la Tabla 1S, <https://www.raccefn.co/index.php/raccefn/article/downloadSuppFile/626/3026> se presentan las especies encontradas en todo el gradiente.

La mayoría de los individuos correspondió a árboles o arbustos, y solo se registraron diez lianas en Chucheros (2,1 %), ocho en Queremal (2,4 %) y cuatro en Cerro El Inglés (1 %). En Cerro El Inglés se registró el mayor valor de área basal, con 8,90 m², seguido de Playa Chucheros con 5,98 m², Pericos con 5,03 m², Queremal con 3,70 m² y Alto Pance con 0,929 m². En cuanto a la densidad, frecuencia y cobertura, la familia Arecaceae presentó el mayor valor de importancia (IVI) en cuatro localidades (Playa

Tabla 2. Familias y especies vegetales con mayor índice de valor de importancia (IVI) en Playa Chucheros, Pericos, Queremal, Cerro El Inglés y Pico Pance, Valle del Cauca, Colombia

Playa	Familia	IVI (%)	Especie	IVI (%)
Chucheros	Arecaceae	19,13	<i>Attalea</i> sp. 1	15,14
	Rubiaceae	10,25	<i>Manicaria saccifera</i>	6,91
	Sapotaceae	5,72	<i>Faramea</i> sp. 3	3,70
	Fabaceae	4,95	<i>Miconia aponeura</i>	2,82
	Melastomataceae	4,68	<i>Virola</i> sp. 1	2,47
Pericos	Malvaceae	13,30	<i>Wettinia quinaria</i>	9,20
	Arecaceae	11,70	<i>Huberodendron patinoi</i>	8,40
	Lauraceae	5,90	<i>Pourouma chocoana</i>	4,60
	Burseraceae	5,70	<i>Lauraceae</i> sp.2	3,70
	Urticaceae	4,60	<i>Iryanthera megistophylla</i>	3,30
Queremal	Arecaceae	25,71	<i>Wettinia</i> sp. 1	16,34
	Rubiaceae	7,62	Arecaceae sp. 1	9,25
	Melastomataceae	6,77	<i>Guatteria crassipes</i>	3,48
	Annonaceae	4,86	<i>Chamaedorea</i> sp. 1	3,25
	Clusiaceae	4,71	<i>Piper</i> sp. 2	3,20
Cerro El Inglés	Arecaceae	15,12	<i>Socratea</i> sp. 1	13,11
	Melastomataceae	12,10	<i>Tibouchina lepidota</i>	11,78
	Rubiaceae	8,77	<i>Myristicaceae</i> sp. 1	8,53
	Myristicaceae	8,72	<i>Hedyosmum</i> sp. 1	5,22
	Lauraceae	5,83	<i>Citharexylum subflavescens</i>	2,94
Alto Pance	Asteraceae	39,71	<i>Diplostephium</i> sp.	15,00
	Ericaceae	26,11	<i>Gaultheria</i> sp.	14,70
	Melastomataceae	20,23	<i>Aequatorium</i> sp.	11,50
	Cunoniaceae	8,06	<i>Weinmania pubescens</i>	8,10
	Clusiaceae	3,33	<i>Miconia</i> sp.	7,00

Chucheros=19,13 %, Pericos=52,5 %, Queremal=25,71 % y Cerro El Inglés=15,12 %). Además, diferentes especies de esta familia se destacaron por registrar el mayor IVI (Playa Chucheros: *Attalea* sp., una con 15,14 %; Pericos: *Wettinia quinaria* con 9,2 %; Queremal: *Wettinia* sp., una con 16,34 %, y Cerro El Inglés: *Socratea* sp. 1 con 13,11 %). Las familias Rubiaceae y Melastomataceae también se registraron como una de las cinco más importantes en las cuatro localidades, con variaciones en cuanto a su importancia y representatividad (Tabla 2). Por otro lado, en Pico Pance las familias dominantes fueron Asteraceae (IVI=39,71), Ericaceae (IVI=26,11) y Melastomataceae (IVI=20,23).

Según sus clases diamétricas, en las cinco localidades muestreadas se presentó un patrón similar, con una distribución en forma de “J” invertida (Figura 1 A), y en todos los casos la clase I contenía más de la mitad de los individuos (entre 68 y 82 %), presentando luego una drástica disminución, y la clase II entre 12 y 17 %; los valores continuaron descendiendo de modo que ninguna de las otras

clases presentó más del 10 % de los individuos.

Según las clases de altura (Figura 1 B), en Playa Chucheros y Pico Pance se presentó una distribución de tipo Poisson, en la cual la clase II presentó más individuos que la clase I, con un decrecimiento posterior en las clases de la III a la VII. En Pericos y Cerro El Inglés la clase I incluyó más individuos, aunque los valores fueron similares a los de la clase II. Luego, las clases III y IV presentaron de nuevo valores similares para luego disminuir entre las clases V a VII. En Cerro El Inglés se dio un aumento en la última clase, en tanto que en Queremal se presentó una distribución del tipo de “J” invertida, muy similar a la de las clases diamétricas.

Riqueza de especies de árboles y parámetros fisiológicos. Ninguna de las cinco curvas de acumulación de especies se comportó asintóticamente. Los porcentajes de eficiencia del muestreo menores de 100 % (Tabla 3) evidenciaron que en las cuatro localidades aún hay especies por registrar. Según la curva de rarefacción (Figura 2), la riqueza fue considerablemente mayor en Playa Chucheros y Pericos, muy similar en las localidades de Queremal y Cerro

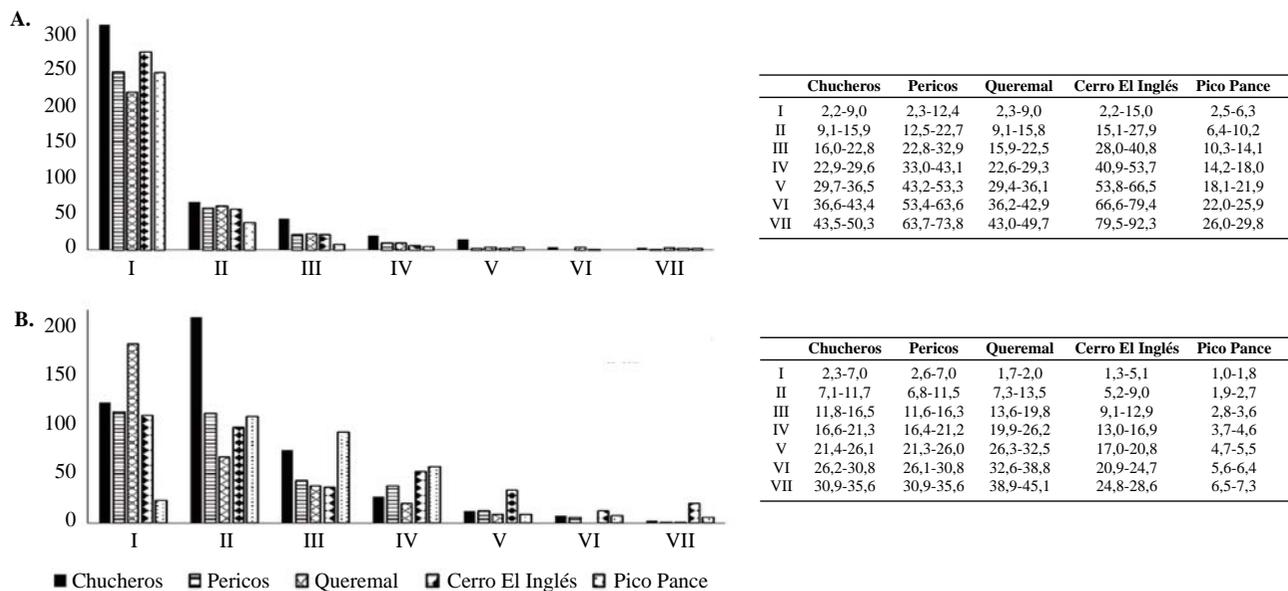


Figura 1. Distribución de los individuos de la vegetación en Playa Chucheros, Queremal, Pericos, Pico Pance y Cerro El Inglés, Valle del Cauca, Colombia. **a)** Clases de diamétricas. **b)** Clases de altura

Tabla 3. Estimadores de riqueza y eficiencia de muestreo de la vegetación en Playa Chucheros, Pericos, Queremal, Cerro El Inglés y Pico Pance, Valle del Cauca, Colombia

Localidad	Riqueza	Individuos	Chao 1 Media	Eficiencia (%)	Jacknife 1 Media	Eficiencia (%)	Bootstrap Mean	Eficiencia (%)
Playa Chucheros	201	472	437,03	45,99	333,3	60,31	256,14	78,47
Pericos	154	345	310	50,0	260,2	59,19	197,27	78,07
Queremal	98	329	140,99	69,51	155,6	62,98	122,73	79,85
Cerro El Inglés	99	371	161,50	61,30	157,5	62,86	123,75	80,00
Pico Pance	27	312	30,48	88,58	37,66	71,69	31,72	85,12

El Inglés, y más baja en Pico Pance.

Los estimadores de la riqueza de especies indicaron que en Queremal y Cerro El Inglés la riqueza fue parecida, en

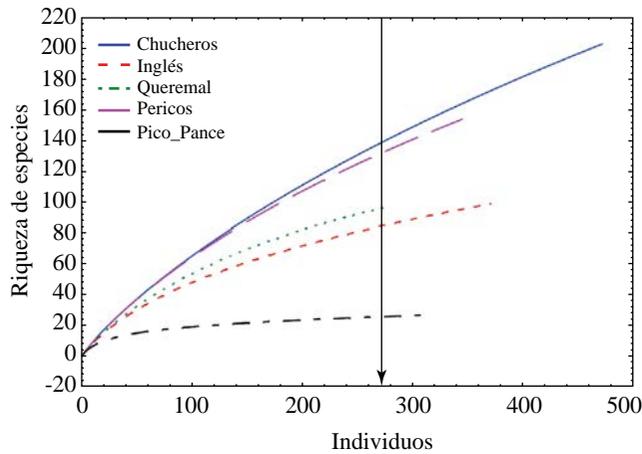


Figura 2. Curvas de rarefacción basadas en individuos de la vegetación registrados en Playa Chucheros, Pericos, Queremal, Cerro El Inglés y Pico Pance, Valle del Cauca, Colombia

tanto que en Playa Chucheros estos valores se duplicaron según los estimadores Chao 1 y *Jackknife* 1, y se triplicaron con la herramienta *Bootstrap* (Tabla 3). La diversidad alfa en Playa Chucheros (30 especies) fue similar a la de Pericos (25 especies), pero significativamente mayor (Anova: $p < 0,05$) que en Queremal (cerca de 16 especies), en Cerro El Inglés (cerca de 18 especies) y en Pico Pance (cerca de siete especies) (Tukey: $p < 0,05$) (Figura 3). La diversidad beta no presentó diferencias significativas entre las cinco localidades (Anova: $p = 0,442$).

La densidad de individuos fue estadísticamente mayor (Anova: $p < 0,05$) en la localidad de menor elevación (Chucheros), en tanto que los otros sitios presentaron una abundancia similar (Figura 3). El CAP fue mayor en El Cerro El Inglés, y más bajo en Alto Pance. Por el otro lado, la altura promedio de los árboles fue menor en Alto Pance, seguido de Queremal, en tanto que en las otras localidades las alturas fueron similares.

Relación de la riqueza de especies con los parámetros climáticos. El análisis de la riqueza en función de la altitud en las cinco localidades evaluadas en el estudio y en las otras reportadas en la literatura arrojó mayores valores de riqueza

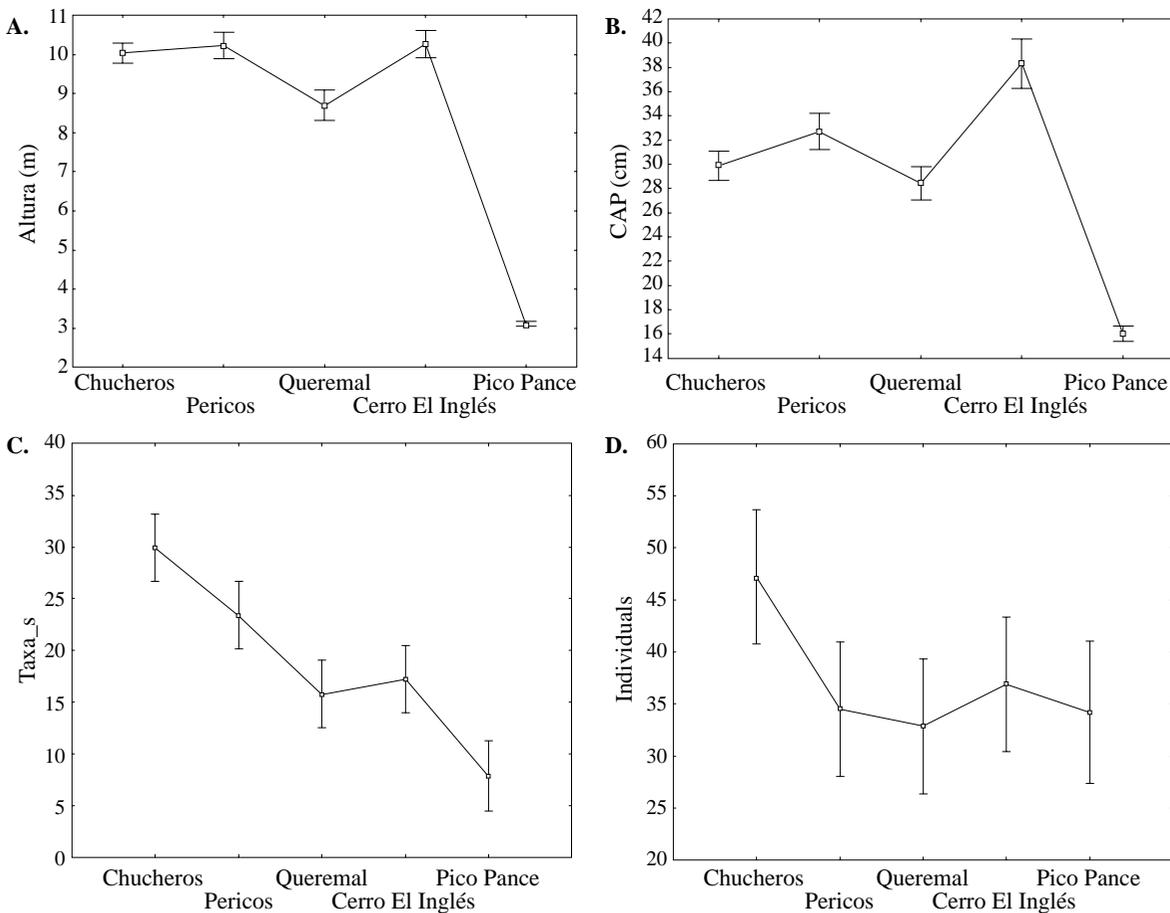


Figura 3. Parámetros fisionómicos de la vegetación de Playa Chucheros, Pericos, Queremal, Cerro El Inglés y Pico Pance, Valle del Cauca, Colombia. **a)** Altura. **b)** Circunferencia a la altura del pecho (CAP). **c)** Diversidad alfa. **d)** Densidad de individuos. (Promedio para los diez transectos)

en las zonas bajas, con un pico en Bajo Calima, a los 100 m. La diversidad disminuyó drásticamente hasta Pico Pance, a 3.650 m (Figura 4). La temperatura y la precipitación media anuales, así como la altitud, se correlacionaron significativamente con la riqueza de la vegetación, pero no así la estacionalidad de la precipitación y la temperatura (Tabla 4). La variable que más se relacionó con la riqueza fue la altitud, seguida de la temperatura media y, por último, la precipitación. En Bajo Calima se registró la mayor

riqueza (261 especies) y el menor valor de precipitación medio (7.035 mm), comparado con Playa Chucheros (201 especies y 7.410 mm). La riqueza se relacionó de forma lineal con la temperatura ($R^2=0,72$, $p<0,05$) (Figura 4B), y de forma logarítmica con la precipitación ($R^2=0,86$, $p<0,05$) (Figura 4C).

La temperatura presentó una correlación negativa perfecta con la elevación (Tabla 4), y la precipitación presentó una correlación menor. Por otra parte, la variación de la precipitación y de la temperatura no se correlacionó de manera significativa con la elevación. La riqueza de plantas presentó una correlación positiva con la elevación, la temperatura, la precipitación y la densidad de árboles, en tanto que esta se correlacionó positivamente con la precipitación y el área basal.

Discusión

La familia Rubiaceae fue la de mayor riqueza de especies y gran abundancia de individuos. Sin embargo, en las cuatro localidades ubicadas por debajo de 3.000 m el mayor IVI se registró en la familia Arecaceae por su gran abundancia de individuos y la extensión del área basal. La familia Melastomataceae también se situó entre los primeros cinco valores de IVI. Estas mismas tres familias también habían sido de gran importancia en la caracterización fisionómica de las dos localidades adicionales, Bajo Calima y Bajo Anchicayá (Phillips & Miller, 2002). Por el otro lado, en la localidad de Pico Pance las familias más importantes fueron Asteraceae y Melastomataceae, resultados que concuerdan con los hallados en el Chocó biogeográfico de Colombia, donde Rubiaceae se ha registrado como la familia más diversa, con 342 especies de 72 géneros, en tanto que Melastomataceae ocupa el tercer lugar, con 225 especies de 27 géneros, y Arecaceae, el decimocuarto lugar, con 86 especies de 30 géneros (Rangel-Ch & Rivera-Díaz, 2004; Kappelle & Brown, 2001).

Solamente dos especies se registraron tanto en Queremal como en Cerro El Inglés: *Cyathea caracasana*, un helecho arborecente de amplia distribución, que se encuentra generalmente en zonas elevadas por encima de los 1.370 m de altitud (Murillo-A & Murillo-P, 2003), y la especie más común del género *Elaeagia* de la familia Rubiaceae en Colombia, *E. utilis*, que crece con frecuencia entre los 1.300 y los 2.000 m (Mora-Osejo, 1977).

En general, la estructura de la vegetación de las cinco localidades estudiadas se parece a la de los bosques neotropicales (Gentry, 1982; 1988; Kappelle & Brown, 2001), caracterizados por presentar altos valores de área basal y alta densidad, debido, principalmente, a la gran cantidad de individuos con DAP bajo (60 % de los individuos de las cinco localidades con DAP entre 2,5 y 11,21 cm). En estos bosques, con el dosel generalmente cerrado, las plantas aumentan su altura mucho más rápido que su diámetro, con el fin de alcanzar la energía solar y realizar todas sus funciones fisiológicas.

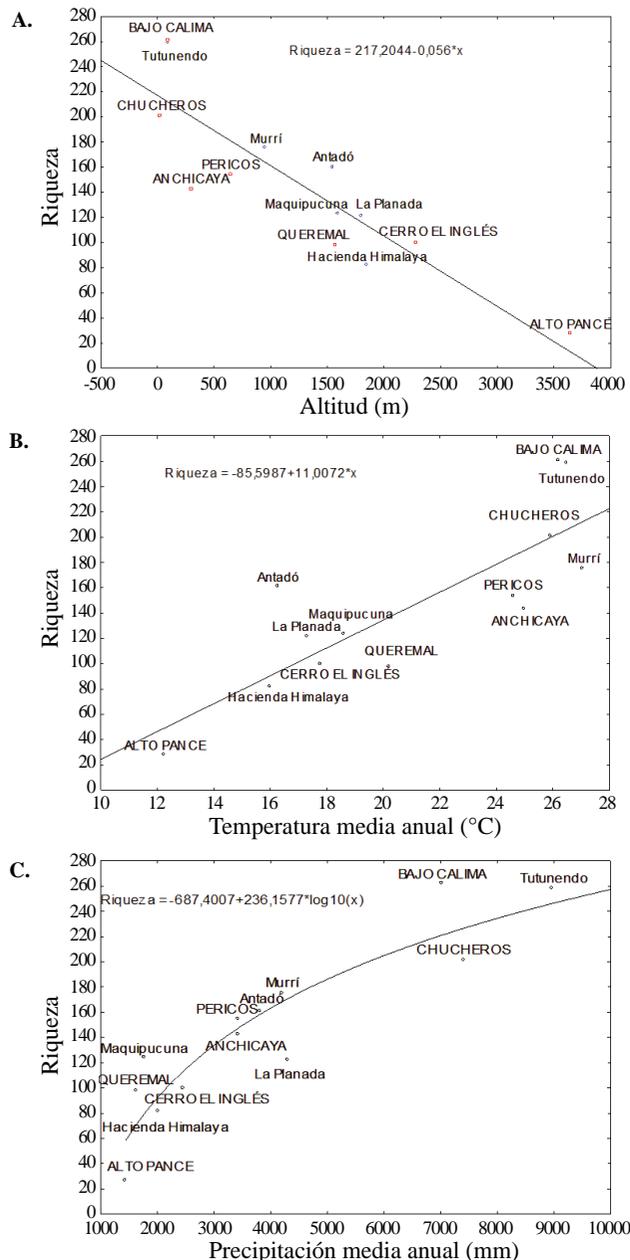


Figura 4. Riqueza de especies arbóreas en función de la altitud (A), temperatura (B) y precipitación (C) media anual en el Chocó biogeográfico de Colombia y Ecuador. La línea indica la tendencia de la relación en los análisis de regresión lineal y no lineal. Los cuadrados rojos corresponden a las localidades de este estudio y los círculos azules a las reportadas en la literatura.

Tabla 4. Correlaciones de Pearson entre la riqueza de especies y la altitud con las variables climáticas en 12 localidades entre los 36,8 y los 3.650 m de altitud en el Chocó biogeográfico de Colombia y Ecuador. * Correlaciones significativas. DA: densidad de árboles; AB: área basal; DE: desviación estándar

	Temperatura media anual	Temperatura DE	Precipitación media anual	Precipitación DE	Riqueza de plantas	Altura	DA	AB	Altitud
Temperatura media anual		0,233	0,017*	0,767	0,017*	0,783	0,233	0,450	0,017*
Temperatura DE	0,700		0,450	1,000	0,450	0,450	0,517	0,783	0,233
Precipitación media anual	0,900	0,400		0,433	0,017*	0,683	0,017*	0,233	0,017*
Precipitación DE	-0,205	-0,051	-0,462		0,433	0,267	0,367	0,133	0,767
Riqueza plantas	0,900	0,400	1,000	-0,462		0,683	0,017*	0,233	0,017*
Altura promedio	0,100	0,400	0,200	-0,667	0,200		0,450	0,233	0,783
DA	0,700	0,300	0,900*	-0,564	0,900*	0,500		0,017*	0,233
AB	0,400	0,100	0,700	-0,821	0,700	0,700	0,900*		0,450
Altitud	-1,000*	-0,700	-0,900*	0,205	-0,900	-0,100	-0,70	-0,40	

Con respecto al gradiente altitudinal de riqueza, Playa Chucheros y Bajo Calima fueron las localidades con mayor riqueza y abundancia vegetal de las siete localizadas en el Chocó biogeográfico del Valle del Cauca. Estos resultados coinciden con lo encontrado por **Gentry** (1988) y **Rangel-Ch & Rivera-Díaz** (2004) en el Chocó biogeográfico de Colombia, donde observaron la mayor riqueza y variedad de flora en la llanura aluvial y las colinas bajas (0-200 m de altitud), caracterizadas por humedad y temperatura elevadas.

La diversidad de especies vegetales observada a lo largo del gradiente altitudinal disminuyó al aumentar la altitud, encontrándose los mayores valores en Playa Chucheros, Bajo Calima y Tutunendo, en tanto que empezó a disminuir en Bajo Anchicayá hasta alcanzar las zonas de montaña alta, donde la riqueza fue la más baja, comportamiento que corresponde al patrón de diversidad de especies decreciente con la altitud. Una de las causas potenciales que determinan este patrón es la relación entre especies y área (**McCain & Grytnes**, 2010), pues, a la manera de una pirámide, el área disponible disminuye al aumentar la altitud a lo largo de una montaña, así, en las zonas altas hay una menor cantidad de energía solar disponible, de recursos y de ambientes diferentes que servirían como refugio de varias especies, comparadas con las zonas bajas (**Brown & Lomolino**, 1998). Por otra parte, **Whittaker** (2007) comparó los sistemas montañosos con base en la teoría de la biogeografía de islas, ya que están aislados de otros sistemas, por lo cual aumentan las tasas de extinción y disminuye el recambio de especies y, en consecuencia, el equilibrio se alcanza con menores valores de riqueza. El patrón decreciente de la riqueza de plantas se mantuvo en la curva de rarefacción, como lo sugiere **Ibáñez, et al.** (2016), lo cual indica que esta disminuyó de manera consistente a pesar de las diferencias en el número de individuos muestreados en cada localidad.

En este estudio las variables climáticas de temperatura y precipitación presentaron una significativa correlación con la riqueza de especies (**Grime**, 2006; **Hamilton &**

Perrot, 1981; **Huston & DeAngelis**, 1994; **Sánchez & López Mata**, 2005; **Fischer, et al.**, 2011; **Gómez, et al.**, 2016; **Ibáñez, et al.**, 2016), lo que implica que en ambientes montañosos las bajas temperaturas y la precipitación son los factores limitantes para la mayoría de las especies (**Gentry**, 1986). La hipótesis propuesta para explicar este patrón es la del cambio climático gradual o estabilidad climática, la cual establece que en latitudes y altitudes altas el estrés climático produce una gran presión sobre la ecofisiología de muchas especies, limitando así su riqueza (**Palmer**, 1994; **Rahbek**, 1995; **Vázquez & Givnish**, 1998; **Brown**, 2001; **Vetaas & Grytnes**, 2002; **Storch & Gaston**, 2004). De esta manera, en elevaciones altas la baja temperatura y la precipitación funcionan como filtro ambiental que reduce la riqueza de especies (**Vázquez & Givnish**, 1998; **Gómez, et al.**, 2016). En este caso, Pico Pance presentó los valores más bajos de temperatura y precipitación, en tanto que en Bajo Calima, Chucheros y Tutunendo se registró la diversidad más alta, así como la mayor temperatura y precipitación.

La precipitación y la temperatura se correlacionaron fuertemente con el número de especies en el gradiente altitudinal. En una revisión de 45 localidades en 11 países, **Gentry** (1986, 1988) aseguró que la tendencia más predecible es la fuerte relación de la curva de precipitación y riqueza de especies vegetales, la cual alcanza una asíntota (saturación) en cerca de 250 especies con 4.000 mm de precipitación anual. Esto concuerda con lo observado en esta investigación, ya que en Playa Chucheros y Bajo Calima, con los promedios de precipitación anual más altos (7.410 y 7.035 mm, respectivamente), se presentan valores de diversidad cercanos a esta predicción. Después de este punto crítico de 4.000 mm de precipitación, es posible que otros factores entren a tener un papel más determinante en la riqueza de las especies. Se podría explicar que las 60 especies adicionales de Bajo Calima son producto de la diversidad de ambientes por área en zonas de mayor relieve, lo que genera diferentes inclinaciones, exposición a la luz, sustratos geológicos y, por

lo tanto, variedad de microambientes que se utilizan como nichos de otras especies de plantas (Vázquez & Givnish, 1998; Fischer, *et al.*, 2011), en comparación con zonas planas como Playa Chucheros. Por el otro lado, Gentry (1988) demostró que las curvas de acumulación de especies vegetales en varios sitios representativos alcanzaban la asíntota en la mitad del esfuerzo de muestreo en bosques de poca diversidad, en tanto que en sitios con gran diversidad la curva apenas se niveló, y, por lo tanto, el valor poco variable de 250 especies después de los 4.000 m de precipitación anual podría ser un efecto de las limitaciones del método de muestreo. Debido a ello, se sugiere ampliar el área de muestreo, lo cual llevaría, probablemente, a revelar diferencias significativas en las riquezas de estos sitios. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la diversidad de especies es producto no solo de la precipitación sino de la interacción del conjunto de factores bióticos, abióticos e históricos característicos de cada localidad.

Por ejemplo, la gran riqueza de especies en bosques húmedos del Neotrópico se ha relacionado con las interacciones con frugívoros especializados y nichos de dispersión más restringidos y mejor sintonizados, ya que se encuentra la misma cantidad de especies que utilizan la anemocoria como mecanismo de dispersión en bosques secos y húmedos, por lo que la dispersión de las especies adicionales provenientes de bosques húmedos casi siempre se da mediante la dispersión por zoocoria (Gentry, 1986; Correa-Gómez, *et al.*, 2013), como en las familias más importantes en las zonas muestreadas: Arecaceae, Melastomataceae y Rubiaceae con frutos carnosos y de gran importancia ecológica.

La densidad de árboles se relacionó con la riqueza de plantas, el área basal y la precipitación, lo cual puede deberse a que a medida que aumenta la precipitación, aumenta la productividad primaria o disponibilidad de energía (hipótesis de la relación de energía y riqueza) (McCain & Grytnes, 2010; Wright, 1993; Wright, *et al.*, 1993), lo cual permite un mayor número de individuos que aumenta la probabilidad de un mayor número de especies. Por otro lado, el mayor número de individuos está relacionado con una mayor área basal.

La ventaja de determinar estos patrones es que se puede predecir con cierta confiabilidad la tendencia de la riqueza de plantas, su composición e, incluso, los comportamientos fenológicos al analizar las variables de una localidad determinada. Para lograr una mayor confiabilidad en estos análisis se debe estandarizar el método de muestreo, el área muestreada y la definición de riqueza de especies.

Conclusión

En conclusión, el patrón altitudinal de las comunidades vegetales en el Chocó biogeográfico del Valle del Cauca evidenció que la riqueza de especies vegetales era mayor en zonas altitudinales bajas y disminuía al aumentar la altitud. En Bajo Calima se registró un punto máximo de diversidad, con 261 especies de plantas vasculares en 0,1 hectáreas a

100 m de altitud. Además, la temperatura fue el factor más estrechamente asociado con la riqueza de especies. Se recomienda repetir este tipo de estudios en el tiempo y en la misma localidad para poder comprender cómo cambian los ecosistemas y cómo se están viendo afectados por el hombre y por las rápidas variaciones climáticas, como el aumento en la temperatura media global que se predice para este siglo. Este tipo de estudios ayudará a comprender fenómenos como la tasa acelerada de extinción, la migración de especies hacia zonas altitudinales altas, el cambio en la composición de comunidades y en su fisiología y fenología. También sería importante emprender esfuerzos de muestreo en diferentes épocas del año para aumentar la resolución de la caracterización florística de las zonas y, eventualmente, encontrar especies aún no descritas, con el propósito de plantear, ordenar, sistematizar y fortalecer planes de manejo de estas importantes áreas.

Información suplementaria

Tabla 1S. Especies encontradas en todo el gradiente. Vea la tabla 1S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/626/3026>

Agradecimientos

A Santiago Arboleda, David Díaz, Johan Kelber Home, Diana Gamba, Adriana Guerrero y Julián Perdomo por el acompañamiento en campo. A Viviana Londoño, Jhon Alexander Vargas y Juan Mauricio Posada por la ayuda en la identificación del material vegetal seco. A la organización ambiental comunitaria Serraniagua por dar acceso a la reserva natural comunitaria de Cerro El Inglés.

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Valle por la financiación del proyecto “Patrones altitudinales de las comunidades vegetales y de líquenes cortícolas en el Chocó biogeográfico del Valle del Cauca (Colombia) (convocatoria número 7925) y la convocatoria de apoyo a la terminación de proyectos de doctorado de la Universidad del Valle, 2016 (convocatoria número 71055)”, presentado por el Grupo de investigación en Ecología y Diversidad Vegetal, en cuyo marco se realizó esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en torno al desarrollo de la investigación.

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron en el diseño de muestreo, en la identificación de especímenes y redacción del manuscrito.

Referencias

Alcaldía Municipal de Dagua. (2001). Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), Municipio de Dagua, Valle del Cauca.

- Alcaldía Municipal de San José del Palmar.** (2001). Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio de San José del Palmar, Chocó.
- Antonelli, A. & Sanmartín, I.** (2011). Why are there so many plant species in the Neotropics? *Taxon*. **60**: 403-414.
- Bernal, R., S.R. Gradstein, Celis, M.** (Editores). (2015). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. <http://catalogoplantasdecolombia.unal.edu.co>
- Brown, J.H. & Lomolino, M.V.** (1998). Biogeography, second edition. Sunderland MA: Sinauer Associates. p. 158.
- Brown, J.H.** (2001). Mammals of mountainsides: Elevational patterns of diversity. *Global Ecology and Biogeography*. **10**: 101-109.
- Brown, A.D. & Kappelle, M.** (2001). Introducción a los bosques nublados del Neotrópico: una síntesis regional. En: M. Kappelle & A.D. Brown (editores). Bosques nublados del Neotrópico. Santo Domingo de Heredia: Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio). p. 25-40.
- Chao, A., Chiu, C.-H., Jost, L.** (2016). Statistical challenges of evaluating diversity patterns across environmental gradients in mega-diverse communities. *Journal of Vegetation Science*. **27**: 437-438.
- CENIPACÍFICO.** (1986). Impacto ecológico en Bahía Málaga a raíz de los desarrollos de la Base Naval del Pacífico y carretera de acceso. Cenipacífico, Cali. p. 170.
- Colwell, R. K.** (2013). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples, Version 9. User's Guide and application. <http://purl.oclc.org/estimates>
- Correa-Gómez, D. F., Stevenson, P. R., Álvarez, E., Aldana, A. M., Umaña, M., Cano, Á.,... Devia, W.** (2013). Patrones de frecuencia y abundancia de sistemas de dispersión de plantas en bosques colombianos y su relación con las regiones geográficas del país. *Colombia forestal*. **16** (1): 33-51.
- Espinal, L. S.** (1990). Zonas de Vida de Colombia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. p. 121.
- Faber-Langendoen, D. & Gentry, A.H.** (1991). The Structure and Diversity of Rain Forests at Bajo Calima, Choco Region, Western Colombia. *Biotropica*. **23**: 2-11.
- Fischer, A., Blaschke, M., Bässler, C.** (2011). Altitudinal gradients in biodiversity research: The state of the art and future perspectives under climate change aspects. *Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz*. **11**: 35-47.
- Gentry, A. H.** (1982). Patterns of Neotropical Plant Species Diversity. *Evolutionary Biology*. **15**: 1-84.
- Gentry, A.H.** (1986). Sumario de patrones fitogeográficos y sus implicaciones para el desarrollo de la Amazonia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **16**: 101-116.
- Gentry, A.H.** (1988). Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. **75**: 1-35.
- Gentry, A. H.** (1996). A Field Guide to the Families and Genera of Woody Plants of Northwest South America (Colombia, Ecuador, Peru), with Supplementary Notes on Herbaceous Taxa. Washington DC: University of Chicago Press. p. 895.
- Gotelli, N.J. & Graves, G.R.** (1996). Null models in ecology. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press. p. 368.
- Gómez-Hernández, M., Williams-Linera, G., Lodge, D.J., Guevara, R., Ruiz- Sánchez, E., Gándara, E.** (2016). Phylogenetic diversity of macromycetes and woody plants along an elevational gradient in Eastern Mexico. *Biotropica*. **48**: 577-585.
- Grime, J. P.** (2006). Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties. John Wiley & Sons. p. 456.
- Hamilton, A.C. & Perrot, R.A.** (1981). A study of altitudinal zonation in the montane forest belt of Mt Elgon, Kenia/Uganda. *Vegetatio*. **45**: 107-125.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D.** (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica*. **4**: 1-9.
- Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., Jarvis A.** (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. **25**: 1965-1978.
- Kappelle, M., Brown, A.** (Editors). (2001). Bosques nublados del Neotrópico. Editorial IMBIO, Costa Rica, p. 397-442.
- Kelleher, G., Bleakley, C., Wells, S.** (1995). A global representative system of marine protected areas IV, Great Barrier Marine Park Authority, World Bank, IUCN, Washington.
- Kreft, H. & Jetz, W.** (2007). Global patterns and determinants of vascular plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. **104** (14): 5925-5930.
- Huston, M. & DeAngelis, D.L.** (1994). Competition and coexistence: The effects of resource transport and supply rates. *American Naturalist*. **144**: 954-977.
- Ibanez, T., Grytnes, J.A., Birnbaum, P.** (2016). Rarefaction and elevational richness pattern: A case study in a high tropical island (New Caledonia, SW Pacific). *Journal of Vegetation Science*. **27**: 441-451.
- Lomolino, M.V.** (2001). Elevation gradients of species-density: Historical and prospective views. *Global Ecology and Biogeography*. **10**: 3-13.
- McCain, C.M. & Grytnes, J.** (2010). Elevational gradients in species richness. In: *Encyclopedia of Life Sciences (ELS)*. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester.
- Mora-Osejo, L.E.** (1977). El Barniz de Pasto. *Caldasia*. **11**: 5-31.
- Murillo-A, J. & Murillo-P, M.T.** (2003). Pteridófitos de Colombia IV. Novedades en Cyathea (CYATHEACEA). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **27**: 45-51.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A., Kent, J.** (2000). Biodiversity hot spots for conservation priorities. *Nature*. **403**: 853-858.
- Otero, E., Mosquera, A., Silva, G., Guzmán, J. C.** (2009). El Chocó biogeográfico de Colombia. Santiago de Cali: Banco de Occidente Credencial.
- Palmer, M. W.** (1994). Variation in species richness – towards a unification of hypotheses. *Folia Geobot. Phytotax.* **29**: 511-530.
- Phillips, O. & Miller, J.S.** (2002). Global Patterns of Plant Diversity: Alwyn H. Gentry Forest Transect Data Set. St. Louis, MO: Missouri Botanical Garden Press.
- Rangel-Ch., J.O. & Lowy-C., P.D.** (1993). Colombia Pacífico: Tomo I. Santafé de Bogotá: Editorial del Fondo FEN. p. 393.
- Rangel-Ch., J. O. & Rivera-Díaz, O.** (2004). Diversidad y riqueza de espermatofitos en el Chocó biogeográfico. En J. O. Rangel-Ch (Editor). *Colombia Diversidad Biótica IV: El Chocó Biogeográfico/Costa Pacífica* (pp. 83–104). Santafé de Bogotá: Editorial del Fondo FEN. p. 997.

- Rangel-Ch., J.O. & Velázquez, A.** (1997). Métodos de estudio de la vegetación. En J.O. Rangel-Ch, P.D. Lowy & M. Aguilar (Editores). Colombia Diversidad Biótica II: tipos de vegetación en Colombia. Santafé de Bogotá: Editorial Guadalupe Ltda. p. 59-87.
- Rahbek, C.** (1995). The elevational gradient of species richness: A uniform pattern? *Ecography*. **18**: 200-205.
- StatSoft, Inc.** (2004). Statistica: Data analysis software system, version 7. Fecha de consulta: octubre de 2014. Disponible en: www.statsoft.com
- Storch D. & Gaston K. J.** (2004). Untangling ecological complexity on different scales of space and time. *Basic and Applied Ecology*. **5**: 389-400.
- Vargas S., F. & Bolaños-L., M.E.** (1999). Anfibios y reptiles presentes en hábitats perturbados de la selva lluviosa tropical en el Bajo Anchicayá, Pacífico colombiano, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **23**: 499-511.
- Vázquez J.A. & Givnish T.J.** 1998. Altitudinal gradients in tropical forest composition, structure, and diversity in the Sierra de Manantlan. *Journal of Ecology*. **86**: 999-1020.
- Vetaas, O.R. & Grytnes, J.A.** (2002). Distribution of vascular plants species richness and endemic richness along the Himalayan elevation gradient in Nepal. *Global Ecology and Biogeography*. **11**: 291-301.
- Whittaker, R. J.** (2007). *Island biogeography: Ecology, evolution, and conservation*. Oxford New York: Oxford University Press. p. 401.
- Wright, D. H.** (1993) Species-energy theory: An extension of species-area theory. *Oikos*. **41**: 496-506.
- Wright, D. H., Currie, D.J., Maurer, B.A.** (1993). Energy supply and patterns of species of species richness on local and regional scales. *Species diversity in ecological communities*. R.E. Ricklefs & D. Schluter, editors. University of Chicago Press, Chicago. p. 66-74.

Reporte del hallazgo de restos de *Hilarchotherium* sp. (Mammalia, Astrapotheria) y de material asociado en una nueva localidad fosilífera del valle inferior del Magdalena, ciénaga de Zapatosa, Cesar, Colombia

✉ Mauricio Pardo Jaramillo

Dirección Técnica de Geociencias Básicas, Museo Geológico e Investigaciones Asociadas, Museo Geológico “José Royo y Gómez”, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

En abril de 2018 el Museo Geológico “José Royo y Gómez” recibió el reporte del hallazgo de material paleontológico en cercanías del corregimiento de La Mata, en el municipio de Chimichagua (Cesar), a orillas de la ciénaga de Zapatosa. El material recolectado por pobladores del lugar incluía un gran diente de caimán (*Purussaurus*), restos de tortugas (Podocnemididae?) y matamata (*Chelus*), y un fragmento de maxilar de *Hilarchotherium* sp. (Mammalia, Astrapotheria), conocido previamente por los hallazgos de la especie tipo *Hilarchotherium castanedaii* (Vallejo-Pareja, et al., 2015) en los estratos del Grupo Honda (Formación La Victoria) en el municipio de Purificación, Tolima, y de *Hilarchotherium miyou* (Carrillo, et al., 2018) de la Formación Castilletes, al sureste de la península de La Guajira. Además, este informe constituye el primer registro de rocas continentales del Mioceno en esta región del país. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Astrapotheria; *Hilarchotherium castanedaii*; *Hilarchotherium miyou*; Mioceno.

Report on the finding of remains of *Hilarchotherium* sp. (Mammalia, Astrapotheria) and associated material in a new fossil locality in the Lower Valley of Magdalena, Zapatosa wetlands, Cesar, Colombia

Abstract

In April 2018, the “José Royo y Gómez” Geological Museum received a report on the discovery of paleontological material in the vicinity of La Mata village, in the municipality of Chimichagua (Cesar), on the banks of the Zapatosa wetlands. The material collected by local residents included a large alligator tooth (*Purussaurus*), remains of (Podocnemididae?) and matamata turtles (*Chelus*), and a maxillary fragment of *Hilarchotherium* sp. (Mammalia, Astrapotheria) known so far for the findings of the type species *Hilarchotherium castanedaii* (Vallejo-Pareja, et al., 2015) in the strata of the Honda Group (La Victoria Formation) in the town of Purificación, Tolima, and of *Hilarchotherium miyou* (Carrillo, et al., 2018) from the Castilletes Formation in the southeast area of La Guajira peninsula. Additionally, this report is the first record of Miocene continental rocks in this region of the country. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Astrapotheria; *Hilarchotherium castanedaii*; *Hilarchotherium miyou*; Miocene.

Introducción

Los estudios geológicos y paleontológicos del norte de Colombia han ganado relevancia en los últimos años. Mediante los trabajos de cartografía geológica en esta región, desarrollados principalmente por el Servicio Geológico Colombiano en asociación con diversas entidades, se ha logrado una cobertura del 100 % de la cartografía en escala 1:100.000 de la costa Atlántica, de la península de La Guajira y los límites nororientales con Venezuela (Planchas 1 a 57). Asimismo, investigadores de la Universidad Nacional han adelantado trabajos en paleontología, entre los cuales es de gran relevancia el de Villarroel & Clavijo (2005),

por su clasificación taxonómica de cinco ejemplares fósiles (Mammalia) y la revisión general de la estratigrafía; en él los autores proponen un modelo más sencillo que agrupa las unidades litoestratigráficas del Neógeno en la costa Caribe. Otros estudios de gran relevancia internacional han sido liderados por el *Smithsonian Tropical Research Institute* – STRI, entre los cuales cabe destacar los estudios del Cerrejón, con descubrimientos tan famosos como el de la *Titanoboa*

Correspondencia:

Mauricio Pardo Jaramillo; mpardo@sgc.gov.co

Recibido: 26 de junio de 2018

Aceptado: 3 de agosto de 2018

Editor: Carlos Jaramillo Muñoz

cerrejonensis (Head, et al., 2009), la serpiente más grande de la que se tenga registro a nivel mundial, así como el trabajo multidisciplinario de Moreno, et al. (2015), con prefacio de Jaramillo, et al. (2015), en el cual se revisan y estudian los depósitos del Neógeno en la cuenca de Cocinetas, así como otros estudios paleontológicos de la misma cuenca, como el de Carrillo, et al. (2018), en el que se describe el nuevo astrapoterio *Hilarcotherium miyou*, entre otros. Se destacan también estudios como el de Moreno-Bernal, et al. (2016) sobre Crocodylia y otros en este mismo contexto, como el de Suárez, et al. (2016), quienes describen la nueva especie de marsupial carnívoro *Lycopsis padillai* (Mammalia, Metatheria).

Esta nota constituye el primer reporte del hallazgo de material del género *Hilarcotherium* además del encontrado previamente de su especie tipo *Hilarcotherium castanedaii* (Vallejo-Pareja, et al., 2015), y de *Hilarcotherium miyou* (Carrillo, et al., 2018). El material del astrapoterio consta de un fragmento del maxilar y se le asignó el número de catálogo SGC-MGJRG.2018.V.2. Este material, el de un diente de caimán (*Purussaurus*) y los restos de tortugas (Podocnemididae?) y matamatas (*Chelus*), constituyen el primer reporte paleontológico en la zona, así como de la identificación de sedimentitas continentales del Mioceno en la región, con edades y facies no reportadas en anteriores trabajos de cartografía de esta zona.

Estos hallazgos hacen parte de los descubrimientos de nuevos especímenes paleontológicos y biológicos que se han hecho recientemente en el país. Son restos fósiles que se encuentran en zonas que no era posible visitar antes del fin del conflicto armado debido a su complicada situación de orden público y su difícil acceso.

Procedencia geográfica y litoestratigráfica de la pieza

El ejemplar reportado se encontró en una playa a orillas de la ciénaga de Zapatos en la península (isla en tiempo de invierno) conocida como Llevanzuelo o Isla Barrancones según la plancha geológica 55 El Banco, en escala de 1:100.000 (Ingeominas-UIS, 2006), y situada a 1,9 km al suroeste del corregimiento de La Mata, del municipio de Chimichagua, departamento del Cesar. Las siguientes son las coordenadas geográficas del punto: 9° 07' 58,1" N y 73° 45' 49,5" O, a 25 metros sobre el nivel del mar.

El espécimen fue recolectado en febrero del año 2018 por los señores Hasmet Florián y José Martínez, habitantes del corregimiento de La Mata, quienes reportaron el hallazgo y gentilmente donaron las piezas al Museo Geológico "José Royo y Gómez" del Servicio Geológico Colombiano. Los restos fósiles fueron encontrados en tiempo seco en forma de material suelto en las playas originadas por la erosión de los pequeños barrancos ubicados en cercanías de las orillas de la ciénaga.

Las sedimentitas de donde se desprendieron los fósiles están compuestas por areniscas cuarzosas de grano fino y medio, de color rojizo, con algunos clastos de origen

metamórfico (cuarcitas) y, en menor proporción, limolitas y arcillolitas rojizas y guijos de origen volcánico, características que sugieren que los estratos podrían atribuirse al Grupo Real, unidad miocénica no reconocida hasta el momento en la plancha 55 El Plato, sin embargo, en dicha plancha se describe el Grupo Real como conformado por areniscas cuarzosas, suelos y sedimentos rojos y niveles volcánicos piroclásticos, en tanto que en la parte superior aparecen capas de conglomerados intercaladas con estratos arcillosos rojos. Así pues, el hallazgo de sedimentitas continentales en varias de las islas de la ciénaga de Zapatos constituye un aporte que permitirá refinar la cartografía de la región.

Paleontología sistemática

Clase: Mammalia

Orden: Astrapotheria Lydekker, 1894

Familia: Astrapotheriidae Ameghino, 1887

Subfamilia: Uruguaytheriinae Kraglievich, 1928

Género: *Hilarcotherium* Vallejo-Pareja, et al., 2015

Especie: *Hilarcotherium* sp.

Material de referencia y métodos

Astrapotherium? ruderarium (FMNH 13426); *Astrapotherium magnum* (FMNH P14251, P13173); *Astrapothericulus iheringi* (MACN A 52-419, MACN A 52-417), *Albertogaudrya* (CNS-V-10.000(1-2)); *Granastrapotherium snorki* (UCMP 40017, 40187, 40188, 40358, 40408 IGMp-881230); *Parastrapotherium holmbergi* (FMNH 13329); *Parastrapotherium* sp. (FMNH 13569); *Xenastrapotherium kraglievichi* (MLP 12-96, UCMP 38115); *Xenastrapotherium christi* (NMB Aa 21). *Hilarcotherium castanedaii* (IGM p881231), *Maddenia* (MPEF PV 7735), *Astraponotus* (MPEF PV 1296 A), *Hilarcotherium miyou* (IGM p881327, MUN-STRI 34216).

El material de astrapoterio descrito proviene de la ciénaga de Zapatos, en el departamento del Cesar, nororiente de Colombia (Figura 1 y 2); la terminología de la morfología dental es la usada por Jhonson (1984) y las medidas dentales se hicieron siguiendo la metodología de Jhonson & Madden (1997), Vallejo-Pareja, et al. (2015) y Carrillo, et al. (2018).

Descripción de la pieza

Se trata de un fragmento del maxilar izquierdo con un premolar (P4) y un molar (M1). Los dientes superiores en su lado labial presentan hipsodoncia unilateral, lo que significa que exhiben coronas más altas del lado labial que del lado lingual. Se observa la presencia de un bolsillo anterolingual en M1, el parastilo reducido, y la falta de un cingulo en el lado labial; el reborde o cingulo presente en el lado lingual permite asignar los restos encontrados a la subfamilia Uruguaytheriinae (Kraglievich, 1928; Johnson & Madden, 1997; Kramarz & Bond, 2009, 2011; Vallejo-Pareja, et al., 2015). Al igual que *Granastrapotherium* (Johnson & Madden, 1997) y *Comahuetherium* (Kramarz



Figura 1. Lugar del hallazgo

& Bond, 2011), *Hilarcotherium* (Vallejo-Pareja, et al., 2015; Carrillo, et al., 2018) e *Hilarcotherium miyou* (Carrillo, et al., 2018), tiene solo un premolar superior (P4), el cual presenta un cíngulo lingual igual al de *H. castanedaii*, aunque también algunas diferencias con el P4 de *H. castanedaii* y de *H. miyou*, entre ellas, la presencia de un bolsillo anterolingual en *H. castanedaii* que en el ejemplar en estudio es apenas incipiente, en tanto que en *H. miyou* está ausente. El P4 es más pequeño que el M1 (Tabla 1), y representa el 26 % de la longitud total de la serie M1-P4, y tan solo el 15 % del total de la superficie oclusal P4-M1, teniendo en cuenta que falta una parte en el borde bucal. Al igual que en *H. castanedaii* y *G. snorki*, el P4 entra en oclusión directa con los dientes inferiores, lo cual se evidencia por el desgaste exhibido en su superficie oclusal, la cual está ligeramente por debajo del nivel del M1 al igual que en *Granastrapotherium snorki* e *H. miyou*. El P4 evidentemente estaba incorporado a la función masticatoria (Figura 3-4).

En el P4 el protocono está bien desarrollado, en tanto que no se conserva el esmalte del lado labial ni la región paraestilar del ectolofio; no hay signos de un pliegue labial como el de *Astrapothericulus* (Ameghino, 1887,

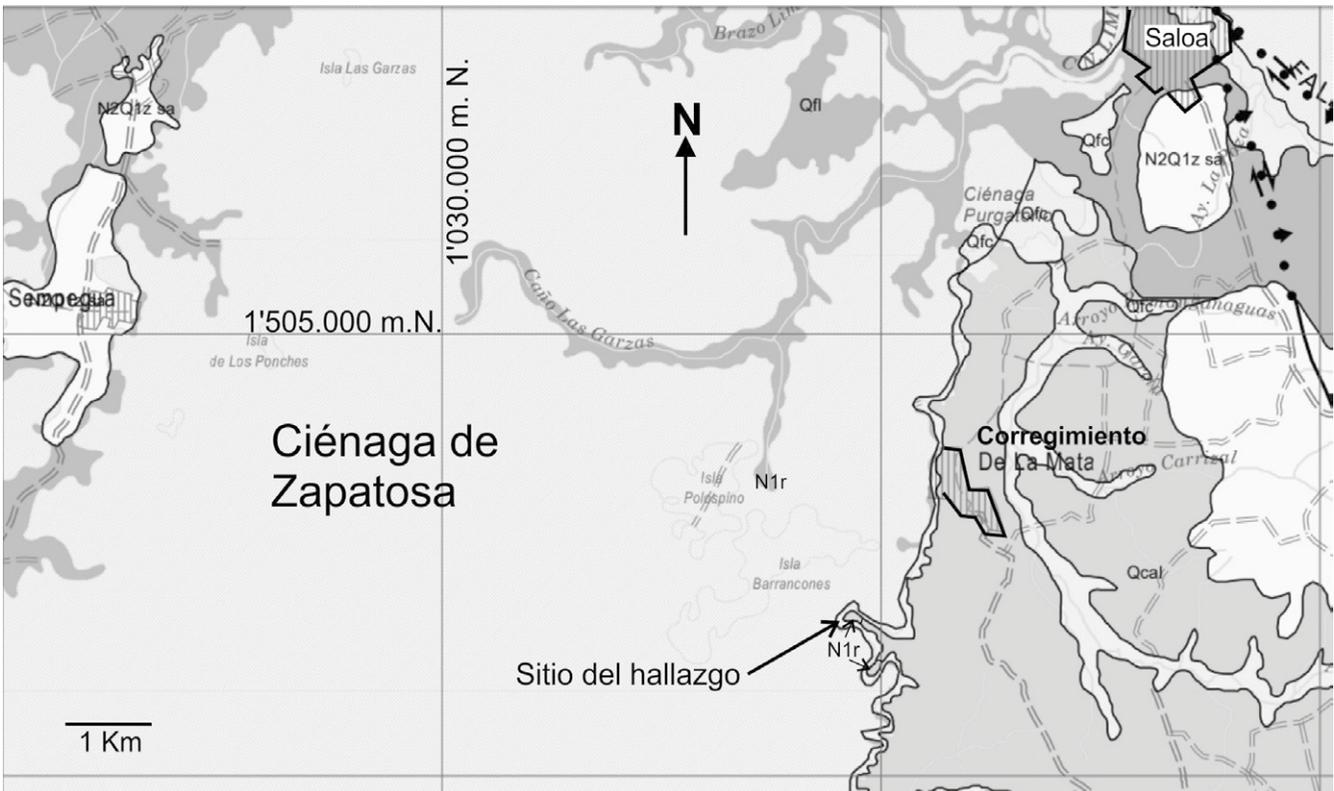


Figura 2. Mapa geológico con el sitio del hallazgo. Detalle; modificado de la plancha geológica 55, escala 1:100.000, El Banco, 2006, Origen Bogotá. **Qfc: Depósitos aluviales de canal.** Bloques, gravas, arenas y lodos; **Qcal: Depósitos de abanicos y terrazas.** Bloques, cantos, gravas, arenas y lodos volcano-sedimentarios, ígneas, metamórficas y sedimentarias; **N2Q1z sa: Formación ZaAmbrano-Sedimentitas de Arjona.** Conjuntos arcillosos de color marrón a violeta, con capas delgadas de areniscas calcáreas fosilíferas; **N1r: Grupo Real.** Arenas cuarzosas, suelos y sedimentos rojos y niveles volcánicos piroclásticos; en la parte superior, capas de conglomerados intercaladas con estratos arcillosos rojos

Tabla 1. Medidas dentales: * corona del diente incompleta; ** medida tomada en el alveolo

	Medidas en milímetros	Lado	Largo antero-posterior	Ancho máximo (bucal-lingual)	Altura máxima de la corona en el lado bucal
SGC-MGJRG.2018.V.2	P4	Izquierdo	15,66	20,4	20,68
	M1	Izquierdo	41,04	38,7	24,84
IGM p881231	P4	Izquierdo	18,95	21,23	21,15
	M1		42,47	51,3	17,75
MUN-STRI 34216	P4	Izquierdo	31,8**	40,7**	
	M1	Izquierdo	59,2*	65,4*	

1904), el de *Parastrapotherium* (Ameghino, 1887), el de *Comahuetherium* o el de *Maddenia* (Kramarz & Bond, 2009). Al igual que en *H. castanedaii*, el P4 no tiene hipocono y posee un pequeño metalofo que se extiende lingualmente desde el protocono a diferencia de *Astraponotus*

(Ameghino, 1901), *Albertogaudrya* (Ameghino, 1901; Carbajal, et al., 1977) y *Maddenia* (Kramarz & Bond, 2009). En el lado lingual el cíngulo está presente, siendo mucho menos prominente que el que presenta *H. castanedaii*, y se reduce levemente hacia la mitad de su longitud encerrando dos leves depresiones ubicadas en las porciones anterior y posterior del diente, siendo la anterior menos profunda y más reducida que la posterior. En la especie *H. castanedaii* estas características son más pronunciadas y la parte anterior es propiamente un bolsillo antero-lingual, rasgo bastante reducido en el ejemplar descrito, y ausente en *H. Miyou*. El P4 tiene un amplio valle central con orientación antero-posterior y se ensancha hasta el borde anterior del M1, a diferencia del P4 de *H. castanedaii*, en el cual el valle central se abre diagonalmente hacia el lado lingual. Las raíces del P4 están incluidas en el maxilar, es decir no son visibles a pesar de la abrasión sufrida por el contacto con la arena de la playa y el agua de la ciénaga.



Figura 3. Nomenclatura dental: vista oclusal del premolar (P4) y el molar (M1) superiores izquierdos

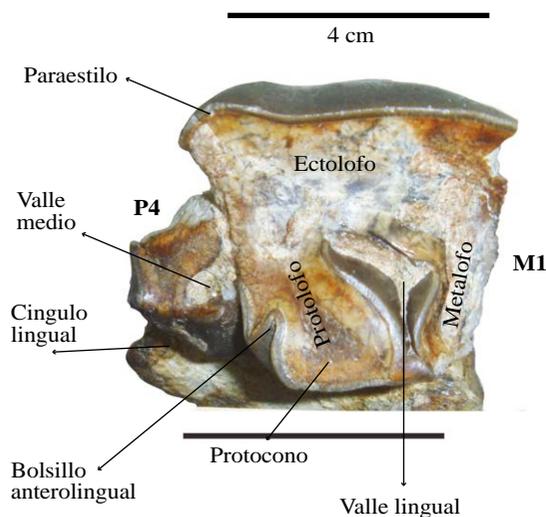


Figura 4. Vista oclusal del premolar (P4) y el molar (M1) superiores izquierdos

En la familia Astrapotheridae los molares superiores se caracterizan por la presencia de un valle central en forma de ‘Y’, de apertura en el lado lingual. Sin embargo, el valle lingual del M1 del espécimen en estudio, si bien se dirige al lado lingual, está encerrado por un cíngulo lingual (borde superior del lado lingual del molar); posiblemente la apertura al lado lingual estuvo presente, pero debido al grado de desgaste desapareció. Los brazos internos de este valle en forma de ‘Y’ están formados por un ganchillo muy corto, orientado hacia el metalofo, en tanto que el ganchillo más largo se orienta en dirección del protofofo. El M1 es birradicular, carece de pliegues en su lado lingual como en todos los Uruguaytheriinae, y el paraestilo reducido solo da lugar a una muy leve depresión en la parte anterior de la corona del lado labial. El M1 posee un profundo bolsillo anterolingual, característica presente en *Xenastropotherium*, *Granastropotherium* e *Hilarcotherium*. El bolsillo antero-lingual del M1 del espécimen estudiado es más agudo y tiene su base o silla menos pronunciada que la de *H. castanedaii*. El metalofo de este ejemplar está parcialmente relacionado con el borde lingual del protocono por el cíngulo que encierra el valle lingual, pero no conserva el cíngulo lingual en la base del metalofo, similar a lo observado en *Hilarcotherium castanedaii*,

Granastrapotherium y *Xenastrapotherium*. El espécimen en estudio perdió el borde posterolingual y por ello no se aprecia si existió o no un metastilo.

Ya que el espécimen en estudio presenta algunas diferencias con *Hilarcotherium castanedai* e *Hilarcotherium miyou*, se decidió designarlo tan solo a nivel genérico como *Hilarcotherium* sp., dada la falta de material complementario para comparar los restos. Asimismo, se consideró que la especie tipo está definida para este taxón a partir de un solo individuo, y que el material de *H. miyou* es fragmentario, por lo que se carece de paratipos o de material en diferentes estados de ontogenia que permitan erigir con certeza el material de estudio como una nueva especie o asignarla a alguna de las dos ya definidas.

Material asociado

***Purussaurus neivensis*.** En la misma localidad, los señores Florián y Martínez encontraron un diente de caimán que por sus dimensiones y características parece corresponder a *Purussaurus* (Caimaninae). El diente tiene una corona con esmalte de 43,26 mm y gran parte de la raíz, lo que le da a la pieza un largo máximo de 92,56 mm. El diente es ancho y romo y su sección basal es ligeramente ovalada (Figura 5A y B); en la superficie de la corona el esmalte es arrugado, siendo estas arrugas más pronunciadas a medida que se acercan a la parte apical del diente, pero menos marcadas hacia la base de la corona, en donde solo presenta finas estrías verticales.

El diente presenta dos carinas pronunciadas en los lados anterior y posterior, las cuales están presentes desde la parte media de la corona hasta la parte apical del diente: los bordes de estas estructuras tienen ornamentación fina como

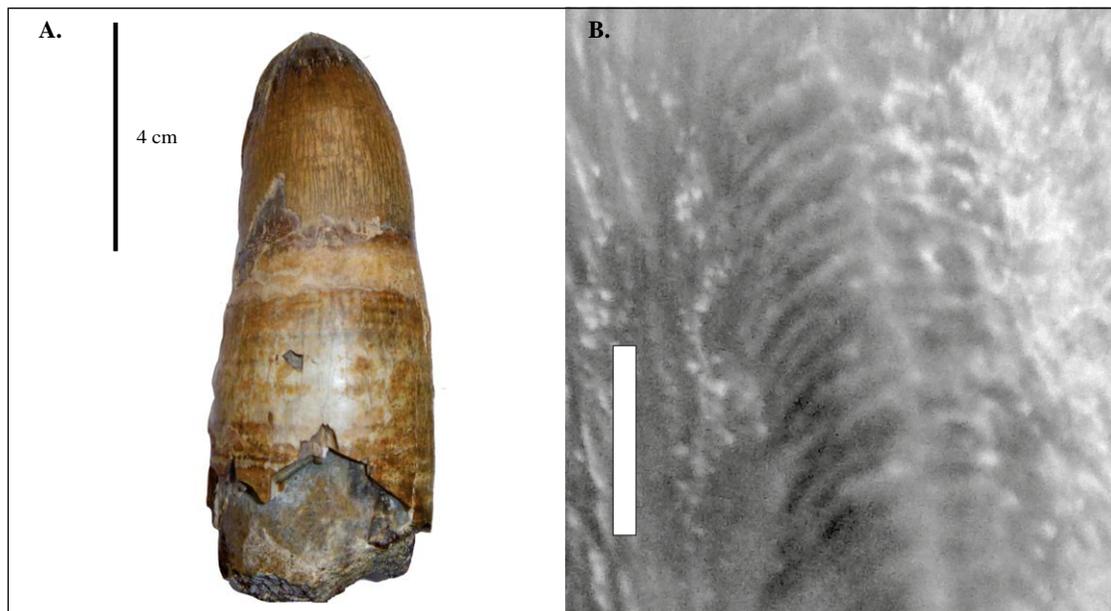
consecuencia de las arrugas de la corona, que se orientan tanto del lado lingual como del lado bucal en la parte media de la corona (Figura 5A y B) perpendicularmente al eje del diente, dando lugar a un borde arrugado. Esto concuerda con lo reportado por **Moreno-Bernal, et al., 2016**, para identificar y diferenciar a *Purussaurus neivensis* de *Purussaurus mirandai*.

***Tortuga matamata (Chelus)*.** El material de fósiles de tortugas matamata de la ciénaga de Zapatos es bastante fragmentario. El recolectado en esta ocasión está en poder de los señores Florián y Martínez. En dicho material se distingue el género *Chelus* tan solo por los característicos mucrones o grandes prominencias antero-posteriores en sus caparzones. En futuras visitas tendría que hacerse un estudio detallado de este nuevo material y obtener mejores ejemplares que aporten datos a las discusiones sobre el parentesco existente entre las matamatas fósiles y las existentes en la actualidad, tema que los especialistas aún están estudiando.

***Otras tortugas (familia Podocnemididae?)*.** En el sitio del hallazgo se encontraron y recolectaron dos fragmentos de caparzones (o plastrones?) de quelonios. Dichos fragmentos son lisos, ligeramente convexos, con medidas que oscilan entre los 30 y los 20 cm de diámetro. Los restos se asignaron tentativamente a la familia Podocnemididae, pero como en el caso de las matamatas, es necesario que los especialistas estudien los restos de quelonios que se encuentran frecuentemente en algunas de las playas de la ciénaga de Zapatos.

Repositorio

El astrapoterio estudiado corresponde al número de catálogo SGC-MGJRG.2018.V.2, en tanto que al diente de



Figuras 5. A. Diente de *Purussaurus neivensis* (SGC-MGNJRG.2018.V.7) **B.** detalle en vista lateral de la carena que muestra la ornamentación arrugada propia de la especie (**Moreno-Bernal, 2015**); escala 2 mm

Purussaurus le fue asignado el número de catálogo SGC.MGJRG.2018.V.7, y a los restos de tortugas Podocnemididae? los números SGC.MGJRG.2018.V.8 y SGC.MGJRG.2018.V.9. Las piezas reposan en la exhibición y las colecciones de fauna del Mioceno del Museo Geológico “José Royo y Gómez” del Servicio Geológico Colombiano en Bogotá.

Discusión y conclusiones

Aparte de los astrapoterios miocénicos del desierto de la Tatacoa (Villavieja, Huila) son pocas las descripciones de estos mamíferos placentarios en otros lugares del territorio colombiano. Entre los hallados se destacan *Hilarcotherium castanedaii* de la Formación La Victoria (Grupo Honda) en el municipio de Purificación (Tolima) y *Hilarcotherium miyou* de la Formación Castilletes, en la cuenca de Cocinetas, al sureste de la península de La Guajira. Así el hallazgo de los restos de especímenes de este género en la ciénaga de Zapatoza supone la ampliación paleobiogeográfica de la distribución de *Hilarcotherium*, y aporta datos que permiten mejorar los procesos e interpretaciones cladísticas entre los Uruguaytheriinae.

Este nuevo registro de material de mamíferos y reptiles constituye un recurso importante para conocer la distribución y las relaciones existentes entre las faunas del Mioceno, además de constituir un elemento importante para mejorar y refinar la cartografía geológica de la región. Para tal fin se hace necesario adelantar campañas de campo en tiempo seco que permitan recuperar y estudiar nuevo material. Así se podrán conocer mejor las relaciones entre las faunas de los yacimientos de las regiones del valle superior y el valle inferior del Magdalena, el sureste de La Guajira e, incluso, su continuación estratigráfica hacia Venezuela.

Se hace necesario que los investigadores especialistas en reptiles (Crocodylia y Testudines) y otros expertos en paleontología se involucren en el estudio del material que eventualmente se recupere en esta región del país. Esta clase de hallazgos constituyen, además, una excelente oportunidad para fortalecer las relaciones interinstitucionales, pues brinda un espacio para adelantar proyectos conjuntos con diferentes entidades que trabajan en el ámbito de las geociencias.

Agradecimientos

A los señores Hasmet Florián y Luis Martínez por el acompañamiento hasta el lugar del hallazgo y la generosa donación de las piezas que recolectaron. A Jorge Moreno Bernal por sus valiosos comentarios para la descripción del diente de caimán. A Leopoldo González Oviedo, Coordinador del Grupo de Trabajo de Museo e Investigaciones Asociadas del Servicio Geológico Colombiano.

Referencias

Ameghino, F. (1887). Enumeración sistemática de las especies de mamíferos fósiles coleccionados por Carlos Ameghino en los terrenos eocenos de Patagonia Austral y depositados en el Museo de La Plata. Boletín del Museo de La Plata. **1**: 1-26.

- Ameghino, F.** (1901). Notices préliminaires sur des ongulés nouveaux des terrains crétacés de Patagonie [Preliminary notes on new ungulates from the Cretaceous terrains of Patagonia]. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba. **16**: 349-429.
- Ameghino, F.** (1904). Nuevas especies de mamíferos, cretáceos y terciarios de la República Argentina [New species of mammals, Cretaceous and Tertiary, from the Argentine Republic]. Anales de la Sociedad Científica Argentina. **56-58**: 1-142.
- Carbajal, E., Pascual, R., Pinedo, R., Salfity, J.A., Vucetich, M. G.** (1977). Un nuevo mamífero de la Formación Lumbra (Grupo Salta) de la comarca de Carahuasi (Salta, Argentina). Edad y correlaciones. Publicaciones del Museo Municipal de Ciencias Naturales de Mar del Plata “Lorenzo Scaglia”. **2** (7):148-163
- Carrillo-Sánchez, J. D., Amson, E., Jaramillo, C., Sánchez, R., Quiroz, L., Cuartas, C., Rincón, A.F., Sánchez-Villagra, M. F.** (2018). The Neogene Record of Northern South American Native Ungulates. Smithsonian contributions to paleobiology, No. 101. 0081-0266. Washington, D.C.: Smithsonian Institution Scholarly Press, 2018.
- Head, J., Bloch, J., Hastings, A., Bourke, J., Cadena, E., Herrera, F., Polly, D., Jaramillo, C.** (2009). Giant boid snake from the Paleocene Neotropics reveals hotter past equatorial temperatures. Nature. **457**: 715-718. Doi: 10.1038/nature07671
- Ingeominas-UIS.** (2006). Geología de la Plancha 55 El Banco, escala 1:100.000, (Acuerdo específico 004 de 2005 complementario al convenio marco de cooperación 005 celebrado entre INGEOMINAS y la Universidad Industrial de Santander (UIS)). Bogotá, Colombia.
- Jaramillo, C., Moreno, F., Hendsy, A. J., Sánchez-Villagra, M. R., Marty, D.** (2015). Preface: La Guajira, Colombia: A new window into the Cenozoic neotropical biodiversity and the Great American Biotic Interchange. Swiss Journal of Paleontology. **134** (1):1-4.
- Johnson, S. C. & Madden, R. H.** (1997). Uruguaytheriinae Astrapotheres of Tropical South America. Chapter 22 in “Vertebrate Paleontology in the Neotropics. The Miocene Fauna of La Venta, Colombia”. Edited by Richard F. Kay, Richard H. Madden, Richard L. Cifelli, and John J. Flynn. Smithsonian Institution Press. Washington and London.
- Johnson, S. C.** (1984). Astrapotheres from the Miocene of Colombia, South America. University of California. Dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Paleontology in the Graduate Division of the University of California, Berkeley.
- Kraglievich, L.** (1928). Sobre el supuesto *Astrapotherium christi* Stehlin, descubierto en Venezuela (*Xenastrapotherium n. gen.*) y sus relaciones con *Astrapotherium magnum* y *Uruguaytherium beaulieui*. Editorial Franco-Argentina. Buenos Aires. p.- 1-16.
- Kramarz, A. G. & Bond, M.** (2009). A new Oligocene astrapothere (Mammalia, Meridungulata) from Patagonia and a new appraisal of astrapothere phylogeny. Journal of Systematic Palaeontology. **7**: 117-128.
- Kramarz, A. G., & Bond, M.** (2011). A new early Miocene astrapotheriid (Mammalia, Astrapotheria) from Northern Patagonia, Argentina. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen. **260**: 277-287.

- Lydekker, R.** (1894). Contribution to the knowledge of the fossil vertebrates of Argentina. 3. Study of extinct Argentine ungulates. *Anales del Museo de La Plata, Paleontología Argentina*. **2**: 1-91, pls 1-32.
- Moreno-Bernal, J. W., Head, J., Jaramillo, C.A.** (2016). Fossil crocodylians from High Guajira Peninsula of Colombia: Neogene faunal change in northernmost South America. *Journal of Vertebrate Paleontology*. Doi:10.1080/02724634.2016.1110586
- Moreno, F., Hendy, A., Quiroz, I., Hoyos, N., Jones, D., Zapata, V., Zapata, S., Ballen, G., Cadena, E., Cárdenas, A., Carrillo, J., Delgado-Sierra, D., Escobar, J., Martínez, I., Martínez, C., Montes, C., Moreno, J., Pérez, N., Sánchez, R., Suárez, C., Vallejo-Pareja, C., Jaramillo, C.** (2015). Revised stratigraphy of Neogene strata in the Cocinetas Basin, La Guajira, Colombia. *Swiss Journal of Palaeontology*. **134**: 5-43.
- Suárez, C., Forasiepi, A. M., Goin, F.J., Jaramillo, C.** (2016). Insights into the Neotropics prior to the Great American Biotic Interchange: New Evidence of Mammalian Predators from the Miocene of Northern Colombia. *Journal of Vertebrate Paleontology*. **36** (1): e1029581. Doi:10.1080/02724634.2015.1029581
- Vallejo-Pareja, M. C., Carrillo, J.D., Moreno-Bernal, J.W., Pardo-Jaramillo, M., Rodríguez-González, D.F., Muñoz-Durán, J.** (2015). *Hilarchotherium castanedaii*, gen. et sp. nov., A New Miocene Astrapothere (Mammalia, Astrapotheriidae) From The Upper Magdalena Valley, Colombia. *Journal of Vertebrate Paleontology*. **35**: e903960. Doi: 10.1080/02724634.2014.903960.
- Villarroel, C. & Clavijo, J.** (2005). Los mamíferos fósiles y las edades de las sedimentitas continentales del Neógeno de la costa Caribe colombiana. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **29** (112): 345-356.

Corals in a Changing world

Editores: Carmenza Duque y Edison Tello

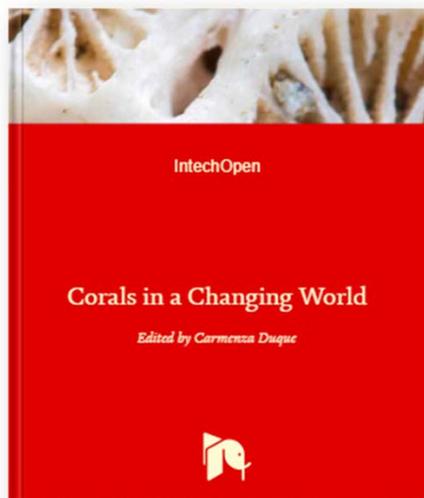
Editorial: IntechOpen

Fecha de publicación: Marzo 28 de 2018

DOI: 10.5772/65203

ISBN: 978-953-51-3910-2

Print ISBN: 978-953-51-3909-6



Los corales se conocen principalmente por su papel en los arrecifes de coral de las zonas tropicales y someras, los cuales constituyen el ecosistema marino más diverso, ya que cubren menos del 1 % de la superficie terrestre y dan comida y refugio a cerca del 25 % de las especies del mar. En estos ecosistemas, los corales se consideran como los verdaderos constructores del arrecife. Además de los corales arrecifales, se conoce de varias especies de corales que viven en ambientes fríos o ambientes profundos y sobre las cuales poco se sabe aún.

Lamentablemente, la supervivencia de estos animales coloniales, y de los ambientes que conforman está amenazada por el calentamiento global, la pesca excesiva, la contaminación y la presencia de especies invasoras, entre otros factores. Por ello, es urgente generar conocimiento que permita trazar mejores estrategias para su conservación y recuperación.

En este sentido, son diversos los esfuerzos de la academia para generar dicho conocimiento. Algunos de los estudios en este campo fueron recientemente recopilados en el libro *Corals in a Changing World* (<https://www.intechopen.com/books/corals-in-a-changing-world>), publicado por Intech-Open en el formato de libro de acceso abierto. Editado de forma brillante por la Profesora de la Universidad Nacional de Colombia Carmenza Duque, quien es Miembro de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y reconocida como la principal investigadora de la química de los organismos marinos en el país, y por el Profesor Edison Tello, de la Universidad de La Sabana, uno de los más jóvenes y brillantes investigadores en el campo de los productos naturales en Colombia, el volumen recopila diversos estudios que permiten tener una visión del estado del arte de la investigación sobre estos cnidarios.

En sus doce capítulos el libro reseña los estudios de reconocidos investigadores de diferentes partes del mundo que abordan desde diversas especialidades de la ciencias naturales (Biología, Ecología, Química, entre otras), el tema de los corales y otros antozoos en arrecifes y jardines coralinos de zonas someras y profundas (a más de 300 m), en las aguas frías del Atlántico norte (Noruega), en zonas subtropicales del mar Mediterráneo (Italia) y del océano Pacífico (China), así como de las zonas tropicales del Caribe (Florida, México, Colombia, Puerto Rico), con lo cual se dan a conocer las experiencias investigativas que buscan ampliar nuestro conocimiento en torno a este recurso tan amenazado por las condiciones actuales del planeta.

El libro reseña trabajos que abordan la descripción de especies de corales presentes en diferentes hábitats, así como el análisis de algunas de las enfermedades que las aquejan, como el blanqueamiento, y su efecto en los arrecifes, el estudio de sus interacciones con simbiontes y especies invasoras como las algas y las cianobacterias bentónicas arrecifales. Se aborda, incluso, la investigación de los “microcosmos coralinos”, entendidos como el cultivo de microambientes en sistemas controlados que sirven de modelo para evaluar el efecto de las condiciones ambientales y el cambio climático a manera de estrategia para enfrentarlo, atendiendo, incluso, asuntos técnicos de su implementación.

Asimismo, el volumen describe otros estudios sobre la forma de determinar el estado de salud de un sistema coralino, y cómo esta información resulta útil en el momento de adoptar estrategias de manejo de estos ambientes frágiles. Además, se evalúa el efecto de las estrategias de rehabilitación basadas en la acuicultura llevada a cabo en las comunidades costeras, así como en la salud y en la recuperación de las especies amenazadas, y sus implicaciones ambientales y sociales para esas comunidades.

El libro presenta, también, trabajos que abordan algunos de los usos que se dan a estos animales, desde la joyería basada en especies del género *Corallium* spp. hasta las aplicaciones farmacéuticas de los compuestos producidos por los octocorales y la implementación de estrategias computacionales en la optimización de la actividad biológica de dichos compuestos.

En resumen, el libro recopila los esfuerzos de los expertos por facilitar información comprobada para entender mejor las dinámicas y los riesgos que enfrentan estos organismos, aunque reconociendo todos que aún hay brechas de conocimiento sobre el tema y que se requiere continuar investigando. En ese contexto, esta recopilación contribuye a visibilizar dichos esfuerzos.

Freddy Alejandro Ramos

faramosr@unal.edu.co

Profesor Asociado, Departamento de Química
Universidad Nacional de Colombia – Bogotá

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 Research and Contributor ID* (Identificación del Investigador y del colaborador abierto)
7. Direcciones electrónicas de todos los coautores y códigos ORCID *Open Research 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*. Worldwide 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 arábica 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.
- 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 (Key words).
- Introducción.
- Materiales y métodos.
- Resultados y Discusión para comunicaciones cortas.
- Discusión.
- Agradecimientos a colaboradores y a las 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 JPEG o PNG.

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

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, Online 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.accefyn.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 tiff 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 tiff format.

3. Structure of the article

The following sections are to be included:

1. An abstract should be included in both Spanish and English.
2. Key words (no more than 6) should be included in both Spanish and English.
3. Introduction.
4. Materials and methods.
5. Results and Discussion for short communications.
6. Discussion.
7. Acknowledgments to collaborators and institutions and organizations which financed the research.
8. Declaration of conflict of interest.

4. Additional information: Figures

- Each figure is included in a separate page in jpg or tiff format
- Corresponding legends are included in a separate page
- Figures should be charged in JPG o PNG 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.

