

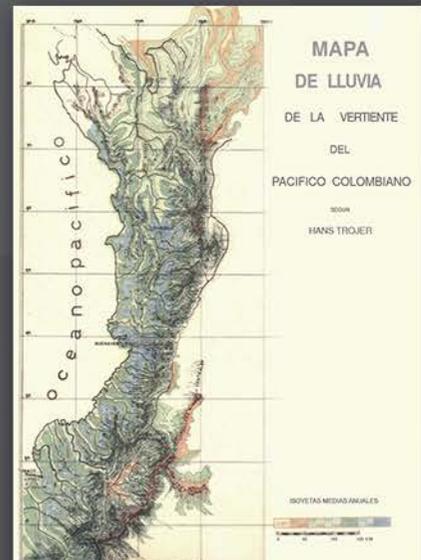
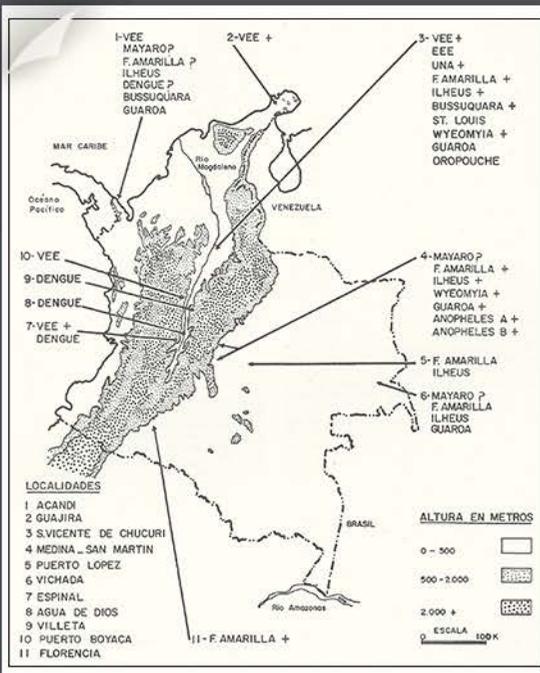
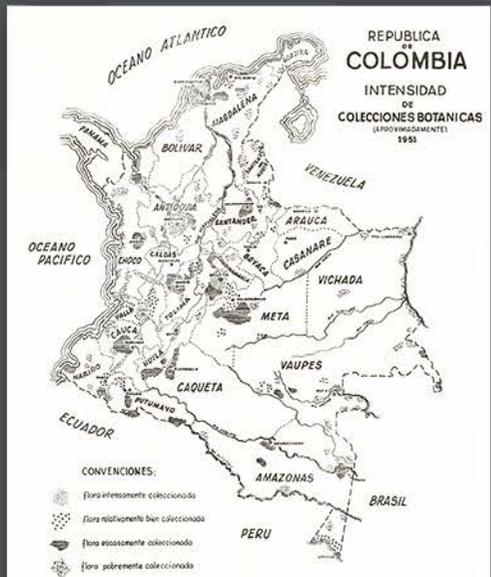
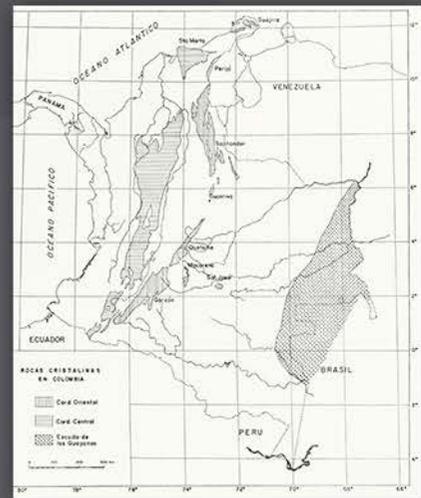
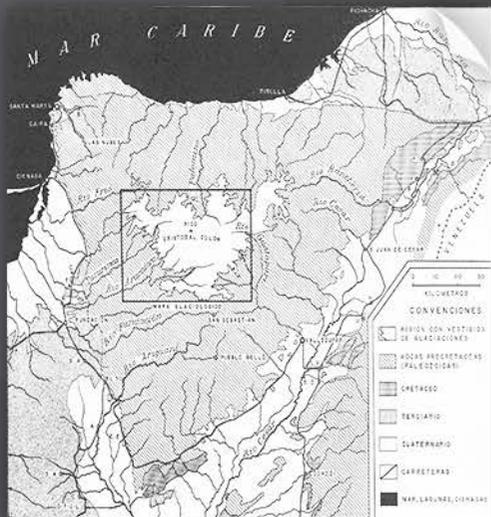
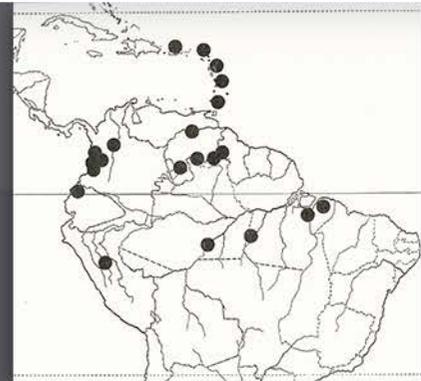
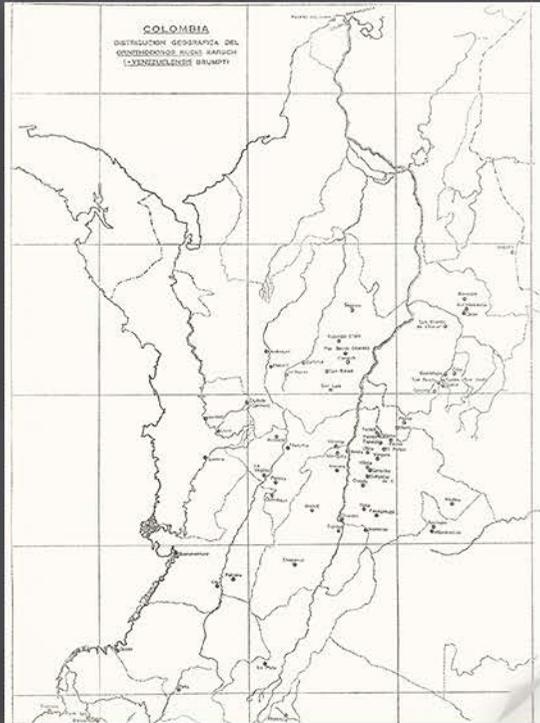
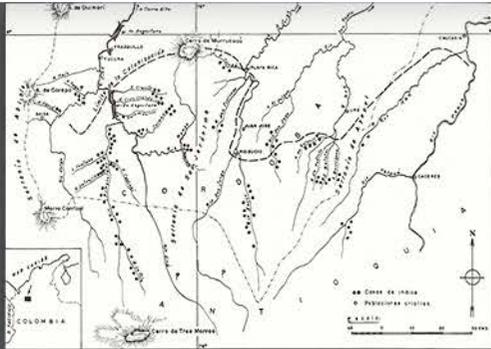


ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 42 • Número 162 • Págs. 1-126 • Enero-Marzo de 2018 • Bogotá - Colombia





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 162 • Págs. 1-126 • Enero - Marzo 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

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

Hernando Ariza Calderón, Doctor
Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Ciencias Naturales

José Luis Fernández Alonso, Doctor
Real Jardín Botánico, Consejo Superior de
Investigaciones Científicas, Madrid, España

Jaime Cantera, Doctorat d'Etat
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Roldán, Dr. rer. nat.
Universidad Católica de Oriente,
Rionegro, Antioquia, Colombia

Carlos Daniel Cadena Ordoñez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Patricia Chacón de Ulloa, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Sandra Baena Garzón, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia

Néstor Hernando Campos Campos, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia,
Sede Caribe, Colombia

Martha Patricia Ramírez Pinilla, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Jairo Castaño-Zapata, Ph. D.
Universidad de Caldas, Manizales, Colombia

Ciencias Químicas

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

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

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

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

Betty Lucy López Osorio, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ligia Sierra, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Luz Marina Jaramillo, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

Edgar Páez, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

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

Ciencias de la tierra

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

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

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

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

Matemáticas

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

Luis Español González, Doctor
Universidad de la Rioja, España

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

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

José R. Quintero, Ph. D.
Universidad del Valle, Cali, Colombia

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

Comité científico internacional

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

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

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

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

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

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

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

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

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 cartográficas 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), diciembre de 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn>

1	2	3
4		5
6	7	8

1. Gerardo Reichel-Dolmatoff. Apuntes etnográficos sobre los indios del alto Sinú. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1963, 12 (45): 29-40. Mapa del territorio tribal

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

3. Julio Cuatrecasas. Aspectos de la vegetación natural de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1958, 10 (40): 221-264. Figura 1. Distribución del género *Dacryoides* ("anime"), Burseraceae como ejemplo del carácter neotropical de la flora que forma la selva inferior

4. Henry Cornelius Raasvelt. Las glaciaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1957, 9 (38): 469-482. Figura 1. Situación del mapa glaciológico en el macizo de la Sierra Nevada de Santa Marta

5. Hans Bürgl. Historia geológica de Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1961, 11 (43): 137-191. Figura 1. Distribución de rocas cristalinas del Precambriano y Paleozoico antiguo en Colombia

6. Richard Evans Schultes. La riqueza de la flora colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1951, 9 (30): 230-242. Intensidad de colecciones botánicas (aproximadamente) 1951

7. Hernando Groot. Estudios sobre virus transmitidos por artrópodos en Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 1964, 12 (46): 191-217. Figura 1. Mapa de Colombia donde se ha registrado actividad de virus arbo

8. Hans Trojer. Meteorología y climatología de la vertiente del Pacífico colombiano. 1958, 10 (40): 199-219. Mapa de lluvia de la vertiente del Pacífico colombiano.



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 162 • Págs. 1-126 • Enero - Marzo de 2018 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences	El papel de la membrana mitocondrial externa en el control del metabolismo energético celular AP The mitochondrial outer membrane in the control of cell energy metabolism <i>Viktor V. Lemeshko</i> 6
Ciencias del Comportamiento Behavioral Sciences	Notas sobre el uso del helecho <i>Jokome</i> (<i>Adiantum pulverulentum</i> L. Pteridaceae) por el pueblo <i>Murui-Muina</i> “uitoto” en el piedemonte andino-amazónico de Colombia CR Notes about the use of the fern <i>Jokome</i> (<i>Adiantum pulverulentum</i> L. Pteridaceae) by the people <i>Murui-Muina</i> “uitoto” in the Foothill Andean-Amazonic of Colombia <i>Eider Bladimir Ortiz-Andoke (Q.E.P.D.), Lizhet Soto, David Sanín</i> 22
Ciencias Físicas Physical Sciences	Propiedades electrónicas y estructurales del $Ga_{1-x}Cr_xAs$ AO Electronic and structural properties of $Ga_{1-x}Cr_xAs$ <i>Nasly Y. Martínez Velásquez, Jairo Arbey Rodríguez Martínez</i> 26
	Numerical simulations of the formation of the Milky Way disk of satellites through the accretion of associations of dwarf galaxies OA Simulaciones numéricas de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea a partir de la acreción de asociaciones de galaxias enanas <i>José Benavides Blanco, Rigoberto A. Casas-Miranda</i> 32
	Experimental study of nanobubbles in salt solutions OA Estudio experimental de nanoburbujas en soluciones salinas <i>Carlos Andrés Sjogreen, David A. Landínez Téllez, Jaiver Eduardo Rosas Pérez, Paulo César Plazas Hurtado, Jairo Roa-Rojas</i> 41
Ciencias Naturales Natural Sciences	Aporte al conocimiento de las medusas (Cnidaria: Medusozoa) en el departamento del Atlántico, Colombia AO Contribution to the knowledge on jellyfishes (Cnidaria: Medusozoa) in the department of Atlántico, Colombia <i>Jeferson Durán-Fuentes, Adriana Gracia C., Carlos Osorio M., Cristina Cedeño-Posso</i> 49

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

- Plantas utilizadas como tiendas por murciélagos tenderos en la selva pluvial central del Chocó, Colombia** **AO**
Plants used as refuge by bats in the central rainforest of Chocó, Colombia
Yucely del Carmen Copete-Mosquera, Yinerla Rentería-Machado, Leison Palacios-Mosquera, Hugo Mantilla-Meluk, Alex Mauricio Jiménez-Ortega 58

- Diversidad y composición de licofitas y polypodiopsidas del páramo de Anaime, Cajamarca, Tolima, Colombia** **AO**
Diversity and composition of lycophytes and polypodiopsida of the páramo de Anaime, Cajamarca, Tolima, Colombia
Lina Marcela Vargas Gaviria, Derly Astrid Buitrago, Héctor Eduardo Esquivel 65

- Una nueva especie de *Miconia* (Melastomataceae) de hojas rojizas de los andes de Colombia** **AO**
A new species of *Miconia* (Melastomataceae) of reddish leaves from the Andes of Colombia
Humberto Mendoza-Cifuentes, Juan Mauricio Posada-Herrera 74

- Cananguchales y manglares: humedales forestales de las zonas bajas tropicales, tan semejantes como contrastantes** **AP**
Mauritia-dominated forests and mangroves: Tropical swamp forests, as similar as contrasting
Ligia Estela Urrego G. 80

**Ciencias
Químicas**
Chemical Sciences

- Caracterización del conjugado no covalente de grafeno y ácido fólico mediante espectroscopia Raman y métodos computacionales** **AO**
Characterization of the non-covalent conjugate graphene-folic acid using Raman spectroscopy and computational methods
John J. Castillo, Angie E. Orduz, Ciro E. Rozo 96

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

- Algoritmo teórico para la estimación de la radiación solar global para una atmósfera despejada** **AO**
Theoretical algorithm for estimating global solar radiation for a cloudless atmosphere
Carlos Girado-Polo, Leonardo Gónima-Gónima 104

- In Memoriam**
Mariano Ospina Hernández 114

- Enfoque y alcance**
Focus and Scope 115

El papel de la membrana mitocondrial externa en el control del metabolismo energético celular

Viktor V. Lemeshko

Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 23 de noviembre de 2017

Resumen

Hasta 95 % de la energía en las células eucariotas se produce en las mitocondrias, las cuales se componen de dos membranas, la interna y la externa. La principal función de la membrana interna es la fosforilación oxidativa. El trifosfato de adenosina (*adenosine triphosphate*, ATP) y el fosfato de creatina, producidos en las mitocondrias, se transfieren al citosol atravesando la membrana mitocondrial externa, básicamente a través de las porinas (*voltage-dependent anion channel*, VDAC). Dado que los mecanismos de generación del potencial eléctrico en esta membrana se desconocen, generalmente se asume que la compuerta eléctrica de los VDAC siempre está abierta. Sin embargo, el potencial de la membrana mitocondrial externa puede generarse de manera dependiente del metabolismo energético celular mediante diversos mecanismos. La generación de dicho potencial mediante los complejos VDAC-hexocinasa en las células cancerígenas, o la oxidación directa del NADH citosólico en las mitocondrias de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* permiten explicar los efectos de Crabtree y Warburg como una supresión eléctrica de las mitocondrias. Según el modelo desarrollado, la prevención de la formación de los complejos VDAC-hexocinasa por acción de algunos factores podría causar efectos anti-Warburg y anticancerígenos. Además, este potencial positivo generado por los complejos VDAC-creatina-cinasa podría proteger las mitocondrias de los cardiomiocitos y de otras células frente a los niveles tóxicos de calcio en el citosol. Los mecanismos propuestos de generación del potencial de la membrana dependiente del metabolismo energético celular, sugieren que las propiedades eléctricas del VDAC tienen un papel importante en varios procesos fisiológicos y patofisiológicos. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Membrana externa mitocondrial; VDAC; Potencial de membrana; Levadura; Cáncer; Corazón.

The mitochondrial outer membrane in the control of cell energy metabolism

Abstract

Up to 95% of the energy in the eukaryotic cells is produced in the mitochondria, which are composed of two membranes, internal and external. The main function of the inner membrane is the oxidative phosphorylation. ATP and/or phosphocreatine produced in mitochondria are transferred to the cytosol across the mitochondrial outer membrane, mainly through the porins (voltage-dependent anion channel, VDAC). As the mechanisms of generation of the electrical potential on this membrane are not known, it is generally assumed that the VDAC electric gate is always open. However, the outer membrane potential (OMP) of mitochondria may be generated by various mechanisms in a manner dependent on the cell energy metabolism. OMP generation by the VDAC-hexokinase complexes in cancer cells, or by the direct oxidation of cytosolic NADH in the mitochondria of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*, may explain the Crabtree and Warburg effects as an electrical suppression of mitochondria. According to the model developed, the prevention of the formation of the VDAC-hexokinase complexes may result in anti-Warburg and anti-cancer effects. In addition, the generation of the positive OMP by the VDAC-creatine kinase complexes could protect mitochondria in cardiomyocytes and other cells against toxic levels of cytosolic calcium. The mechanisms proposed for OMP generation dependent on the cell energy metabolism suggest that the VDAC electrical properties play an important role in various physiological and pathophysiological processes. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Mitochondrial outer membrane; VDAC; Membrane potential; Yeast; Cancer; Heart.

Correspondencia:

Viktor V. Lemeshko, vvasilie@unal.edu.co, **Recibido:** 14 de noviembre de 2017, **Aceptado:** 5 de febrero de 2018, **Editor:** Luis Fernando García

Introducción

Las mitocondrias, organelas intracelulares formadas por dos membranas, desempeñan un papel fundamental en el metabolismo energético celular. El ATP se sintetiza en la matriz mitocondrial mediante el proceso de la fosforilación oxidativa en la membrana mitocondrial interna. En las mitocondrias de los cardiomiocitos, en las neuronas, en las células musculares y en otras, también se sintetiza el fosfato de creatina (CrP) a partir del ATP y de la creatina (Cr). Para suministrar la energía al citosol, el ATP y el CrP producidos en las mitocondrias atraviesan la membrana mitocondrial externa en su forma aniónica. En varias demostraciones experimentales se ha visto cómo la membrana externa restringe significativamente el flujo entre las mitocondrias y el citosol de estos y otros metabolitos cargados (**Vander Heiden, et al.**, 2000; **Lemasters & Holmuhamedov**, 2006; **Rostovtseva & Bezrukov**, 2012; **Simson, et al.**, 2016).

La mayor parte de las proteínas de la membrana externa corresponde a las porinas de tipo VDAC (**Mannella**, 1982), a través de las cuales atraviesan los metabolitos cargados (**Colombini**, 1979, 2016). Se ha demostrado que el VDAC, con una compuerta sensible al voltaje, cambia su permeabilidad a los aniones en una forma dependiente del potencial eléctrico de la membrana (**Colombini, et al.**, 1996; **Rostovtseva & Colombini**, 1997; **Colombini & Mannella**, 2012). Por ejemplo, el VDAC se cierra casi completamente para el ATP, con un potencial de membrana de unos 40 mV (positivo o negativo), aunque sigue siendo permeable a los cationes (**Benz, et al.**, 1990; **Colombini, et al.**, 1996; **Hodge & Colombini**, 1997).

Sin embargo, varios autores han descartado la posibilidad del control eléctrico del metabolismo energético mitocondrial y celular a nivel de la membrana externa (**Benz, et al.**, 1990; **Lemasters & Holmuhamedov**, 2006). Tampoco se han propuesto otros mecanismos para explicar la generación del potencial de la membrana externa, excepto el equilibrio de Donnan (**Liu & Colombini**, 1992).

En la actualidad el concepto más aceptado para la regulación de la permeabilidad de la membrana externa es el “taponamiento” molecular de los VDAC, especialmente con la tubulina y otras proteínas mitocondriales o citosólicas (**Liu & Colombini**, 1992; **Kmita, et al.**, 2003; **Rostovtseva & Bezrukov**, 2012; **Rostovtseva, et al.**, 2015). En el más reciente ejemplo, hasta 98 % de los VDAC en la membrana externa de los cardiomiocitos podría verse taponado por la tubulina y el retículo sarcoplasmático muy cercano a las mitocondrias (**Simson, et al.**, 2016). Sin embargo, los datos experimentales obtenidos en el estudio de **Simson, et al.** (2016) no descartan que el “taponamiento” solo de una parte de los VDAC favorezca la generación del potencial de la membrana externa y la modulación eléctrica de su permeabilidad frente a varios metabolitos cargados de una manera dependiente del metabolismo energético (**Lemeshko**, 2014, 2016, 2017a), lo cual también facilita la unión dependiente del potencial de la tubulina con el VDAC (**Rostovtseva & Bezrukov**, 2012; **Rostovtseva, et al.**, 2017).

Por otro lado, se ha reportado un potencial eléctrico de hasta -43 mV relacionado con la membrana externa en células vivas (**Porcelli, et al.**, 2005). Según el análisis teórico (**Lemeshko**, 2006), se puede suponer que el potencial superficial de la membrana interna de las mitocondrias energizadas pudo haber interferido significativamente en los resultados reportados.

Como alternativa a la regulación de la permeabilidad de la membrana externa mediante el “taponamiento” molecular de los VDAC, se han propuesto varios mecanismos de generación del potencial de la membrana externa (**Lemeshko**, 2002, 2006, 2014-2017b).

En este estudio se proponen varios mecanismos de generación del potencial de la membrana externa con base en las evaluaciones termodinámicas en los modelos computacionales desarrollados. Se halló que para algunas condiciones fisiológicas, el potencial de la membrana externa puede alcanzar niveles suficientemente elevados para generar el cierre eléctrico de los VDAC en la membrana externa. Se describen dos tipos de mecanismos de generación del potencial: mediante la difusión simple de los metabolitos negativamente cargados a través de la membrana externa, y la transferencia activa del grupo fosforilo a través de esta o de las dos membranas mitocondriales. Asimismo, se evidencia el posible papel fisiológico y patofisiológico del potencial de la membrana externa, lo cual explicaría, por ejemplo, el mecanismo de los efectos de Crabtree y Warburg, y la protección de las células frente a la muerte debida a niveles tóxicos de calcio.

Generación del potencial de la membrana mitocondrial externa mediante la diferencia de su permeabilidad frente a varios metabolitos cargados

Generación del potencial de la membrana externa mitocondrial mediante la circulación de varios compuestos fosforilados. Las primeras evaluaciones termodinámicas de la generación del potencial de la membrana externa mediante la circulación de metabolitos cargados, con distintos grados de permeabilidad, se hicieron para el modelo con flujos estacionarios del CrP, del fosfato inorgánico y de la creatina (Cr), sin contar con la posible contribución del potencial del equilibrio de Donnan, o contando con ella (**Lemeshko & Lemeshko**, 2000). Se ha demostrado que la magnitud del potencial de la membrana externa calculado, con valores de hasta -5 mV (sin la contribución adicional del potencial de Donnan) y de -10 mV (con la contribución adicional del potencial de Donnan), depende de la intensidad del flujo metabólico.

En el caso más general (**Lemeshko**, 2017a), que incluye también la circulación de otros compuestos fosforilados, como el ATP, el adenosín difosfato (ADP) y el adenosín monofosfato (AMP), se puede desarrollar un modelo computacional más complejo que tenga en cuenta las características cinéticas de todas las enzimas y transportadores involucrados en el proceso estacionario, las

características volt-ampéricas de los VDAC en la membrana externa y las concentraciones de varios metabolitos, aplicando la ecuación de Goldman para cada flujo metabólico a través de la membrana externa. En general, el valor y el signo del potencial final de la membrana externa debe ser el resultado de la superposición de los potenciales eléctricos generados mediante distintos mecanismos en los cuales el VDAC y la membrana externa representan los elementos cruciales en el control del metabolismo energético celular.

Los metabolitos activos de reacciones de reducción-oxidación (redox) de carga negativa, también pueden atravesar la membrana externa y entregar electrones directamente a la cadena respiratoria desde el espacio entre las membranas mitocondriales. En varios casos particulares, como las mitocondrias de plantas (Earnshaw, 1975) y levaduras (Ohnishi, *et al.*, 1966; Rigoulet, *et al.*, 2004), los nucleótidos reducidos de piridina, el NADH o el NADPH producidos en el citosol, la oxidación se da por la vía externa mitocondrial atravesando la membrana.

Modelo de generación del potencial de la membrana mitocondrial externa mediante la circulación de los nucleótidos de piridina, NADH y NAD⁺ a través de la membrana. En la levadura *S. cerevisiae*, el NADH que se produce en exceso en el citosol se oxida en la superficie de la membrana interna por acción de la deshidrogenasa externa (DH_e), y entrega electrones a la cadena respiratoria (Luttik, *et al.*, 1998; Bakker, *et al.*, 2001). El NAD⁺ que se acumula en el espacio entre las membranas mitocondriales vuelve al citosol atravesando la membrana externa para recuperar el NADH. De esta manera, la circulación de los nucleótidos de piridina (Figura 1A) con distintas cargas netas, NADH(2-) y NAD⁺(1-), puede llevar a la generación del potencial de la membrana externa (Lemeshko, 2017b). Suponiendo, con base en algunos datos indirectos (Rostovtseva, *et al.*, 2002; Lemeshko, 2017b), que la permeabilidad del VDAC para el NADH(2-) es más alta que para el NAD⁺(1-), el potencial de la membrana externa calculado es negativo (Lemeshko,

2017b). Se sabe, asimismo, que la actividad de la DH_e se incrementa significativamente con los iones de calcio (Earnshaw, 1975) (Figura 1A).

Sin embargo, la generación del potencial de la membrana externa en las mitocondrias de levaduras nunca se ha demostrado experimentalmente. Además, las restricciones de la permeabilidad observadas en la membrana externa para los metabolitos cargados en estas células, se han explicado por el “taponamiento” de los VDAC con las proteínas citosólicas (Kmita, *et al.*, 2003). Las evaluaciones termodinámicas del potencial de la membrana externa que podría generarse con la circulación del NADH(2-) y el NAD⁺(1-) a través de la membrana externa, demuestran que, según el modelo propuesto, la magnitud de dicho potencial, (Figura 1A) puede alcanzar niveles suficientes para el cierre eléctrico del VDAC (Lemeshko, 2017b).

Para mostrar el principio de generación del potencial de la membrana externa mediante la oxidación directa del NADH externo en las mitocondrias, se describió el proceso estacionario (Figura 1A) con un modelo computacional. La actividad de la DH_e, que cataliza la reacción irreversible de la oxidación del NADH, se expresó con la ecuación:

$$v = \frac{v_m \cdot [NADH]_s}{K_{m,NADH} + [NADH]_s} \quad (1)$$

donde v_m es la actividad máxima de la DH_e de la membrana interna; $[NADH]_s$ es la concentración del NADH en el espacio entre las membranas mitocondriales; $K_{m,NADH}$ es la constante de Michaelis-Menten, correspondiente a 50 μ M NADH (Rigoulet, *et al.*, 2004). Las velocidades v_m y v , como también los flujos metabólicos de NADH y NAD⁺ a través de la membrana externa, se presentan en unidades arbitrarias relativas.

El flujo de NADH(2-) a través de la membrana externa (J_{NH}) se describió con la ecuación de Goldman:

$$J_{NH} = P_{NH} \cdot \frac{PME \cdot 2F}{RT} \cdot \frac{[NADH]_c - [NADH]_s \cdot \exp\left(\frac{-PME \cdot 2F}{RT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-PME \cdot 2F}{RT}\right)} \quad (2)$$

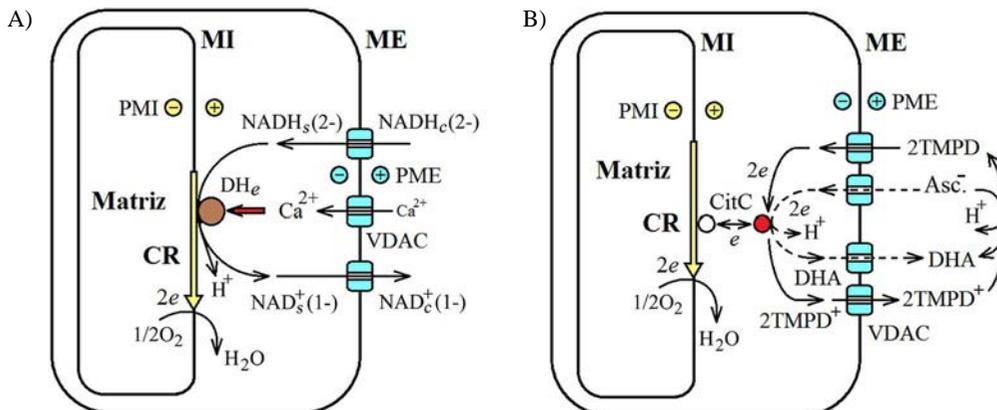


Figura 1. A. Oxidación del NADH en mitocondrias de levaduras y de plantas. **B.** Oxidación del ascorbato en mitocondrias intactas. MI: membrana interna; ME: membrana externa; CR: cadena respiratoria; DH_e: NADH deshidrogenasa externa de la membrana interna; CitC: citocromo C; Asc⁻: ascorbato; DHA: dehidroascorbato; TMPD: N,N,N',N'-tetrametil p-fenilendiamina

Aquí, P_{NH} es la permeabilidad de la membrana externa al NADH(2-) a través de los VDAC; F es la constante de Faraday; R es la constante universal de los gases; $T=298 K$ es la temperatura del medio, y $[NADH]_c$ y $[NADH]_s$ son las concentraciones de NADH en el citosol y en el espacio entre las membranas mitocondriales, respectivamente.

De la misma manera se puede expresar el flujo de $NAD^+(1-)$ a través de la membrana externa:

$$J_N = P_N \cdot \frac{PME \cdot F}{RT} \cdot \frac{[NAD^+]_c - [NAD^+]_s \cdot \exp\left(\frac{-PME \cdot F}{RT}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-PME \cdot F}{RT}\right)} \quad (3),$$

donde P_N es la permeabilidad de la membrana externa al $NAD^+(1-)$ a través de los VDAC, y $[NAD^+]_c$ y $[NAD^+]_s$ son las concentraciones de NAD^+ en el citosol y en el espacio entre las membranas mitocondriales, respectivamente.

La permeabilidad P_{NH} de la membrana externa al NADH(2-) a través de los VDAC (Figura 1A) en función de su potencial, se describió con la siguiente ecuación (Lemeshko, 2017b):

$$P_{NH} = 0.02 + 0.98 \cdot \exp\left(-S \cdot k_{NH} \cdot PME\right)^2 \quad (4),$$

donde S es un parámetro de la sensibilidad del VDAC al voltaje tomado a $S=40 V^{-1}$. El factor k_{NH} describe la modulación de la sensibilidad eléctrica del VDAC por su interacción directa con el NADH (Zizi, et al., 1994). Este factor se puede expresar con la ecuación:

$$k_{NH} = 1 + \frac{0.25 \cdot [NADH]_c}{K_d + [NADH]_c} \quad (5).$$

Aquí, $[NADH]_c$ es la concentración del NADH en el citosol, y K_d es igual a $16 \mu M$ NADH (Zizi, et al., 1994).

La permeabilidad P_N de la membrana externa al NAD^+ en función del potencial se presenta de la misma manera que la del NADH, para cuyo cálculo se tomó un valor absoluto de la permeabilidad de la membrana externa 6,5 veces menor que para el NADH (Lemeshko, 2017b):

$$P_N = 0.003 + 0.15 \cdot \exp\left(-S \cdot k_{NH} \cdot PME\right)^2 \quad (6).$$

En el estado estacionario, los flujos de NADH y NAD^+ deben ser iguales a la actividad de la DH_c de la membrana interna (Figura 1A), es decir:

$$v = J_{NH} \quad (7)$$

y

$$v = -J_N \quad (8).$$

Se debe cumplir también la ecuación de balance de masas:

$$[NADH]_s + [NAD^+]_s = [NADH]_c + [NAD^+]_c \quad (9),$$

donde $[NADH]_s$ y $[NAD^+]_s$ corresponden a las concentraciones en el espacio entre las membranas mitocondriales, y $[NADH]_c$ y $[NAD^+]_c$ a las concentraciones en el citosol. La ecuación (9) del sistema de ecuaciones (1) a (9) permite definir la concentración del NADH adicionado en ausencia del NAD^+ adicionado o, también, presentar el $[NADH]_c$ como si fuera NADH producido por alguna deshidrogenasa extramitocondrial a partir de cierta cantidad del NAD^+ adicionado a la concentración inicial de $[NAD^+]_c=1,5 mM$.

Se supone que el estado estacionario se establece iniciando la actividad de la DH_c de la membrana interna desde el estado de equilibrio del sistema con las concentraciones de $[NADH]_c$ y $[NAD^+]_c$ definidas según la ecuación (9). El sistema de ecuaciones (1) a (9) se resolvió usando el programa Mathcad Professional.

En la Figura 2A se muestran los resultados de las evaluaciones del potencial de la membrana externa generado por la circulación de NADH(2-)/ $NAD^+(1-)$ a través de esta (Figura 1A) para el caso del NADH adicionado a la suspensión de mitocondrias de levadura *S. cerevisiae* sin adición de NAD^+ . Dicho potencial está expresado en función de la concentración de $[NADH]_c$ en el medio exterior y de la actividad máxima de la deshidrogenasa DH_c de la membrana interna. El potencial de la membrana externa calculado alcanza hasta $-30 mV$, y según las ecuaciones (4) y (6), su signo negativo se debe a una supuesta mayor permeabilidad del VDAC al NADH(2-) en comparación con el $NAD^+(1-)$ (Lemeshko, 2017b).

Los cálculos demuestran una restricción significativa del flujo metabólico (v) (Figura 2D) en el rango de valores relativamente altos de la velocidad máxima de la DH_c . Debe señalarse que el efecto de la restricción en estas condiciones se debe al cierre eléctrico de los VDAC de la membrana externa, porque no se observa restricción a la sensibilidad eléctrica nula del VDAC, $S=0 V^{-1}$ (Lemeshko, 2017b).

En experimentos con los esferoplastos permeabilizados de *S. cerevisiae*, se ha visto que la velocidad de oxidación del NADH producido por las deshidrogenasas citosólicas, o por la externa, es mucho más alta que la del NADH adicionado (Avéret, et al., 2002). Es muy importante resaltar que para la producción del NADH por las deshidrogenasas en estos experimentos el medio de incubación contenía 1-2 mM de NAD^+ , lo que según las ecuaciones (3), (6) y (9), debería afectar la generación del potencial de la membrana externa y el flujo metabólico a través de esta.

Los cálculos realizados con distintas concentraciones $[NADH]_c$ del NADH producido en el medio extramitocondrial a partir de 1,5 mM de NAD^+ en reemplazo de parte del NAD^+ adicionado, también evidenciaron un mayor flujo metabólico (Figura 2E,a), aunque todavía restringido para el rango de valores relativamente altos de ambos, así como de la actividad máxima de la DH_c y de la relación $[NADH]_c/[NAD^+]_c$ (Figura 2E,a). Para este rango, el potencial de la membrana externa generado es de mayor magnitud (Figura 2B, a).

La restricción metabólica mencionada se debe al cierre eléctrico del VDAC, ya que ésta no se observó esencialmente en el caso de la sensibilidad nula del VDAC al voltaje cuando $S=0 V^{-1}$ (Figura 2E, b), y los valores calculados del potencial de la membrana externa fueron relativamente bajos (Figura 2B, b).

Se sabe, asimismo, que la permeabilidad de la membrana externa de las mitocondrias de levaduras puede verse restringida por las interacciones de los VDAC de la

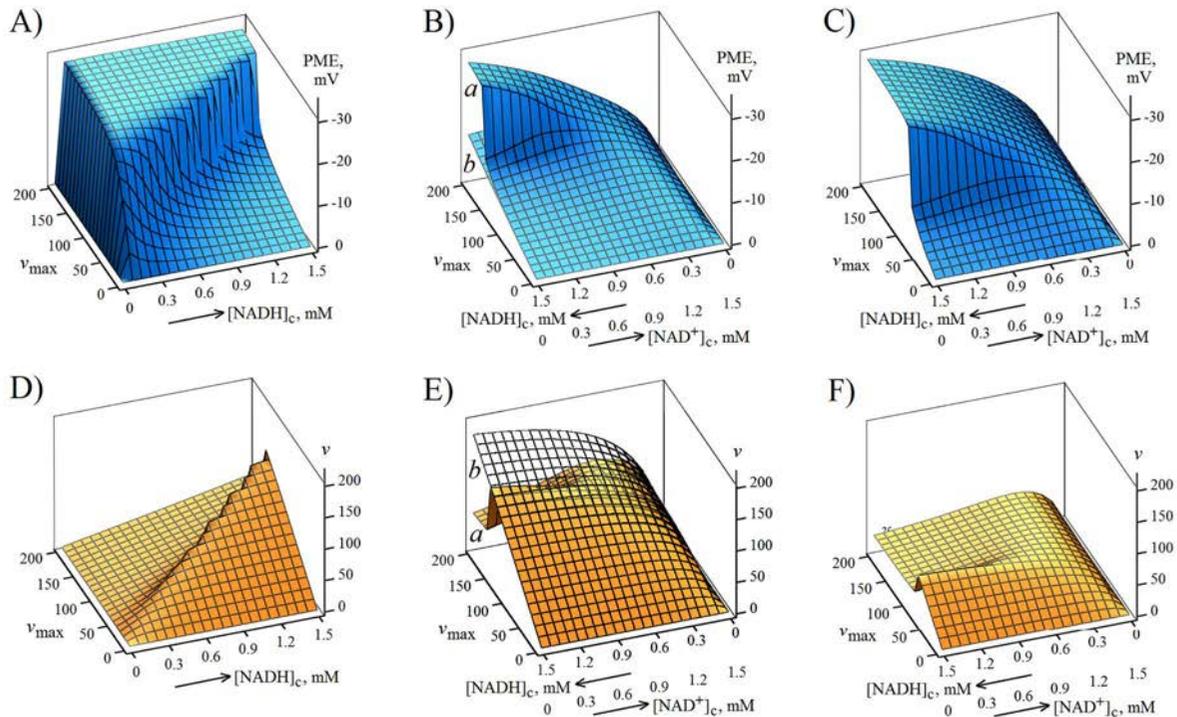


Figura 2. Evaluación del potencial de la membrana externa (A-C) y del flujo metabólico de NADH(2-)/NAD⁺(1-) a través de la membrana externa (D-F) para varias condiciones del modelo (Figura 1A). A,D: en función de la concentración del NADH adicionado, y en ausencia de NAD⁺; B,C,E,F: en función del NADH producido en la concentración [NADH]_c a partir de una fracción de 1,5 mM de NAD⁺ adicionado; A,B(a),C,D,E(a),F: $S=40 \text{ V}^{-1}$; B(b),E(b) - $S=0 \text{ V}^{-1}$; C,F: *knockdown* o inhibición de 50 % de los VDAC de la membrana externa, en comparación con B(a),E(a).

membrana con las proteínas citosólicas (Kmita, *et al.*, 2003), o por la deficiencia de los VDAC en esta (Avéret, *et al.*, 2002; Kmita, *et al.*, 2003). Para evaluar la influencia del *knockdown* o de la inhibición en 50 % de los VDAC de la membrana externa, el modelo se analizó con el sistema de ecuaciones (1) a (9), multiplicando la parte derecha de las ecuaciones (4) y (6) por el factor 0,5 (50 % de *knockdown*). El análisis del modelo con dicho factor evidenció una restricción del flujo metabólico (v) aún mayor (Figura 2, F en comparación con E, *a*) debido a la generación del potencial de la membrana externa en magnitudes altas (Figura 2, C en comparación con B, *a*).

La deshidrogenasa DH_c de la membrana interna de las mitocondrias de plantas y levaduras se activa significativamente con el Ca^{2+} (Earnshaw, 1975). Se ha demostrado que la adición de 3 mM de EGTA dos a tres minutos después de la adición de 1 mM de NADH a la suspensión de mitocondrias de maíz causa una leve inhibición de la respiración, mientras que la adición de 3 mM de EGTA antes del NADH la inhibe por lo menos en 60-70 %.

Estos datos experimentales (Earnshaw, 1975) se pueden explicar con base en el modelo de generación del potencial de la membrana externa por la circulación de NADH(2-)/NAD⁺(1-) a través de la membrana. Con el potencial negativo que se genera durante la oxidación del NADH (Figura 1A), el calcio del medio de incubación es capturado hacia el

espacio entre las membranas mitocondriales y se mantiene allí en una concentración elevada, suficiente para mantener una gran actividad de la deshidrogenasa DH_c de la membrana interna. Pero si el EGTA se agrega primero, la oxidación lenta del NADH generaría un potencial de la membrana externa de poco valor, el cual no es suficiente para mantener el Ca^{2+} cerca de la DH_c en la concentración necesaria para la activación de esta enzima.

Lo más importante es que el modelo (Figura 1A) permite explicar también la inhibición de la respiración de la levadura *S. cerevisiae* con concentraciones altas de glucosa como un efecto de la supresión eléctrica del metabolismo mitocondrial en estas células (Lemeshko, 2017b).

Otro fenómeno bien conocido es que el ascorbato no se oxida en mitocondrias intactas, aunque el VDAC en su estado abierto debería ser permeable a este anión orgánico natural dependiendo de su tamaño y carga negativa. La oxidación del ascorbato se activa muy significativamente con el $TMPD^+$ (Figura 1B). Como hipótesis, se puede suponer que el ascorbato, al oxidarse por acción del citocromo C en el espacio entre las membranas mitocondriales y producir dehidroascorbato (DHA) neutro, lleva a la generación del potencial negativo de la membrana externa de un modo similar a la oxidación del NADH externo (Figura 1A). Así, la inhibición de la oxidación del ascorbato podría explicarse por el mecanismo de retroalimentación negativa, o sea, por

la generación de potencial negativo de la membrana externa y el cierre eléctrico del VDAC. En el caso de la presencia adicional de TMPD^+ , éste es reducido por el ascorbato en el medio exterior y luego circula a través de la membrana externa en sus formas neutra y positiva (Figura 1B), ya que el VDAC eléctricamente cerrado no restringe el paso de los cationes de este tamaño.

Generación del potencial de la membrana mitocondrial externa mediante la transferencia activa del grupo fosforilo a través de las membranas

Se conocen distintos mecanismos de transferencia del grupo fosforilo a través de la membrana externa mitocondrial (Brdiczka, *et al.*, 2006). Uno de estos es el intercambio de ATP y ADP a través de los sitios de contacto entre las dos

membranas mitocondriales formados por el antiportador ATP/ADP (ANT) de la membrana interna y el VDAC de la membrana externa (Figura 3A). Un segundo mecanismo se da por la acción de la enzima hexocinasa (HK), la cual forma un complejo con el VDAC (Figura 3B), o con el dúo ANT-VDAC (Figura 3C), y hace la transferencia del grupo fosforilo del ATP mitocondrial a la glucosa del citosol formando la glucosa-6-fosfato (G6P^{1-}) externa (Lemeshko, 2002, 2014, 2017a). El tercer mecanismo se basa en la participación de la creatina cinasa, la cual forma un complejo con el VDAC sin el ANT (Figura 3D) o con el ANT de la membrana interna (Figura 3E), transfiriendo el grupo fosforilo del ATP mitocondrial a la creatina citosólica, Cr, y produciendo el fosfato de creatina (CrP^{1-}), o viceversa (Lemeshko, 2016, 2017a). Las mismas posibilidades existen para otras cinasas.

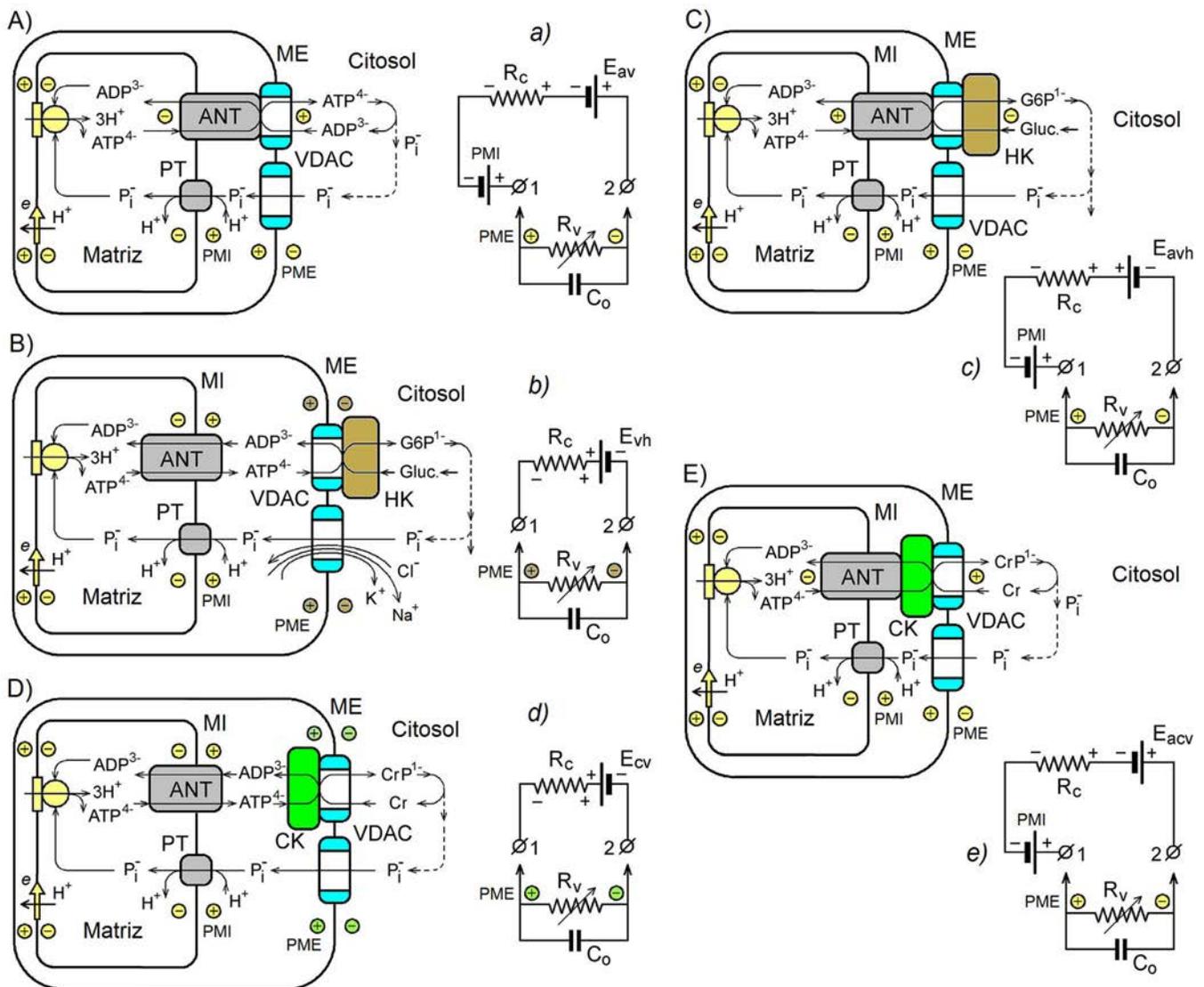


Figura 3. Posibles mecanismos de generación del potencial de la membrana externa mediante la transferencia activa del grupo fosforilo a través de las membranas mitocondriales (A-E), y los respectivos circuitos eléctricos equivalentes (a-e). A,a: mediante los sitios de contacto entre las membranas mitocondriales de tipo ANT-VDAC; B,b: mediante el complejo VDAC-HK; C,c: mediante los complejos ANT-VDAC-HK; D,d: mediante el complejo CK-VDAC; E,e: mediante los complejos ANT-CK-VDAC; MI: membrana interna; ME: membrana externa

La transferencia del grupo fosforilo al citosol en el estado estacionario del sistema, se acompaña con el regreso del fosfato inorgánico (P_i^{-1}) desde el citosol a través de los VDAC libres de la membrana externa para recuperar el ATP en la matriz mitocondrial. Los modelos mencionados se pueden presentar con circuitos eléctricos equivalentes (Lemeshko, 2002, 2014, 2016, 2017a, 2017b), como se muestra en la Figura 3, *a-e*.

Generación del potencial de la membrana externa mediante los complejos VDAC-HK. En las células cancerígenas, una gran cantidad de la hexocinasa (HK) está unida a la membrana externa mitocondrial y forma hasta 300 veces más complejos VDAC-HK que en las mitocondrias de las células normales (Marín-Hernández, *et al.*, 2006; John, *et al.*, 2011), con lo cual se lograría tener acceso preferente al ATP producido por las mitocondrias y facilitar el inicio de la glucólisis. Por otro lado, los complejos VDAC-HK, al transferir grupos fosforilo a través de la membrana externa, deben generar directamente su potencial (Lemeshko, 2002, 2014), el cual, a su vez, podría controlar eléctricamente la permeabilidad de la membrana externa a varios metabolitos cargados.

Se consideró un modelo computacional simplificado para el análisis termodinámico de este mecanismo de generación del potencial de la membrana externa (Figura 3B, *b*) en cuyo marco la totalidad de los VDAC en dicha membrana se presenta como la suma de varias fracciones: la fracción N_{vh} de los VDAC que forman complejos con la hexocinasa (VDAC-HK), la fracción N_{vs} de los VDAC libres sensibles al voltaje, y la fracción N_{ns} de los VDAC libres que no son sensibles al voltaje.

La fracción N_{ns} actúa como la fracción de la isoforma VDAC3, poco sensible al voltaje, y puede representar hasta el 10 % de todos los VDAC (Maldonado, *et al.*, 2013). La cantidad total de los VDAC se normaliza a 1:

$$N_{vh} + N_{vs} + N_{ns} = 1 \quad (10).$$

La permeabilidad P_{vs} de la membrana externa al fosfato inorgánico P_i a través de la fracción N_{vs} de los VDAC sensibles al voltaje, se presenta en función del potencial de la membrana externa (Lemeshko, 2014):

$$P_{vs} = N_{vs} \cdot \left[P_c + (1 - P_c) \cdot \exp - (S \cdot |PME|)^2 \right] \quad (11).$$

En esta ecuación S es el parámetro de la sensibilidad del VDAC al voltaje, tomado a $S=40 \text{ V}^{-1}$. El parámetro P_c es la permeabilidad de los VDAC eléctricamente cerrados. Para los cálculos en este modelo se tomó un valor de $P_c=0,25$.

La permeabilidad P_{vh} de la fracción N_{vh} de los VDAC que forman los complejos VDAC-HK, y la permeabilidad P_{ns} de la fracción N_{ns} de los VDAC no sensibles al voltaje se presentan con las ecuaciones (12) y (13), respectivamente:

$$P_{vh} = N_{vh} \quad (12)$$

$$P_{ns} = N_{ns} \quad (13)$$

Así, las resistencias R_c y R_v en la figura 3, *b* están dadas por $R_c=1/P_{vh}$ y $R_v=1/(P_{vs}+P_{ns})$.

El complejo electrogénico VDAC-HK, que transfiere activamente el grupo fosforilo a través de la membrana externa, se puede considerar como una batería biológica, alimentada por la energía libre de Gibbs de la reacción de la hexocinasa (Lemeshko, 2014). El voltaje E_{vh} generado por esta batería se presenta como:

$$E_{vh} = - \left(\frac{\Delta G_h^{o'}}{F} + \frac{RT}{F} \ln \frac{[G6P]_c \cdot [ADP]_s}{[G]_c \cdot [ATP]_s} \right) \quad (14),$$

donde $\Delta G_h^{o'}=-16,7 \text{ kJ/mol}$ es la energía libre de Gibbs estándar de la reacción de la hexocinasa; $[ATP]_s$ y $[ADP]_s$ son las concentraciones del ATP y el ADP en el espacio entre las membranas mitocondriales, respectivamente; $[G]_c$ y $[G6P]_c$ son las concentraciones de glucosa y glucosa-6-fosfato en el citosol; F es la constante de Faraday; R es la constante universal de los gases, y $T=298 \text{ K}$ es la temperatura del medio. Para los cálculos, la relación $[G]_c/[G6P]_c$ se cambia en un rango amplio, de 1 a 100. Teniendo en cuenta que en condiciones fisiológicas $[G6P]_c=0,1 \text{ mM}$, aproximadamente, este rango corresponde a cambios de concentración de la glucosa de hasta 10 mM.

La relación $[ATP]_s/[ADP]_s$ se define por la energía libre de Gibbs de la hidrólisis del ATP, ΔG_a , la cual se mantiene por el proceso de la fosforilación oxidativa en las mitocondrias:

$$\Delta G_a = \Delta G_a^{o'} + RT \ln \frac{[P_i^{-1}]_s \cdot [ADP]_s}{[ATP]_s} \quad (15),$$

donde $\Delta G_a^{o'}=-31 \text{ kJ/mol}$ es la energía libre de Gibbs estándar para la reacción de la hidrólisis del ATP. Se sabe que para las células vivas en estado de reposo, ΔG_a es igual a -61 kJ/mol , aproximadamente (Pinz, *et al.*, 2008). Se consideró que la concentración del fosfato inorgánico para los cálculos era fija: $[P_i^{-1}]_s=5 \text{ mM}$.

La circulación del grupo fosforilo, promovido por la energía libre de Gibbs de la reacción de la hexocinasa del complejo VDAC-HK, con el regreso del fosfato inorgánico al espacio entre las membranas mitocondriales, se puede presentar como la corriente eléctrica causada por el voltaje E_{vh} . El valor de E_{vh} depende del estado energético definido por las ecuaciones (14) y (15). Según la ley de Ohm, el potencial de la membrana externa generado se puede presentar como la caída de voltaje sobre la resistencia R_v (Figura 3, *b*):

$$PME = E_{vh} \cdot \frac{P_{vc}}{P_{vc} + (P_{vs} + P_{ns})} \quad (16).$$

El sistema de ecuaciones (10) a (16) se resolvió para distintas fracciones N_{vh} de los VDAC que forman complejos VDAC-HK y para distintas concentraciones de la glucosa (de la relación $[G]_c/[G6P]_c$), suponiendo que el potencial de fosforilación de las mitocondrias era fijo, $\Delta G_a=-61 \text{ kJ/mol}$ (ecuación 15).

En este caso simplificado, se considera que en todo el rango de las concentraciones de glucosa (relaciones $[G]_c/[G6P]_c$ usadas para los cálculos), la actividad de la hexocinasa

del complejo VDAC-HK no es un factor limitante para la transferencia del grupo fosforilo a través del complejo. Los cálculos demuestran (Figura 4) un comportamiento del modelo similar al caso en el que se consideraban también las características cinéticas de la HK (Lemeshko, 2014).

En ausencia de los VDAC no sensibles al voltaje, $N_{ns}=0$, el valor del potencial de la membrana externa calculado según las ecuaciones (10) a (16) depende del porcentaje de los complejos VDAC-HK (del $VDAC_{HK}, \% = N_{vh} \cdot 100 \%$), y alcanza valores de más de 60 mV (Figura 4A). Según el modelo, la generación del potencial debe causar una profunda restricción de la permeabilidad de la membrana externa al fosfato inorgánico (Figura 4C), restringiendo de esta manera todo el flujo metabólico.

En el modelo se evidencia otro fenómeno interesante, un cambio brusco del potencial de la membrana externa y de su permeabilidad en función de la concentración de glucosa (de la relación $[G]_c/[G6P]_c$) si el porcentaje de los VDAC que forman los complejos VDAC-HK es superior a 3 % ($VDAC_{HK} > 3 \%$) (Figura 4A, C).

Estos cambios del potencial y del flujo metabólico no fueron tan bruscos en presencia de los VDAC no sensibles al voltaje, a $N_{ns}=0,1$ (10 %) (Figura 4B, D). Aunque los

valores del potencial calculado para este caso son relativamente bajos (Figura 4B), la modulación eléctrica del flujo metabólico a través de la membrana externa puede ser todavía significativa (Figura 4D).

La generación del potencial de la membrana externa también sería posible con la contribución adicional del potencial de la membrana mitocondrial interna, cuando este se aplica a la membrana externa a través del complejo triple ANT-VDAC-HK (Figura 3C) o, incluso, solamente a través del complejo ANT-VDAC (Figura 3A) (Lemeshko, 2002, 2017a).

En la Figura 5 se comparan los mecanismos más simples de generación del potencial negativo de la membrana externa y del positivo. Según el análisis termodinámico (Figura 2, A-C), es de esperarse la generación del potencial negativo mediante la circulación de los nucleótidos de piridina, $NADH(2-)/NAD^+(1-)$, a través de la membrana externa (mecanismo del tipo de las levaduras) (Lemeshko, 2017b). El potencial positivo (Figura 4, A,B) debe ser generado directamente por los complejos VDAC-HK (mecanismo del tipo del cáncer) (Lemeshko, 2002, 2014). Con los dos mecanismos cabe esperar un incremento significativo de los valores del potencial de la membrana externa en concentraciones altas de glucosa en el citosol, con la

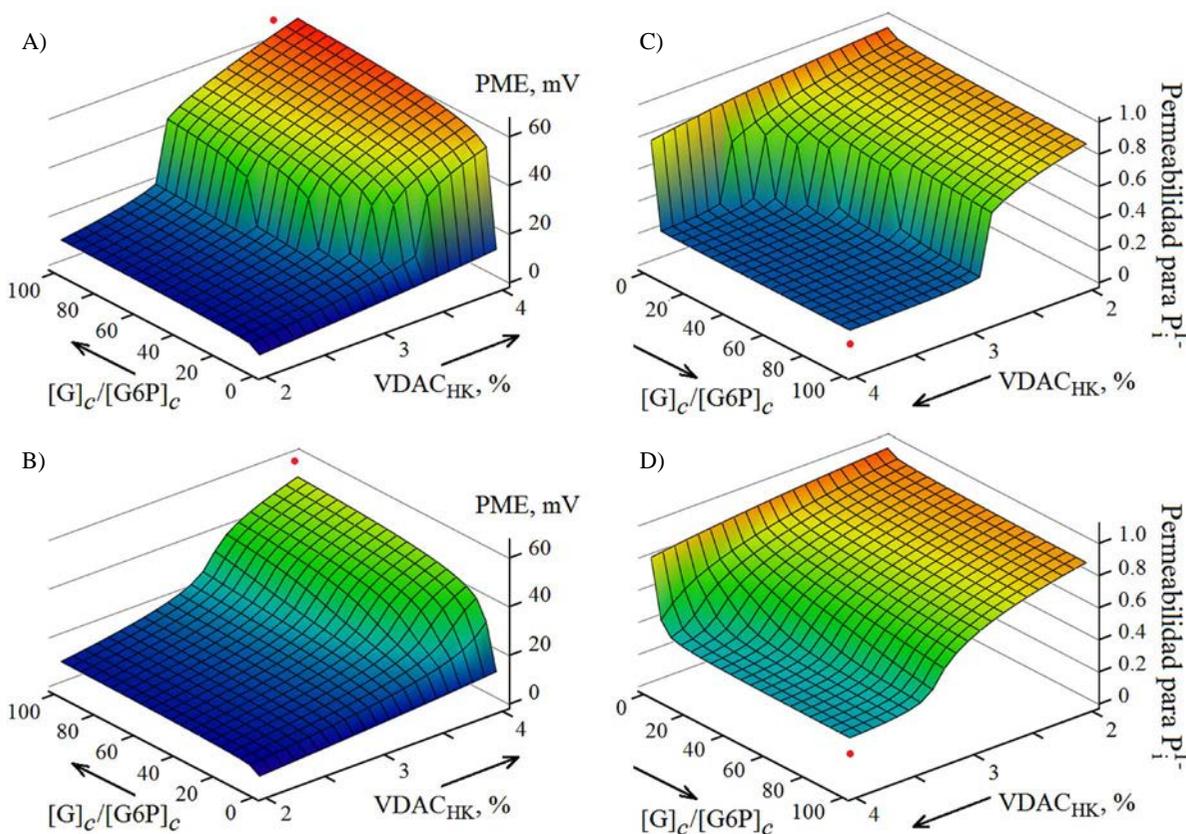


Figura 4. Evaluación computacional de los cambios del potencial de la membrana externa (A,B) y de la permeabilidad de la membrana externa al fosfato inorgánico (C,D) en función de la concentración de glucosa (de la relación $[G]_c/[G6P]_c$) y del porcentaje de los VDAC que forman los complejos VDAC-HK en ausencia (A,C) y presencia de 10 % de los VDAC no sensibles al voltaje (B,D) en la membrana externa. $S=40 V^{-1}$. Los puntos rojos indican que el potencial de mayor magnitud provoca un cambio más significativo de la permeabilidad de la membrana externa al fosfato inorgánico.

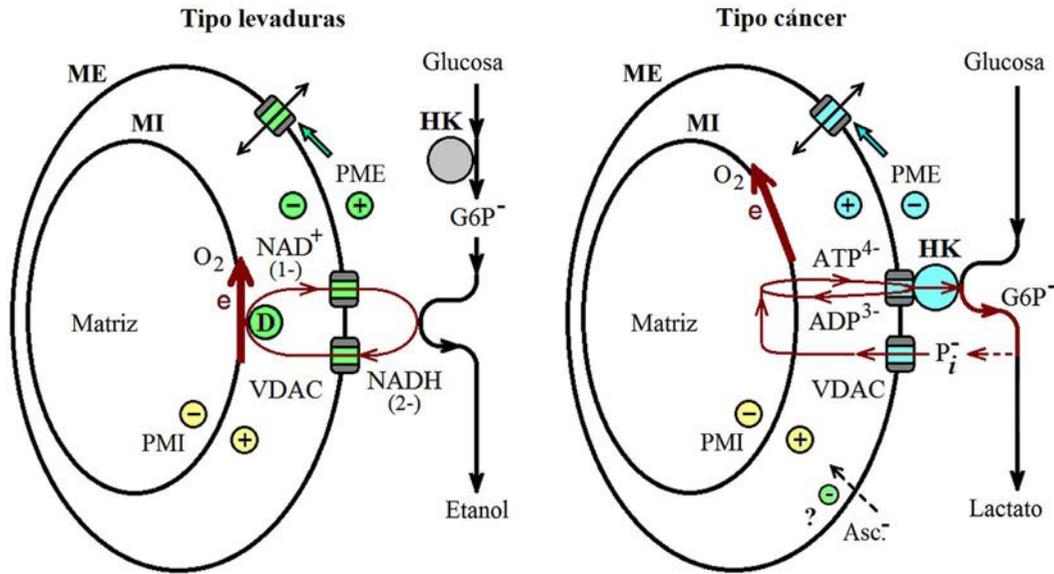


Figura 5. Posibles mecanismos de la supresión eléctrica de la respiración de las células mediante la generación del potencial negativo de la membrana externa acoplada a la circulación de $\text{NADH}(2-)/\text{NAD}^+(1-)$ a través de esta en la levadura *S. cerevisiae*, o mediante la generación del potencial positivo acoplada a la transferencia del grupo fosforilo a través de los complejos VDAC-HK de la membrana externa en células cancerígenas. Asc⁻: se muestra que la oxidación del ascorbato en las mitocondrias de células cancerígenas podría causar una disminución del potencial positivo de la membrana externa generado por los complejos VDAC-HK.

posibilidad de la supresión eléctrica de la respiración de las mitocondrias debido al potencial generado (Lemeshko, 2002, 2014, 2015, 2017a, 2017b). La supresión de la respiración debida a los altos niveles de glucosa se conoce como efecto de Crabtree, pero no se sabe todavía si los procesos celulares responsables de esta inhibición (que es muy rápida, ocurre en segundos), son los mismos, o similares, para levaduras y las células cancerígenas (Hagman, et al., 2014; Pfeiffer & Morley, 2014; Hammad, et al., 2016).

En estudios recientes se ha confirmado el efecto anticancerígeno del ácido ascórbico en concentraciones altas (Sen, et al., 2017; Xia, et al., 2017; Mastrangelo, et al., 2017), aunque el mecanismo no es todavía claro. No se descarta que ello se deba a la tendencia a generar potencial negativo de la membrana externa por la oxidación de ascorbato, como se muestra en la Figura 1B. De esta manera, la superposición de dos potenciales, el negativo, generado por la oxidación de ascorbato, y el positivo, generado por los complejos VDAC-HK (Figura 5), podría resultar en una disminución o incluso la cancelación de la supresión eléctrica de la respiración de las células cancerígenas con los consecuentes efectos anti-Crabtree, anti-Warburg y, en general, anticancerígenos.

Generación del potencial de la membrana externa mediante los complejos CK-VDAC. En los cardiomiocitos, el ATP mitocondrial se usa para la producción del CrP a partir de la creatina. En el espacio entre las membranas mitocondriales la enzima creatina cinasa (CK) se encuentra unida a los VDAC, formando los complejos CK-VDAC (Figura 3D) y los ANT-CK-VDAC (Figura 3E).

En los cardiomiocitos y otras células, el intercambio

rápido de fosfato de creatina con carga negativa y de creatina neutra entre las mitocondrias y los sarcómeros es primordial para la disminución de la resistencia de la ruta de suministro de energía durante la fase sistólica (Wallimann, et al., 2011; Simson, et al., 2016). La resistencia metabólica de esta ruta citosólica del intercambio CrP^1/Cr es mucho menor que la del intercambio por la electro-difusión del ATP^{4-} y ADP^{3-} , sobre todo en concentraciones bajas de ADP^{3-} en el citosol (Wallimann, et al., 2011). Por otro lado, el flujo de los grupos fosforilo a través de los complejos CK-VDAC (Figura 3D, d) puede causar la generación directa del potencial de la membrana externa, con el cierre de los VDAC libres sensibles al voltaje, y, finalmente, llevar a una restricción de la permeabilidad de la membrana externa a los metabolitos cargados (Lemeshko, 2016) mediante el mecanismo de control de realimentación negativa (Lemeshko, 2017a).

En el modelo CK-VDAC, la fuente para la generación del potencial de la membrana externa es la batería E_{cv} (Figura 3D, d), alimentada por la energía libre de Gibbs de la reacción de la creatina cinasa del mismo complejo:

$$E_{cv} = \frac{\Delta G_{CK}^{\circ'}}{F} + \frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{Cr}]_c \cdot [\text{ATP}]_s}{[\text{CrP}]_c \cdot [\text{ADP}]_s} \quad (17),$$

donde $\Delta G_{CK}^{\circ'} = -12,7$ kJ/mol es la energía libre de Gibbs estándar de la reacción de la creatina cinasa; $[\text{Cr}]_c/[\text{CrP}]_c$ es la relación de las concentraciones de creatina y fosfato de creatina en el citosol; $[\text{ATP}]_s/[\text{ADP}]_s$ es la relación de las concentraciones de ATP y ADP en el espacio entre las membranas mitocondriales; F es la constante de Faraday;

R es la constante universal de los gases, y $T = 298 K$ es la temperatura del medio.

En este caso, el análisis termodinámico del modelo CK-VDAC (Figura 3C) se hizo usando el sistema de ecuaciones, incluida la ecuación (17) (Lemeshko, 2016), y teniendo en cuenta las características cinéticas de la enzima CK, con $K_{m,Cr}=10$ mM. Para las evaluaciones se tomó la concentración total $[Cr]+[CrP]=25$ mM, y la relación $[ATP]_s/[ADP]_s=500$ o $[ATP]_s/[ADP]_s=50$.

Los cálculos del modelo CK-VDAC en función de la concentración de creatina en el citosol, inmediatamente cercana de la membrana externa, demuestran la posibilidad de generar un potencial de la membrana externa relativamente alto (Figura 6A,B), para controlar la permeabilidad de los VDAC de dicha membrana. El nivel de la creatina, en el rango conocido de los cambios de la relación $[Cr]/([Cr]+[CrP])$ durante las fases de sístole y diástole del corazón (Lemeshko, 2016), se incrementa significativamente durante

la fase sistólica debido al uso intensivo del CrP para recuperar localmente el ATP hidrolizado en los sarcómeros.

En el caso de ausencia de los VDAC libres no sensibles al voltaje en la membrana externa, el modelo demuestra una generación del potencial de hasta más de 50 mV (Figura 6A), tomando una permeabilidad de $P_c=0,1$ a P_i^{-1} a través de los VDAC eléctricamente cerrados (Hodge & Colombini, 1997). El potencial de la membrana externa disminuye a valores de hasta 40 mV al considerar que 10 % de los VDAC en la membrana externa no son sensibles al voltaje (Figura 6B). Cabe resaltar que estos valores del potencial positivo se calcularon para el caso del potencial de fosforilación del ATP mitocondrial tomado a $\Delta G_a=-61$ kJ/mol (Pinz, et al., 2008).

Según las evaluaciones termodinámicas del modelo, el cambio del potencial de la membrana externa desde un valor de casi cero durante la diástole hasta más de 30 mV durante la sístole (Figura 6A, B), permite mantener la concentración de Ca^{2+} en el espacio entre las membranas

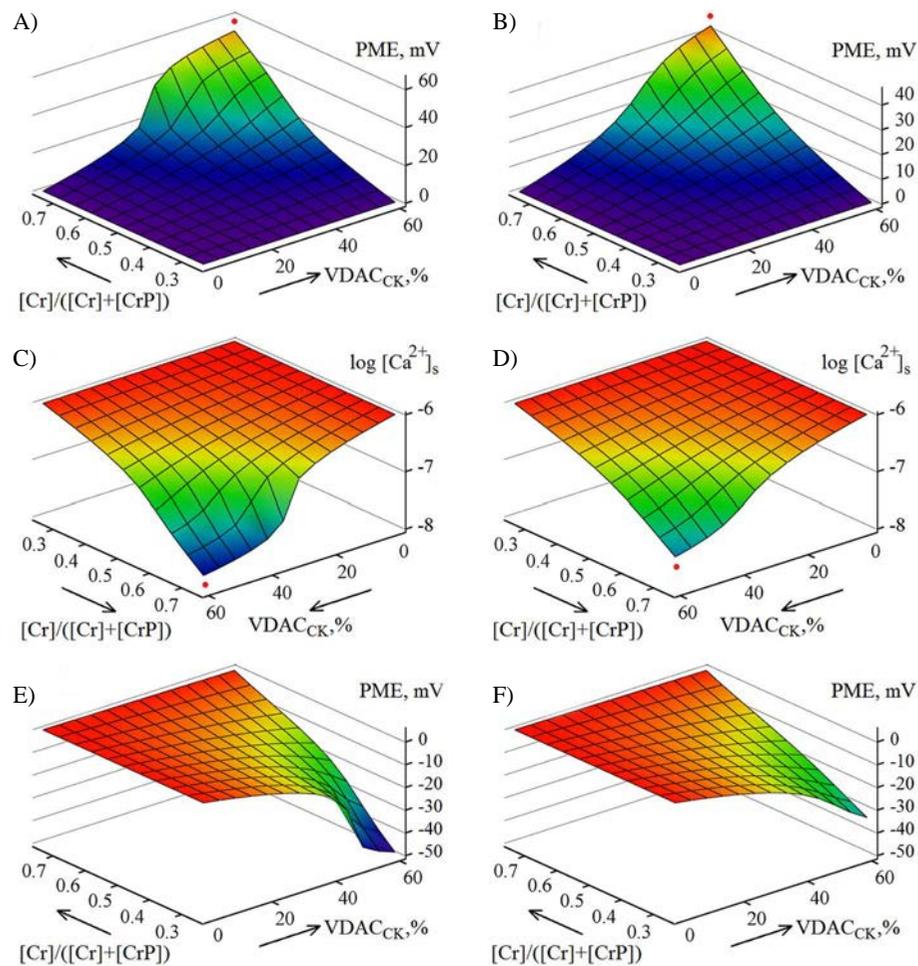


Figura 6. Evaluación computacional del potencial de la membrana externa (A,B,E,F) y del nivel relativo de Ca^{2+} en el espacio entre las membranas mitocondriales (C,D) en función de la concentración de la creatina (de la relación $[Cr]/([Cr]+[CrP])$) y del porcentaje de los VDAC que forman los complejos CK-VDAC. Se supone que en el medio exterior se tiene $1 \mu M$ de Ca^{2+} ; B,D,F: con 10 % de los VDAC no sensibles al voltaje; $S=40 V^{-1}$; $[Cr]+[CrP]=25$ mM; A-D: $[ATP]_s/[ADP]_s=500$ ($\Delta G_a=-61$ kJ/mol); E,F: $[ATP]_s/[ADP]_s=50$ ($\Delta G_a=-54$ kJ/mol). Los puntos rojos indican que el potencial de la membrana externa de mayor magnitud lleva a un cambio más significativo del nivel de Ca^{2+} en el espacio entre las membranas mitocondriales.

mitocondriales a más de un orden de magnitud por debajo de su concentración en el sarcoplasma (Figura 6C, D). Esta función del potencial de mantener la concentración relativamente baja de Ca^{2+} en el espacio entre las membranas mitocondriales con respecto al citosol durante la sístole, parece ser importante para disminuir significativamente la velocidad de transporte de Ca^{2+} a la matriz mitocondrial y proteger de esta manera a las mitocondrias contra la apertura del poro de transición de permeabilidad mitocondrial (PTP).

Se sabe que la concentración de Ca^{2+} durante la sístole puede alcanzar hasta $1 \mu\text{M}$ en el sarcoplasma (Eisner, *et al.*, 2017), y hasta más de $10 \mu\text{M}$ en los microdominios entre las mitocondrias y el retículo sarcoplásmico adyacente (Rizzuto, *et al.*, 2012). En caso de que el potencial positivo de la membrana externa no se genere durante la sístole, la concentración de Ca^{2+} en el espacio entre las membranas mitocondriales debe alcanzar niveles de 1 a $10 \mu\text{M}$. Con esto, el flujo de calcio a la matriz mitocondrial incrementaría por lo menos en un orden de magnitud, en comparación con el transporte durante la diástole, ya que la constante $K_{m,\text{Ca}^{2+}}$ del transportador de Ca^{2+} en la membrana interna es de 5 a $10 \mu\text{M}$ (Carafolli, 2012). Aunque en la fase inicial de la sístole, cuando la relación $[\text{Cr}]/([\text{Cr}]+[\text{CrP}])$ y el potencial generado no alcanzan sus magnitudes máximas todavía (Figura 6A, B), la velocidad de acumulación de Ca^{2+} en las mitocondrias puede ser elevada. Por otro lado, la concentración estacionaria de Ca^{2+} en la matriz mitocondrial depende también de la capacidad del sistema de extrusión de Ca^{2+} desde la matriz mitocondrial, parte del cual es el antiportador $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ de la membrana interna (Eisner, *et al.*, 2017).

El modelo también evidencia que en el caso de un potencial de fosforilación del ATP mitocondrial relativamente bajo (ecuación 15), del orden de $\Delta G_a = -54 \text{ kJ/mol}$, o sea cuando la relación $[\text{ATP}]_s/[\text{ADP}]_s$ equivale a 50 en vez de 500 en la ecuación (17), el potencial de la membrana externa calculado es negativo para la diástole, de (-30) - $(-50) \text{ mV}$ (Figura 6E, F), y llega a ser cero durante la sístole, debido al incremento del nivel de la creatina. Esto es indicativo del riesgo de la apertura del PTP por acción del Ca^{2+} sistólico, lo cual conlleva daños mitocondriales, cuando el potencial energético mitocondrial es relativamente bajo, como, por ejemplo, durante la hipoxia.

Para las mitocondrias de corazón y cerebro también se ha reportado la presencia de los complejos triples ANT-CK-VDAC, los cuales permiten transferir el grupo fosforilo desde el ATP de la matriz mitocondrial directamente a la creatina del citosol (Brdiczka, *et al.*, 2006) a través de las dos membranas mitocondriales. El análisis termodinámico de este modelo (Figura 3E, e) ha mostrado que el potencial calculado, positivo o negativo, de la membrana externa depende del estado energético tanto del citosol como de las mitocondrias (Lemeshko, 2017a).

Observaciones experimentales a favor de la generación del potencial eléctrico de la membrana mitocondrial externa

Las restricciones significativas de los flujos de los metabolitos de carga negativa entre las mitocondrias y el citosol han sido reportadas por varios autores (Vander Heiden, *et al.*, 2000; Lemasters & Holmuhamedov, 2006; Rostovtseva & Bezrukov, 2012; Simson, *et al.*, 2016). Hasta el momento, la explicación más aceptada sobre el mecanismo de regulación de la permeabilidad de la membrana externa es el “taponamiento” molecular de los VDAC. Se supone que la generación del potencial de la membrana externa es imposible porque su permeabilidad es alta para iones pequeños, aunque se reconoce que la generación del potencial podría explicar varios casos de la supresión global de mitocondrias en células normales y cancerígenas (Lemasters & Holmuhamedov, 2006).

En este sentido, cabe resaltar que normalmente los iones de potasio, sodio y cloro no participan en procesos estacionarios en la membrana externa, y deben alcanzar su equilibrio electroquímico dependiendo del potencial de esta mantenido por un mecanismo estacionario (Figura 3) dependiente del metabolismo energético mitocondrial. Se puede considerar que el movimiento de los iones pequeños a través de la membrana externa (Figura 3B), o su escape, es el proceso de carga de un condensador electrolítico, C_o , de dicha membrana (Figura 3B, b), causando un retraso en la generación del potencial. Para profundizar estos aspectos dinámicos, sobre todo en el caso de los cambios de las fases de diástole y sístole del corazón, se debe desarrollar un modelo más complejo, de tipo cinético.

La generación del potencial de la membrana externa puede afectar la monitorización experimental del potencial de la membrana interna con sondas iónicas fluorescentes, permeables a través de biomembranas. Hasta el momento, la posibilidad de la interferencia del potencial de la membrana externa, tan evidente en términos de la termodinámica (Figura 7), no se tiene en cuenta en varias aplicaciones de este método (Zorova, *et al.*, 2017).

Sin embargo, se han reconocido ciertas dificultades para evaluar cuantitativamente el potencial de la membrana interna en células vivas (Lemasters & Ramshesh, 2007; Gerencser, *et al.*, 2012), especialmente por la interferencia del potencial de la membrana plasmática con la monitorización en células vivas mediante microscopía óptica usando sondas iónicas de fluorescencia (Gerencser, *et al.*, 2012).

Con el fin de evitar este problema, se ha propuesto medir la intensidad de la fluorescencia del catión permeable éster metílico de tetrametilrodamina (TMRM^+) dentro de mitocondrias (IF_i) y en el espacio exterior de estas (IF_o) (Lemasters & Ramshesh, 2007), cuantificando el potencial de la membrana interna según la ecuación de Nernst:

$$PMI = -\frac{RT}{F} \ln \frac{IF_i}{IF_o} \quad (18).$$

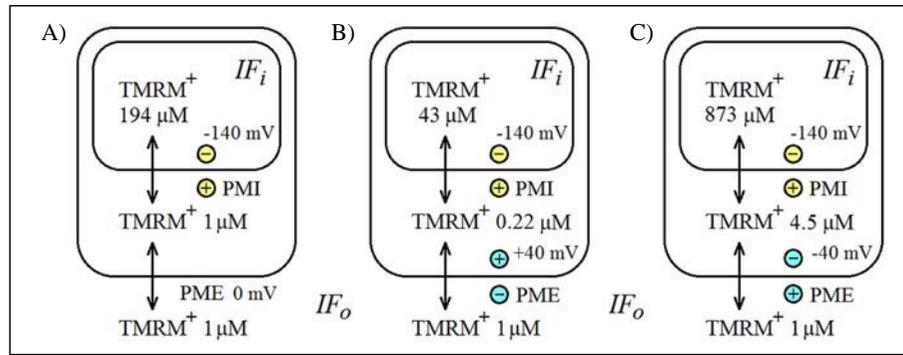


Figura 7. Posible influencia del potencial de la membrana externa (PME) sobre la acumulación de la sonda catiónica fluorescente TMRM⁺ en la matriz de las mitocondrias energizadas, con potencial fijo de la membrana interna (-140 mV). A: PME=0 mV; B: PME=+40 mV; C: PME=-40 mV

Es muy obvio que la ecuación (18) es aplicable solamente cuando el potencial de la membrana externa es igual a cero (Figura 7A), y no así cuando es positivo (Figura 7B) o negativo (Figura 7C), ya que la concentración del catión TMRM⁺ en el espacio entre las membranas mitocondriales, con respecto a la de su medio externo, depende del signo y el valor de dicho potencial (Figura 7).

En general, cuando el potencial de la membrana externa es ≠0, se debería usar la ecuación de Nernst teniendo en cuenta ambos potenciales, el de la membrana interna y el de la externa:

$$PMI + PME = -\frac{RT}{F} \ln \frac{IF_i}{IF_o} \quad (19).$$

Se ha demostrado que el *knockdown* de los VDAC1 y VDAC2 en células cancerígenas HepG2 lleva a una disminución de la intensidad de fluorescencia mitocondrial del TMRM⁺ de 42 y 58 %, respectivamente, sin cambio estadísticamente significativo de la intensidad de la fluorescencia de los nucleótidos de piridina NAD(P)H (Maldonado, *et al.*, 2013). Dado que el nivel de los NAD(P)H en la matriz mitocondrial depende del potencial de la membrana interna (Lemeshko, *et al.*, 2006a), se puede suponer que este no cambia en estos experimentos. Por otro lado, la disminución o la inhibición de los VDAC libres en la membrana externa debe influir significativamente en la probabilidad de generación de su potencial, incrementando la resistencia R_v (Figura 3b). Los posibles cambios de dicho potencial se pueden evaluar en los experimentos mencionados (Maldonado, *et al.*, 2013) aplicando la ecuación (19) antes y después del *knockdown* con el potencial de la membrana interna invariable. Por último, los cambios del potencial de la membrana externa se pueden estimar según la ecuación:

$$\Delta PME = -\frac{RT}{F} \ln \frac{IF_{i,kd}}{IF_i} \quad (20),$$

donde IF_i y IF_{i,kd} son las intensidades de la fluorescencia mitocondrial del TMRM⁺ antes y después del *knockdown*. Según la ecuación (20), con IF_i=100 %, los cálculos de

IF_{i,kd}=42 % e IF_{i,kd}=58 %, ya mencionados, evidencian un incremento del potencial de la membrana externa de 15 mV y 23 mV, respectivamente.

Algunos tratamientos de las células HepG2 llevan al aumento de la concentración de la tubulina libre en el citosol, causando una disminución de 60 a 70 % en la intensidad de la fluorescencia mitocondrial del TMRM⁺ (Maldonado, *et al.*, 2010), lo cual podría deberse a un incremento del potencial de la membrana externa de 24 a 32 mV, según la ecuación (20). El cambio de dicho potencial respondería (Figura 3, a-e) al incremento de la resistencia R_v de la membrana externa debido al conocido “taponamiento” molecular de los VDAC con tubulina (Rostovtseva & Bezrukov, 2012; Maldonado, *et al.*, 2013; Rostovtseva, *et al.*, 2015), la cual, además, incrementa su sensibilidad al potencial de la membrana externa. Por otro lado, un tratamiento de las células que conlleve la disminución de la concentración de la tubulina libre en el citosol causa un efecto contrario, un incremento de 65 % en la intensidad de la fluorescencia mitocondrial del TMRM⁺ (Maldonado, *et al.*, 2010). En este caso, según la ecuación (20), el aumento de los VDAC libres resultaría en una disminución de 13 mV del potencial de la membrana externa.

En general, y según el modelo VDAC-HK de generación del potencial de la membrana externa (Figura 3B), los factores que interactúan con los VDAC evitando la formación de los complejos VDAC-HK y disminuyendo de esta manera la probabilidad de generación de dicho potencial, deben causar el efecto anti-Warburg (Lemeshko, 2014, 2015, 2017a). Estas predicciones sustentarían la consideración del VDAC como un blanco importante para el desarrollo de nuevos medicamentos y tecnologías anticancerígenas (Camara, *et al.*, 2017; Shoshan-Barmatz, *et al.*, 2015, 2017).

Hemos desarrollado y patentado nuevos péptidos con actividad anticancerígena y antimicrobiana (Lemeshko, *et al.*, 2006b; Orduz & Lemeshko, 2016), en tanto que en los ensayos preliminares con nuevos péptidos diseñados para impedir la formación de los complejos VDAC-HK, se ha demostrado también una elevada actividad anticancerígena

en cultivos celulares. Los datos experimentales obtenidos concuerdan con los modelos propuestos de generación del potencial de la membrana externa (Lemeshko, 2002, 2014, 2015, 2017a) y con la actividad anticancerígena de esta clase de péptidos (Shoshan-Barmatz, *et al.*, 2015, 2017).

En colaboración con el MD Anderson Cancer Center (Texas), se ha demostrado que las avicinas, triterpenoides naturales, hacen permeable la membrana externa (Lemeshko, *et al.*, 2006a; Haridas, *et al.*, 2007), lo que debería disminuir el valor de su potencial generado en células tumorales. Además, en estos estudios se ha visto que el grado de permeabilidad de la membrana externa a las avicinas puede ser tan elevado como para producir la salida del citocromo C desde las mitocondrias.

La generación del potencial de la membrana externa puede ser crucial en el control del estado energético del corazón. Se sabe que el valor de la $K_{m,ADP}$ aparente para activar la respiración de los cardiomiocitos permeabilizados es mucho más grande en ausencia de la creatina que en su presencia (Appaix, *et al.*, 2003; Timohhina, *et al.*, 2009; Saks, *et al.*, 2010). Con la generación de un potencial positivo de la membrana externa en presencia de creatina (Figura 3D, E), la concentración de ADP en el espacio entre las membranas mitocondriales debe incrementarse significativamente con respecto al medio exterior (Figura 8), provocando la activación significativa de la respiración mitocondrial, a pesar de su concentración relativamente baja en el medio exterior. Por ejemplo, si la diferencia de las concentraciones de ADP en el espacio entre las membranas mitocondriales fuera de 10 veces en presencia de creatina, comparada con su ausencia, ello se debería a la generación de un potencial de la membrana externa de 20 mV (según la ecuación de Nernst) debida a la actividad de la creatina cinasa en presencia de creatina (Figura 8).

En mitocondrias aisladas de corazón incubadas con 1 μM de tubulina, se ha reportado que la $K_{m,ADP}$ aparente disminuye 14,3 veces en presencia de 20 μM de creatina (Timohhina, *et al.*, 2009). Se puede esperar que mediante la actividad de la creatina cinasa en presencia de la creatina se genere un potencial de la membrana externa de aproximadamente 24 mV, causando la acumulación del ADP^{3-} en el espacio entre las membranas mitocondriales y un incremento significativo de la respiración de las mitocondrias.

Como se ve en la Figura 8, la generación del potencial positivo de la membrana externa puede incrementar la resistencia de las mitocondrias frente a niveles altos de Ca^{2+} . Se ha demostrado, por ejemplo, que la adición de 30 μM de Ca^{2+} a la suspensión de mitocondrias de corazón lleva a la activación del poro de transición de permeabilidad mitocondrial (Dolder, *et al.*, 2003); para obtener el mismo efecto en presencia de creatina, se deben añadir 90 μM Ca^{2+} (Dolder, *et al.*, 2003). Lo anterior se puede explicar por la extrusión de Ca^{2+} desde el espacio entre las membranas mitocondriales debida a la generación de un potencial positivo de la membrana externa de unos 15 mV.

El análisis de los datos experimentales permite plantear que la generación del potencial positivo de la membrana externa por el sistema VDAC-creatina cinasa o VDAC-hexocinasa podría ser crucial para la protección de las células contra la muerte en las condiciones de niveles tóxicos de calcio en el citosol. Es importante anotar que el valor y el signo del potencial de la membrana externa deben resultar de la superposición de los potenciales eléctricos generados mediante varios mecanismos. Las evaluaciones termodinámicas de los mecanismos descritos en este trabajo demuestran que hay una probabilidad alta de que se genere un potencial de la membrana externa con un valor suficiente (entre -40 mV y +40 mV) para modular profundamente la permeabilidad

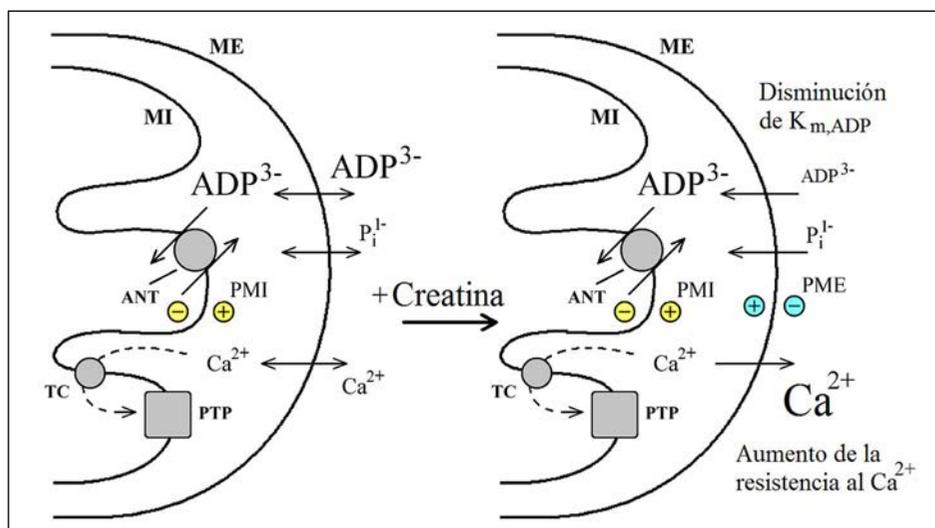


Figura 8. La generación del potencial positivo de la membrana externa en las mitocondrias de corazón en presencia de creatina puede ser un factor crucial para una disminución significativa de la $K_{m,ADP}$ aparente de la respiración mitocondrial y para una elevada resistencia al Ca^{2+} durante la sístole. ANT: antiportador ATP/ADP; PTP: poro de transición de permeabilidad mitocondrial; TC: canal de Ca^{2+}

del VDAC frente a varios metabolitos con carga negativa. En general, la membrana mitocondrial externa puede tener un papel crucial en el control del metabolismo energético celular atendiendo a las propiedades de regulación del VDAC mediante el voltaje (*voltage-gating*) (Colombini & Mannella, 2012).

En los últimos años, diversos investigadores en este campo han considerado la posibilidad de generar el potencial de la membrana externa (Camara, *et al.*, 2017; Rostovtseva, *et al.*, 2017; Lemasters, 2017; Shoshan-Barmatz, *et al.*, 2018). Uno de los factores que puede favorecer la generación de dicho potencial es el “taponamiento” molecular de una fracción de los VDAC en la membrana externa con algunas proteínas (Lemeshko, 2017a) como la tubulina (Rostovtseva & Bezrukov, 2012), o la α -sinucleína (Rostovtseva, *et al.*, 2015), entre otras, lo que reviste gran interés para aclarar el papel del VDAC en varias enfermedades neurodegenerativas (Rostovtseva, *et al.*, 2015; Camara, *et al.*, 2017; Shoshan-Barmatz, *et al.*, 2018).

Conclusiones

Con los mecanismos propuestos para la generación del potencial eléctrico en la membrana mitocondrial externa de células normales y tumorales, y con las predicciones termodinámicas del posible rango de los cambios de dicho potencial, es posible explicar varios fenómenos de la regulación del metabolismo energético y de la resistencia a la muerte celular. Por ejemplo, los efectos de Crabtree y Warburg, que todavía no son claros, podrían estar asociados con la supresión eléctrica de las mitocondrias tanto en las células cancerígenas como en la levadura *S. cerevisiae*. Según el modelo de generación del potencial de la membrana externa por la acción de los complejos VDAC-hexocinasa, los cuales actuarían como una batería biológica, se puede predecir que aquellos factores que impiden la formación de estos complejos tendrían una actividad anticancerígena. Dadas las diversas posibilidades de generación del potencial de la membrana externa de manera dependiente del metabolismo, la membrana mitocondrial externa puede ejercer un control eléctrico del flujo metabólico entre las mitocondrias y el citosol mediante el mecanismo de realimentación negativa. Incluso cuando los niveles del potencial son relativamente bajos y no bastan para el cierre eléctrico de los VDAC, el potencial generado puede influir significativamente en las concentraciones de los metabolitos cargados y del Ca^{2+} en el espacio entre las membranas mitocondriales, modulando de esta manera el estado metabólico de las mitocondrias y la resistencia a la muerte celular bajo la influencia de varios factores adversos. El desarrollo de nuevos métodos para la confirmación experimental directa de la generación del potencial de la membrana externa en las células vivas es crucial para aclarar el papel fisiológico de las propiedades reguladoras del VDAC mediante el voltaje, las cuales se han conservado a lo largo de la evolución biológica (Colombini & Mannella, 2012).

Agradecimientos

El autor expresa sus profundos agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, por las facilidades brindadas para desarrollar las investigaciones; al profesor Sergio Orduz Peralta, de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, coautor de las patentes de péptidos antimicrobianos, anticancerígenos e insecticidas; al profesor José Alexander Álvarez Bustamante, de la Universidad CES, coautor de la patente de una máquina ‘electroporadora’ de láminas orgánicas; a los compañeros de trabajo, profesores Dairo Alonso Rendón Rivera y Diego Aristizábal Ramírez, por la lectura de este artículo y sus valiosas observaciones. Asimismo, el autor agradece al doctor Marco Colombini, de la Universidad Maryland (EE. UU.), por su apoyo e interés permanente en los trabajos teóricos mencionados, y a la doctora Tatiana Rostovtseva, de los National Institutes of Health de Estados Unidos, por la asesoría sobre las propiedades eléctricas de los VDAC.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses con respecto al contenido de este artículo original.

Referencias

- Appaix F., Kuznetsov A.V., Usson Y., Kay L., Andrienko T., Olivares J., Kaambre T., Sikk P., Margreiter R., Saks V. (2003). Possible role of cytoskeleton in intracellular arrangement and regulation of mitochondria. *Exp Physiol.* **88**: 175-190.
- Avéret N., Aguilaniu H., Bunoust O., Gustafsson L., Rigoulet M. (2002). NADH is specifically channeled through the mitochondrial porin channel in *Saccharomyces cerevisiae*. *J Bioenerg Biomembr.* **34** (6): 499-506.
- Bakker B.M., Overkamp K.M., van Maris A.J., Kötter P., Lutik M.A., van Dijken J.P., Pronk J.T. (2001). Stoichiometry and compartmentation of NADH metabolism in *Saccharomyces cerevisiae*. *FEMS Microbiol Rev.* **25** (1): 15-37.
- Benz R., Kottke M., Brdiczka D. (1990). The cationically selective state of the mitochondrial outer membrane pore: A study with intact mitochondria and reconstituted mitochondrial porin. *Biochim Biophys Acta.* **1022**: 311-318.
- Brdiczka D.G., Zorov D.B., Sheu S.S. (2006). Mitochondrial contact sites: Their role in energy metabolism and apoptosis. *Biochim. Biophys. Acta.* **1762**: 148-163.
- Camara A.K.S., Zhou Y., Wen P.C., Tajkhorshid E., Kwok W.M. (2017). Mitochondrial VDAC1: A Key Gatekeeper as Potential Therapeutic Target. *Front Physiol.* **8**: 460.
- Carafoli E. (2012). The interplay of mitochondria with calcium: An historical appraisal. *Cell Calcium.* **52** (1): 1-8.
- Colombini M. (1979). A candidate for the permeability pathway of the outer mitochondrial membrane. *Nature.* **279**: 643-645.
- Colombini M. (2016). The VDAC channel: Molecular basis for selectivity. *Biochim Biophys Acta.* **1863** (10): 2498-2502.
- Colombini M., Blachly-Dyson E., Forte M. (1996). VDAC, a channel in the outer mitochondrial membrane. *Ion Channels.* **4**: 169-202.

- Colombini M., Mannella C.A.** (2012). VDAC, the early days. *Biochim Biophys Acta.* **1818** (6): 1438-1443.
- Díaz-Ruiz R., Rigoulet M., Devin A.** (2011). The Warburg and Crabtree effects: On the origin of cancer cell energy metabolism and of yeast glucose repression. *Biochim Biophys Acta.* **1807** (6): 568-576.
- Dolder M., Walzel B., Speer O., Schlattner U., Wallimann T.** (2003). Inhibition of the mitochondrial permeability transition by creatine kinase substrates. Requirement for microcompartmentation. *J Biol Chem.* **278**: 17760-17766.
- Earnshaw M.J.** (1975). The mechanism of K⁺-stimulated exogenous NADH oxidation in plant mitochondria. *FEBS Lett.* **59** (1): 109-112.
- Eisner D.A., Caldwell J.L., Kistamás K., Trafford A.W.** (2017). Calcium and excitation-contraction coupling in the heart. *Circ Res.* **121** (2): 181-195.
- Hagman A., Säll T., Piškur J.** (2014). Analysis of the yeast short-term Crabtree effect and its origin. *FEBS J.* **281** (21): 4805-4814.
- Hammad N., Rosas-Lemus M., Uribe-Carvajal S., Rigoulet M., Devin A.** (2016). The Crabtree and Warburg effects: Do metabolite-induced regulations participate in their induction? *Biochim Biophys Acta.* **1857** (8): 1139-1146.
- Haridas V., Li X., Mizumachi T., Higuchi M., Lemeshko V.V., Colombini M., Gutterman J.U.** (2007). Avicins, a novel plant-derived metabolite lowers energy metabolism in tumor cells by targeting the outer mitochondrial membrane. *Mitochondrion.* **7** (3): 234-240.
- Hodge T., Colombini M.** (1997). Regulation of metabolite flux through voltage-gating of VDAC channels. *J Membr Biol.* **157** (3): 271-279.
- Gerencser A.A., Chinopoulos C., Birket M.J., Jastroch M., Vitelli C., Nicholls D.G., Brand M.D.** (2012). Quantitative measurement of mitochondrial membrane potential in cultured cells: Calcium-induced de- and hyperpolarization of neuronal mitochondria. *J Physiol.* **590** (12): 2845-2871.
- John S., Weiss J.N., Ribalet B.** (2011). Subcellular localization of hexokinases I and II directs the metabolic fate of glucose. *PLoS One.* **6** (3): e17674.
- Kmita H., Budzińska M., Stobienia O.** (2003). Modulation of the voltage-dependent anionselective channel by cytoplasmic proteins from wild type and the channel depleted cells of *Saccharomyces cerevisiae*. *Acta Biochim Pol.* **50** (2): 415-424.
- Lemasters J.J. & Holmuhamedov E.** (2006). Voltage-dependent anion channel (VDAC) as mitochondrial governor thinking outside the box. *Biochim Biophys Acta.* **1762** (2): 181-190.
- Lemasters J.J. & Ramshesh V.K.** (2007). Imaging of mitochondrial polarization and depolarization with cationic fluorophores. *Methods Cell Biol.* **80**: 283-295.
- Lemasters J.J.** (2017). Evolution of voltage-dependent anion channel function: From molecular sieve to governor to actuator of ferroptosis. *Front Oncol.* **7**: 303.
- Lemeshko S.V. & Lemeshko V.V.** (2000). Metabolically derived potential on the outer membrane of mitochondria: a computational model. *Biophys J.* **79**: 2785-2800.
- Lemeshko V.V.** (2002). Model of the outer membrane potential generation by the inner membrane of mitochondria. *Biophys J.* **82**: 684-692.
- Lemeshko V.V.** (2006). Theoretical evaluation of a possible nature of the outer membrane potential of mitochondria. *Eur Biophys J.* **36**: 57-66.
- Lemeshko V.V., Haridas V., Quijano Pérez J.C., Gutterman J.U.** (2006a). Avicins, natural anticancer saponins, permeabilize mitochondrial membranes. *Arch Biochem Biophys.* **454** (2): 114-122.
- Lemeshko V., Guzmán F., Patarroyo M.E., Segura C., Ordúz S.** (2006b) Synthetic peptide having an ionophoric and antimicrobial activity. United States Patent No. 7041647.
- Lemeshko V.V.** (2014). VDAC electronics: 1. VDAC-hexo(gluc) kinase generator of the mitochondrial outer membrane potential. *Biochim Biophys Acta.* **1838**: 1362-1371.
- Lemeshko V.** (2015). The Warburg effect as a VDAC-hexokinase-mediated electrical suppression of mitochondrial energy metabolism. *FASEB J.* **29** (Suppl 1): 725-27.
- Lemeshko V.V.** (2016). VDAC electronics: 3. VDAC-creatine kinase-dependent generation of the outer membrane potential in respiring mitochondria. *Biochim Biophys Acta.* **1858** (7 PtA): 1411-1418.
- Lemeshko V.V.** (2017a). The mitochondrial outer membrane potential as an electrical feedback control of cell energy metabolism. En: T.K. Rostovtseva (Ed.), *Molecular Basis for Mitochondrial Signaling*, Springer International Publishing, New York, Chapter **9**: 217-250.
- Lemeshko V.V.** (2017b). VDAC electronics: 4. Novel electrical mechanism and thermodynamic estimations of glucose repression of yeast respiration. *Biochim Biophys Acta.* **1859** (11): 2213-2223.
- Liu M.Y. & Colombini M.** (1992). A soluble mitochondrial protein increases the voltage dependence of the mitochondrial channel, VDAC. *J Bioenerg Biomembr.* **24**: 41-46.
- Luttik M.A., Overkamp K.M., Kötter P., de Vries S., van Dijken J.P., Pronk J.T.** (1998). The *Saccharomyces cerevisiae* NDE1 and NDE2 genes encode separate mitochondrial NADH dehydrogenases catalyzing the oxidation of cytosolic NADH. *J Biol Chem.* **273** (38): 24529-24534.
- Maldonado E.N., Patnaik J., Mullins M.R., Lemasters J.J.** (2010). Free tubulin modulates mitochondrial membrane potential in cancer cells. *Cancer Res.* **70** (24): 10192-10201.
- Maldonado E.N., Sheldon K.L., DeHart D.N., Patnaik J., Manevich Y., Townsend D.M., Bezrukov S.M., Rostovtseva T.K., Lemasters J.J.** (2013). Voltage-dependent anion channels modulate mitochondria metabolism in cancer cells: Regulation by free tubulin and erastin. *J Biol Chem.* **288** (17): 11920-11929.
- Mannella C.A.** (1982). Structure of the outer mitochondrial membrane: Ordered arrays of porelike subunits in outer-membrane fractions from *Neurospora crassa* mitochondria. *J Cell Biol.* **94**: 680-687.
- Marín-Hernández A., Rodríguez-Enríquez S., Vital-González P.A., Flores-Rodríguez F.L., Macías-Silva M., Sosa-Garrocho M., Moreno-Sánchez R.** (2006). Determining and understanding the control of glycolysis in fast-growth tumor cells. Flux control by an overexpressed but strongly product-inhibited hexokinase. *FEBS J.* **273** (9): 1975-1988.
- Mastrangelo D., Pelosi E., Castelli G., Lo-Coco F., Testa U.** (2017). Mechanisms of anti-cancer effects of ascorbate: Cytotoxic activity and epigenetic modulation. *Blood Cells Mol Dis pii.* **S1079-9796** (17): 30327-3.

- O’Gorman E., Beutner G., Dolder M., Koretsky A.P., Brdiczka D., Wallimann T.** (1997). The role of creatine kinase in inhibition of mitochondrial permeability transition. *FEBS Lett.* **414**: 253-257.
- Ohnishi T., Kawaguchi K., Hagihara B.** (1966). Preparation and some properties of yeast Mitochondria. *J Biol Chem.* **241** (8): 1797-1806.
- Ordúz S., Lemeshko V.** (2016). Péptido sintético policatiónico como agente ionofórico, antimicrobiano, antitumoral e insecticida. *Rad. Gaceta* 701, No. 174, 31 de julio de 2014, Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia. Res. No.: 22123.
- Pfeiffer T., Morley A.** (2014). An evolutionary perspective on the Crabtree effect. *Front Mol Biosci.* **1**: 17.
- Pinz I., Ostroy S.E., Hoyer K., Osinska H., Robbins J., Molkentin J.D., Ingwall J.S.** (2008). Calcineurin-induced energy wasting in a transgenic mouse model of heart failure. *Am J Physiol Heart Circ Physiol.* **294** (3): H1459-H1466.
- Porcelli A.M., Ghelli A., Zanna C., Pinton P., Rizzuto R., Rugolo M.** (2005). pH difference across the outer mitochondrial membrane measured with a green fluorescent protein mutant. *Biochem Biophys Res Commun.* **326**: 799-804.
- Rigoulet M., Aguilaniu H., Avéret N., Bunoust O., Camougrand N., Grandier-Vazeille X., Larsson C., Pahlman I.L., Manon S., Gustafsson L.** (2004). Organization and regulation of the cytosolic NADH metabolism in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Mol Cell Biochem.* **256-257** (1-2): 73-81.
- Rizzuto R., De Stefani D., Raffaello A., Mammucari C.** (2012). Mitochondria as sensors and regulators of calcium signalling. *Nat Rev Mol Cell Biol.* **13** (9): 566-578.
- Rostovtseva T., Colombini M.** (1997). VDAC channels mediate and gate the flow of ATP: Implications for the regulation of mitochondrial function. *Biophys J.* **72** (5): 1954-1962.
- Rostovtseva T.K., Komarov A., Bezrukov S.M., Colombini M.** (2002). Dynamics of nucleotides in VDAC channels: Structure-specific noise generation. *Biophys J.* **82** (1 Pt 1): 193-205.
- Rostovtseva T.K., Bezrukov S.M.** (2012). VDAC inhibition by tubulin and its physiological implications. *Biochim Biophys Acta.* **1818** (6): 1526-1535.
- Rostovtseva T.K., Gurney P.A., Protchenko O., Hoogerheide D.P., Yap T.L., Philpott C.C., Lee J.C., Bezrukov S.M.** (2015). α -Synuclein shows high affinity interaction with voltage-dependent anion channel, suggesting mechanisms of mitochondrial regulation and toxicity in Parkinson disease. *J Biol Chem.* **290** (30):18467-18477.
- Rostovtseva, T.K., Hoogerheide D.P., Rovni A., Bezrukov S.M.** (2017). Lipids in regulation of the mitochondrial outer membrane permeability, bioenergetics, and metabolism. In: T.K. Rostovtseva (Ed.), *Molecular Basis for Mitochondrial Signaling*, Springer International Publishing, New York, Chapter. **8**: 185-215.
- Saks V., Guzun R., Timohhina N., Tepp K., Varikmaa M., Monge C., Beraud N., Kaambre T., Kuznetsov A., Kadaja L., Eimre M., Seppet E.** (2010). Structure–function relationships in feedback regulation of energy fluxes in vivo in health and disease: Mitochondrial interactosome. *Biochim Biophys Acta.* **1797** (6-7): 678-697.
- Sen U., Shenoy P.S., Bose B.** (2017). Opposing effects of low versus high concentrations of water-soluble vitamins/dietary ingredients vitamin C and niacin on colon cancer stem cells (CSCs). *Cell Biol Int.* **41** (10): 1127-1145.
- Shoshan-Barmatz V., Ben-Hail D., Admoni L., Krelin Y., Tripathi S.S.** (2015). The mitochondrial voltage-dependent anion channel 1 in tumor cells. *Biochim Biophys Acta.* **1848** (10 PtB): 2547-2575.
- Shoshan-Barmatz V., Krelin Y., Shteinfefer-Kuzmine A., Arif T.** (2017). Voltage-dependent anion channel 1 as an emerging drug target for novel anti-cancer therapeutics. *Front Oncol.* **7**: 154.
- Shoshan-Barmatz V., Krelin Y., Shteinfefer-Kuzmine A.** (2018). VDAC1 functions in Ca^{2+} homeostasis and cell life and death in health and disease. *Cell Calcium.* **69**: 81-100.
- Simson P., Jephthina N., Laasmaa M., Peterson P., Birkedal R., Vendelin M.** (2016). Restricted ADP movement in cardiomyocytes: Cytosolic diffusion obstacles are complemented with a small number of open mitochondrial voltage-dependent anion channels. *J Mol Cell Cardiol.* **97**: 197-203.
- Timohhina N., Guzun R., Tepp K., Monge C., Varikmaa M., Vija H., Sikk P., Kaambre T., Sackett D., Saks V.** (2009). Direct measurement of energy fluxes from mitochondria into cytoplasm in permeabilized cardiac cells in situ: Some evidence for mitochondrial interactosome. *J Bioenerg Biomembr.* **41**: 259-275.
- Vander Heiden M.G., Chandel N.S., Li X.X., Schumacker P.T., Colombini M., Thompson C.B.** (2000). Outer mitochondrial membrane permeability can regulate coupled respiration and cell survival. *Proc Natl Acad Sci USA.* **97** (9): 4666-4671.
- Vazeille X., Larsson C., Pahlman I.L., Manon S., Gustafsson L.** (2004) Organization and regulation of the cytosolic NADH metabolism in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Mol Cell Biochem.* **256-257** (1-2): 73-81.
- Wallimann T., Tokarska-Schlattner M., Schlattner U.** (2011). The creatine kinase system and pleiotropic effects of creatine. *Amino Acids.* **40**: 1271-1296.
- Wilson J.E.** (1997). Homologous and heterologous interactions between hexokinase and mitochondrial porin: Evolutionary implications. *J Bioenerg Biomembr.* **29** (1): 97-102.
- Xia J., Xu H., Zhang X., Allamargot C., Coleman K.L., Nessler R., Frech I., Tricot G., Zhan F.** (2017). Multiple myeloma tumor cells are selectively killed by pharmacologically-dosed ascorbic acid. *EBioMedicine.* **18**: 41-49.
- Zizi M., Forte M., Blachly-Dyson E., Colombini M.** (1994). NADH regulates the gating of VDAC, the mitochondrial outer membrane channel. *J Biol Chem.* **269** (3): 1614-1616.
- Zorova L.D., Popkov V.A., Plotnikov E.Y., Silachev D.N., Pevzner I.B., Jankauskas S.S., Babenko V.A., Zorov S.D., Balakireva A.V., Juhaszova M, Sollott S.J., Zorov D.B.** (2017). Mitochondrial membrane potential. *Anal Biochem pii.* **S0003-2697** (17): 30293-2.

Notas sobre el uso del helecho *Jokome* (*Adiantum pulverulentum* L. Pteridaceae) por el pueblo *Murui-Muina* “uitoto” en el piedemonte andino-amazónico de Colombia

Eider Bladimir Ortiz-Andoke (Q.E.P.D.)¹, Lizhet Soto², David Sanín^{3,*}

¹ Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad de la Amazonia, Florencia-Caquetá, Colombia

² Parque Nacional Natural Alto Fragua Indi Wasi, Sistema de Parques Naturales Nacionales de Colombia, San José del Fragua, Caquetá, Colombia

³ Herbario BHCB, Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Botânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Resumen

Se describen y discuten los usos rituales, medicinales y tradicionales que el pueblo *Murui-Muina*, registra para el helecho *Jakome* (*Adiantum pulverulentum* L.) Pteridaceae. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: *Adiantum*; Baile de la Fruta; Convergencia cultural; Peligro de extinción; Etnopteridología.

Notes about the use of the fern *Jokome* (*Adiantum pulverulentum* L. Pteridaceae) by the people *Murui-Muina* “uitoto” in the Foothill Andean-Amazonic of Colombia

Abstract

The traditional, medicinal and ritual uses that the people *Murui-Muina*, register for the fern *Jakome* (*Adiantum pulverulentum* L.) Pteridaceae are described and discussed. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: *Adiantum*; Fruit Dance; Cultural convergence; Extinction risk; Etnopteridology.

Introducción

El pueblo *Murui-Muina* es conocido erradamente en la literatura etnográfica como huitotos, uitotos o witotos, cuyo origen etimológico se estructura en los vocablos Caribes (Carijonas): “itotos”, “uitotos”, “quiuyos”, o palabras similares que significan “otra gente” (Griffiths, *et al.*, 1998). Esta nominación fue designada por los grupos *Huaque* que utilizaban dichos vocablos para las personas que capturaban en el desarrollo de sus luchas interétnicas, el cual posteriormente fue utilizado por los españoles en la conquista (Pineda, 1987), y prevalece en la actualidad. Esta denominación en referencia es ajena a la propia designación cultural que hoy hacen los *Murui-Muina* (*los hijos de la coca, el tabaco y la yuca dulce*).

De acuerdo con el lugar geográfico que ocupa cada grupo de la cultura *Murui-Muina*, es posible distinguir cuatro dialectos relacionados y mutuamente inteligibles: *Bue*, *Mika*, *Minika* y *Nipode* (Griffiths, *et al.*, 1998). Sin embargo, la zona interfluvial del Caquetá y el Putumayo conforman el centro del territorio ancestral *Murui-Muina* (Griffiths, *et al.*, 1998).

Se registran 6.444 personas pertenecientes a la cultura *Murui-Muina* (Censo del Ministerio del Interior, 2015), con un alto riesgo de extinción física y cultural (Corte

Constitucional de Colombia, 2009). Las comunidades *Muina* en situación de desplazamiento forzado en la ciudad de Florencia (capital del departamento del Caquetá) han utilizado el dialecto *Nipode* como estrategia de supervivencia cultural.

Para esta cultura, la botánica o la “carrera de las plantas” representa el estudio de los organismos vegetales desde un sentido amplio y complejo, el cual abarca el conocimiento de cada estructura, sus usos y el potencial que cada órgano presenta según su fenología y la manera en que se utilice al combinarlo con otras especies. De esta forma, en armonía con las labores y los roles que cada hombre y mujer cumple en el grupo, los *Muina* realizan rituales intrínsecamente relacionados con la naturaleza, donde las plantas tienen un papel fundamental como lo demuestran los usos seculares y rituales de la coca o “*Jibie*” (*Erythroxylum coca* Lam.), el tabaco o “*Diona*” (*Nicotiana tabacum* L.) y la yuca dulce o “*Pareka*” (*Manihot esculenta* Crantz), entidades sagradas que cumplen un papel determinante en la ordenación y equilibrio del mundo.

*Correspondencia:

David Sanín, dav.sanin@gmail.com

Recibido: 19 de diciembre de 2017

Aceptado: 31 de marzo de 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

Con el objeto de potenciar dichas entidades, el pueblo *Muina* suele utilizar diversos taxones en sus rituales, ya sea para agradecer por los frutos de la tierra, promover la fertilidad en la cosecha, favorecer la salud, curar la enfermedad, e incrementar la suerte o la sabiduría en la caza. Es aquí, donde los helechos adquieren un papel fundamental.

No obstante, su abundancia y diversidad en Colombia (Murillo, *et al.*, 2008), los helechos son un grupo poco estudiado, y menos aún descrito en rituales realizados por los pueblos indígenas (Murillo, 1983; May, 1978; Keller & Prance, 2015).

Derivado de la experiencia del primer autor como miembro del pueblo *Muina*, se describen y comentan los usos que su cultura registra para el “*Jokome*”: *Adiantum pulverulentum* L. (Pteridaceae) (Figura 1), en el asentamiento El Manantial, ubicado a los alrededores de la ciudad de Florencia, Caquetá, Colombia (1°36'51"N, 75°36'42"O), a una altura promedio de 242 m.

Uso ceremonial

El *Jokome* es utilizado en los bailes rituales *Yuaki*, *Rafue* o baile de la fruta y *Tikida Buinaima* o baile de cacería. En este aporte, se hará énfasis en el baile *Yuaki* y canto de *Muiruiki*, el cual representa una tradición que despliega el conocimiento de los ciclos estacionales, la historia natural de los frutos silvestres, las interacciones sociales entre invitados y los dueños de la maloka, y el papel de hombres y mujeres en la producción de los alimentos y el ejercicio ceremonial (Candre, 2011). El baile ritual de *Yuaki* o baile de la fruta, es practicado en la actualidad por los *Muina* como uno de los cuatro bailes pilares fundamentales en el proceso de formación de un cacique o dueño de maloka, el cual es correspondiente al “*pilar de la abundancia*”. En este ritual se agradece a la madre tierra “*Buinaima*” por la cosecha y los frutos recibidos, los dueños de la maloka preparan y comparten grandes cantidades de comida cultivada (principalmente yuca y sus derivados), *Ambil* de tabaco o “*Rogoki*” y *Mambe* de coca o “*Jibie*”, con los que reciben y pagan los cantos, las frutas silvestres y la cacería que deben traer los invitados (Candre, 2011). En la realización del baile de la fruta, el helecho *Jokome* (*Adiantum pulverulentum*) es fundamental para marcar el ritmo del mismo y como su ambientador. Para su utilización se toma un manojo de hojas secas amarradas y compactadas de *Jokome* (Figura 2), para ser agitadas según el ritmo del canto, generando un sonido característico, que según nuestra narración, es utilizado en un punto especial de la ceremonia para estabilizar y filtrar la energía. Es considerado como un catalizador de las buenas energías, dado que para los *Muina*, su aroma no permite identificar al individuo de los malos espíritus, ni del olfato de los animales, reconociéndosele como un aromatizante. Al respecto, May (1978) comenta que algunas especies de helechos, dentro de las que se encuentran *Adiantum capillus-veneris* L., especie relacionada con el *Jokome*, presentan constituyentes que incluyen ácido tánico, ácido gallico y trazas de aceites esenciales, lo cual puede producir un olor plácido tónico.



Figura 1. *Jokome* o *Adiantum pulverulentum* L. (Pteridaceae). (A). Hábito de la planta. (B). Superficie abaxial donde se observa el detalle de los soros lineares. (C). Superficie adaxial. Escalas: (A). 7 cm. (B). 1 cm. (C). 7 mm. Fotos por R.C. Moran.

La trascendencia de la ceremonia *Yuaki* para el pueblo *Muina*, y el uso del helecho *Jokome* (*Adiantum pulverulentum*) en un punto especial de ella, estimula la generación de interrogantes sobre el entendimiento que los *Muina* tienen sobre las plantas: ¿Los *Muina* reconocen la diferencia evolutiva entre los helechos y las angiospermas?, de ser así, ¿Esta diferencia trasciende lo espiritual y determina una neutralidad en su ofrenda a la madre tierra?, ¿Por qué utilizan un helecho y no una planta con flores para agradecer por la cosecha de frutos y semillas?

Uso medicinal

En la medicina tradicional del pueblo *Muina*, el *Jokome* es de gran importancia ya que es utilizado en diferentes tratamientos.

1) Dolor de cabeza y gripe: para esto se recolectan las hojas nuevas, luego se maceran a mano y posteriormente el curaca o médico tradicional “*ikoriraima*” debe narrar la oración, para que el paciente pueda inhalar el vapor del hervido entre 30 minutos a una hora y durante una semana.

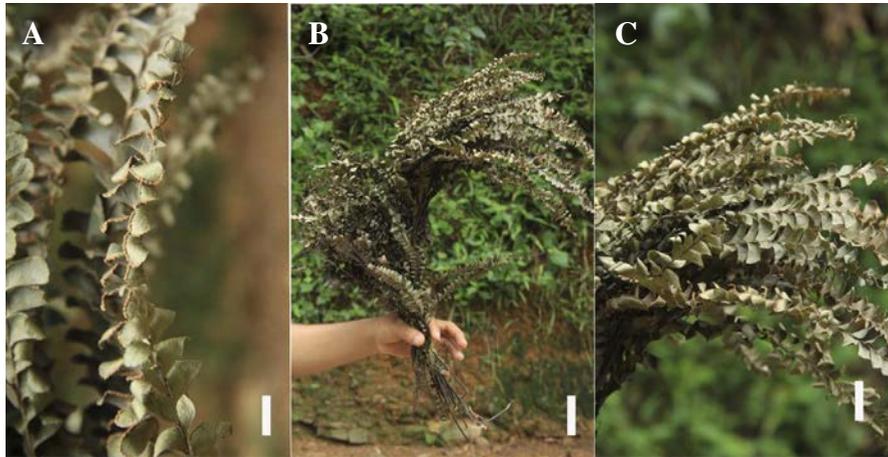


Figura 2. Manojos de *Jokome* o *Adiantum pulverulentum* L. (Pteridaceae), utilizados en el baile de la fruta. (A). Detalle de una pinna fértil. (B). Manojito completo de *Jokome*. (C). Ápice del manojito de *Jokome*. Escalas: (A). 7 mm. (B). 5 cm. (C). 5 cm. Fotos por J.L. Peña.

En este sentido, otras especies del género *Adiantum* (vg. *A. aethiopicum* L., *A. capillus-veneris* L. y *A. caudatum* L.) fueron utilizadas por los herbalistas para curar un vasto número de enfermedades y son útiles en el tratamiento de fiebres, la gripe y enfermedades relacionadas (Lloyd, 1964; May, 1978).

2) Fiebre: se recolectan y depositan las hojas nuevas en un recipiente con agua hervida, posteriormente se hacen rezar por el curaca para después suministrar una porción (200-250 mm) al paciente. Este tratamiento debe realizarse dos veces al día durante una semana. May (1978) comenta que *A. capillus-veneris* es el principal ingrediente del famoso “Siropo de Capillaire”, ampliamente utilizado para calmar la fiebre en Francia.

3) Disminución del envejecimiento: se recolectan las mejores y más jóvenes hojas, luego se depositan en un recipiente con agua para que posteriormente sean rezadas por el curaca. Luego se procede a realizar baños donde las hojas del *Jokome* se deben distribuir con presión por todo el cuerpo, provocando que la persona se libere de la energía negativa que carga y mantenga así su juventud. Al respecto, Keller & Prance (2015) mencionan la existencia de sustancias con actividad antioxidante en diversos helechos, las cuales son utilizadas en la medicina para reducir el estrés producto de la oxidación, entre ellos, un familiar del *jokome*, *Adiantum capillus-veneris* podría citarse como ejemplo (Kumar, 2009).

Uso ritual para la cacería

Existe además un uso ritual que el pueblo *Muina* determina para el helecho *Jokome*, con el cual se pretende incrementar el éxito en una actividad que es exclusiva de los hombres, la cacería. Para esto, se recolectan las vernaciones circinadas (hojas jóvenes no desarrolladas del helecho), que posteriormente se maceran a mano, distribuyéndolas con presión por todo el cuerpo antes de salir a cazar. Esto permite que los animales no perciban al cazador, o que no

logren registrar su olor, lo cual puede ser explicado por algún tipo de mimetismo generado por el olor de la planta, y a su vez indica una lógica legendaria explorada y utilizada por los *Muina* que evoca una antigua idea Europea Cristiana descrita por Paracelsus (1493-1541) como “la doctrina de las asignaturas, teoría del signo, o de las asignaturas”, a partir de la cual en el medioevo se combinó la medicina y la astrología con la botánica y la superstición, determinando que la naturaleza de las formas, colores, sabores, olores y otros atributos particulares de las plantas (hojas y flores, etc.), podrían indicar su utilidad, especialmente para controlar enfermedades (Pearce, 2008). Sin embargo, para los helechos, dadas sus complejas arquitecturas foliares, su grado de disección laminar, y sobre todo, su enigmática e inconspicua reproducción por esporas, la cual, debido al tamaño de las mismas (30 y 100 μ m) Tryon & Lugardon (1990), fue imperceptible para el ojo humano de la época. A la luz de esta doctrina, se podría asumir que los helechos representaban plantas desconocidas, enigmáticas, y hasta relacionadas con la magia y brujería. Se generó así una fijación por el desconocimiento de las estructuras reproductivas de los helechos y al relacionarlos con las plantas con semillas, se asumió que sus semillas eran invisibles (Moran, 2004), y por lo tanto, todo aquel que tuviera el privilegio de poseerlas, adquiriría dicho atributo (Duran, 1949). Las etnias Celtas y Germanos concluyeron que estas plantas otorgaban este privilegio, debido a que estas plantas crecían e incrementaban sus poblaciones sin ningún órgano reproductor aparente (Friend, 1884), considerándolas como una sagrada fuente de poder (May, 1978).

Por los argumentos anteriormente citados es posible que el pueblo *Murui-Muina*, por la aparente ausencia de estructuras reproductivas (frutos o semillas), la ecología de la planta –ubicada principalmente en zonas abiertas e intervenidas– y sobre todo, por el continuo contacto con *Adiantum pulverulentum*, haya considerado relacionar que la especie brindaba ventajas a la persona que la utiliza

en la caza y la lucha, ya que al nunca observar sus frutos o semillas, podía tratarse de una planta que promovía la invisibilidad.

Este hecho representa un interesante ejemplo de convergencia cultural, donde el ser humano más allá de sus barreras culturales, al relacionarse con su entorno natural, se ha provisto de los helechos, para defenderse, curarse, vestirse, alimentarse, y por ser estos tan importantes en su evolución, los han revestido con un halo de magia.

Agradecimientos

A la comunidad *Murui-Muina* del Corregimiento del Manantial, Florencia, Caquetá, por su amable acogida. A Robbin C. Moran (NY) y Jorge L. Peña (SIBE), por sus fotografías. Agradecemos a Elizabeth Castañeda y a dos evaluadores anónimos por sus valiosos comentarios. A la Universidad de la Amazonia por el apoyo logístico. Este aporte es dedicado a la memoria de nuestro colega botánico y médico tradicional *Muina* Eider Bladimir Ortiz Andoque.

Contribución de los autores

EBOA, LS y DS diseñamos y escribimos el manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Candre Yamakuti, A.** (2011). Mooma Mogorotoi yoga rafue: Yuai Buinama uai ikaki monifuena ari kaimo monoiya, okaina imaki dibinedo. *Mundo Amazónico*. **2**: 307-327.
- Corte Constitucional de Colombia.** (2009). Auto 009/09. Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/autos/2009/a004-09.htm>

- Durand, H.** (1949). *Field Book of Common Ferns*. G. P. Putnam's Sons, N.Y.
- Friend, H. R.** (1886). *Flowers and Flower Lore*. Swan Sonnenschein and Co., London.
- Griffiths, T., Coleman, J., & Morales, M.** (s.f.). *Un léxico Nipode uitoto - español - inglés*. Oxford: Universidad de Oxford.
- Keller, H.A. & G.T. Prance.** (2015). The ethnobotany of ferns and Lycophytes. *Fern Gazette*. **20**: 1-13.
- Kumar, A.** (2009). Antioxidant effect of *Adiantum capillus veneris* Linn. on human lymphocyte: an *in vitro* study. *Journal of Cell and Tissue Research*. **9**: 1899-1902.
- Lloyd, R. M.** (1964). Ethnobotanical Uses of California Pteridophytes by Western Indians. *American Fern Journal*. **54**: 76-82.
- May, L.** (1978). The economic uses and associated folklore of ferns and ferns allies. *The Botanical Review*. **44**: 491-528.
- Ministerio del Interior.** (2015). *Pueblo Uitoto*. Bogotá: Ministerio del Interior.
- Moran, R. C.** (2004). *A Natural history of ferns*. Timber Press. Portland, Oregon, Estados Unidos. 301 pp.
- Murillo, M.T.** (1983). Usos de los helechos en Suramérica con especial referencia a Colombia. Ed. Instituto de Ciencias Naturales, Biblioteca José Jerónimo Triana, No 5, 156 pp. Bogotá.
- Murillo, M. T., J. C. Murillo-A. & A. León-Parra.** (2008). Los Pteridófitos de Colombia. Editorial ARFO Ltda. Bogotá.
- Pearce, J. M. S.** (2008). The doctryne of signature. *European Neurology*. **60**: 50-51.
- Pineda, R.** (1987). "Witoto". En: R. Pineda (ed.), *Introducción a la Colombia Amerindia*, pp. 151-164. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología.
- Tryon, A. F., & Lugardon, B.** (1991). *Spores of the pteridophyta. Surface, wall structure, and diversity based on electron microscope studies*. New York: Springer-Verlag Inc.

Propiedades electrónicas y estructurales del $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$

Nasly Y. Martínez Velásquez^{1,2,*}, Jairo Arbey Rodríguez Martínez¹

¹ GEMA Grupo de Estudio de Materiales, Departamento de Física Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

² CAVENDISH Grupo de Investigación Licenciatura en Matemáticas y Física, Facultad de Ciencias Humanas y la Educación, Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia

Resumen

Mediante el uso de principios basados en la teoría del funcional de la densidad - DFT (Density Functional Theory) se calcularon las propiedades electrónicas y estructurales del compuesto $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$. Empleando el método de ondas planas y la aproximación de pseudopotenciales atómicos ultra suaves se resolvieron las ecuaciones de Kohn-Sham. Para la energía de intercambio y correlación se empleó la aproximación de gradiente generalizado, dentro de la parametrización de Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) tal como está implementada en el código computacional Quantum-Espresso. Al dopar GaAs con impurezas de Cr, el sistema exhibe un comportamiento tipo half-metallic. Dicho material puede ser usado en espintrónica. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Propiedades electrónicas; DFT; QE; $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$

Electronic and structural properties of $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$

Abstract

The structural and electronic properties of the $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$ compound were calculated by employing principles based in the Density Functional Theory-DFT. In order to solve the Kohn-Sham equations, the plane wave method and the ultrasoft atomic pseudopotential approximation were used. Moreover, for the exchange and correlation energy, the generalized gradient approximation was employed, taking into account the Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) parametrization, as it is implemented in the computational code quantum espresso. To dope the GaAs with impurities, the system exhibits a half-metallic behavior. This material can be used in spintronics. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Electronic properties; DFT; QE; $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$.

Introducción

Compuestos binarios III-arsénico exhiben propiedades que los hacen atractivos para aplicaciones comerciales y tecnológicas, entre ellos se encuentra el GaAs, usado en diferentes dispositivos electrónicos y optoelectrónicos tales como diodos emisores de luz, foto detectores, láseres y circuitos integrados, entre otros, debido a que posee gap directo, (Ahmed, *et al.*, 2007).

Los semiconductores que no poseen propiedades magnéticas, se pueden dopar con elementos magnéticos, variando así las propiedades magnéticas del semiconductor, éstos se conocen como semiconductores magnéticos diluidos (DMS Diluted Magnetic Semiconductors) (He & HaiMing, 2008), de amplia aplicación en espintrónica. Diversos estudios realizados con el GaAs confirman que al adicionar impurezas de algunos metales de transición 3d, este compuesto exhibe un momento magnético considerable.

Para analizar las modificaciones de las propiedades electrónicas, estructurales y magnéticas del $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$, se varió la concentración del Cr, se trabajó con celdas $1 \times 1 \times 1$, $1 \times 1 \times 2$ y $2 \times 2 \times 2$, que corresponden a concentraciones de Cr

de 0.25, 0.125 y 0.03125 respectivamente. Concentraciones que están de acuerdo con lo reportado por Shirai (2001), Baykov, *et al.* (2007) y Sandratskii & Bruno (2003).

Optimización de parámetros

Los cálculos se realizaron con el software quantum-espresso (Giannozzi, *et al.*, 2009), se trabajó con el formalismo de la teoría del funcional de la densidad DFT, se empleó el método de ondas planas y pseudopotenciales atómicos ultra-suaves. Se trabajó con la aproximación de Gradiente generalizado (GGA) en la parametrización de Perdew, Burke y Ernzerhof (PBE), (J. P. Perdew, *et al.*, 1996). El GaAs se estudió en la estructura zincblenda, con una constante de red optimizada de 5.66 Å (10.85 Bohr), se empleó una malla de puntos k de $6 \times 6 \times 6$.

Se realizó optimización de la energía de corte E_{cutoff} y la malla de puntos k con respecto al volumen de equilibrio y a la constante de red, como se muestra en el tabla 1.

*Correspondencia:

Nasly Y. Martínez Velásquez, nmartinez@unillanos.edu.co

Recibido: 17 de agosto de 2017

Aceptado: 25 de febrero de 2018

Editor: Guillermo González Villegas

Tabla 1. Energía de corte (Ecutoff), malla de puntos k Monkhorst-Pack, volumen, constante de red, módulo de volumen y energía mínima para el GaAs en su estructura zincblenda

Ecutoff	Parámetros	Malla puntos k			
		3x3x3	4x4x4	6x6x6	10x10x10
25 Ry	a _{min} (Bohr)	10,851	10,849	10,849	10,850
	v _{min} (bohr ₃)	319,41	319,25	319,25	319,34
	Bo (Mbar)	0,62	0,62	0,60	0,61
	Bo'	3,96	4,27	4,70	4,48
	E _{min} (eV)	-2910,71	-2810,73	-2910,73	-2910,73
30 Ry	a _{min} (Bohr)	10,850	10,849	10,850	10,850
	v _{min} (bohr ₃)	319,40	319,26	319,36	319,39
	Bo (Mbar)	0,61	0,61	0,60	0,60
	Bo'	4,38	4,68	4,64	4,63
	E _{min} (eV)	-2910,79	-2810,81	-2910,81	-2910,81
35 Ry	a _{min} (Bohr)	10,851	10,849	10,850	10,851
	v _{min} (bohr ₃)	319,33	319,31	319,39	319,40
	Bo (Mbar)	0,61	0,61	0,61	0,60
	Bo'	4,60	4,60	4,60	4,60
	E _{min} (eV)	-2910,80	-2810,81	-2910,82	-2910,82
40 Ry	a _{min} (Bohr)	10,849	10,849	10,850	10,850
	v _{min} (bohr ₃)	319,31	319,30	319,37	319,39
	Bo (Mbar)	0,61	0,61	0,61	0,60
	Bo'	4,61	4,61	4,60	4,61
	E _{min} (eV)	-2910,80	-2810,82	-2910,82	-2910,82

Resultados y discusiones

Teniendo en cuenta los resultados que se presentan en el cuadro 1, se grafica EvSv para cada una de las energías de corte (figura 1). El valor de la constante de red que hace mínima la energía se encuentra a partir de una malla de puntos k de 6x6x6, para valores de E_{cutoff} de 30 Ry, 35 Ry y 40 Ry, de igual manera para las energías de corte mencionadas, con una malla de puntos k de 10x10x10 el valor de la constante de red es similar al encontrado con la malla de 6x6x6. Teniendo en cuenta lo mencionado y el coste computacional al correr los cálculos con los parámetros descritos, se selecciona la E_{cutoff} de 30 Ry con una malla de puntos k de 6x6x6, para el valor de a que minimiza la energía correspondiente al a₀(10.85 bohr).

En el tabla 2, se compara el valor de la constante de red y el módulo de volumen calculado, para el GaAs en la estructura zincblenda, con otros datos reportados en la literatura. Se relacionan los porcentajes de error para cada uno de los parámetros escogidos.

Los valores reportados por Ahmed, et al., (2007) son de carácter teórico, calculados mediante el método FP-LDA y FP-GGA por sus siglas en inglés Full-potential linear augmented plane wave (FP-LAPW) con la aproximación de densidad local (LDA - Local density approximation) y aproximación de gradiente generalizado (GGA -generalized gradient approximation), respectivamente, cálculos realizados mediante código WIEN2K; los datos reportados por Hellwege, et al., (1982) y Fillipi, et al., (1994) son de carácter experimental.

La diferencia en los valores obtenidos se debe a los métodos empleados para hallar dicho parámetro.

Propiedades electrónicas y estructurales

Las gráficas de bandas de energía que se presentan, se hicieron para el camino $\Gamma, M, X, \Gamma, R, X, M, R$; camino de alta simetría de la Primera Zona de Brillouin, lo enunciado se trabajó para la celda zincblenda y la supercelda 2x2x2. Para la supercelda 1x1x2, se tuvo en cuenta el camino de alta simetría $\Gamma, M, X, \Gamma, A, M, X, A$, en la PZB.

A continuación se presentan los resultados para el GaAs en su estructura zincblenda.

De acuerdo con la figura 2 el GaAs posee gap directo en Γ , con un valor de 0.25 eV, dicho valor permite ver que el compuesto es un semiconductor; éste resultado concuerda con otros datos teóricos reportados por Ahmed, et al., (2007); Grivickas, et al., (2009); Ihm & Joannopoulos (1981); Sze & Ng (2007); Wang & Klein (1981). Resultados similares se encuentran para las superceldas 1x1x2 y 2x2x2.

Al sustituir un átomo de Ga por uno de Cr en la red, se encuentra que las bandas de energía difieren de la estructura pura. Se encuentra que para una orientación de espín presenta un comportamiento conductor, y para la otra, un comportamiento aislante R.A.Groot, et al. (1983); Sandratskii & Bruno (2003), (figura 3), es decir el sistema exhibe un comportamiento half-metallic.

En la figura 3(a) se observa un traslapamiento de bandas de valencia y conducción, hecho que evidencia un carácter metálico del Ga_{1-x}Cr_xAs(x = 0,25). Cerca al nivel de Fermi

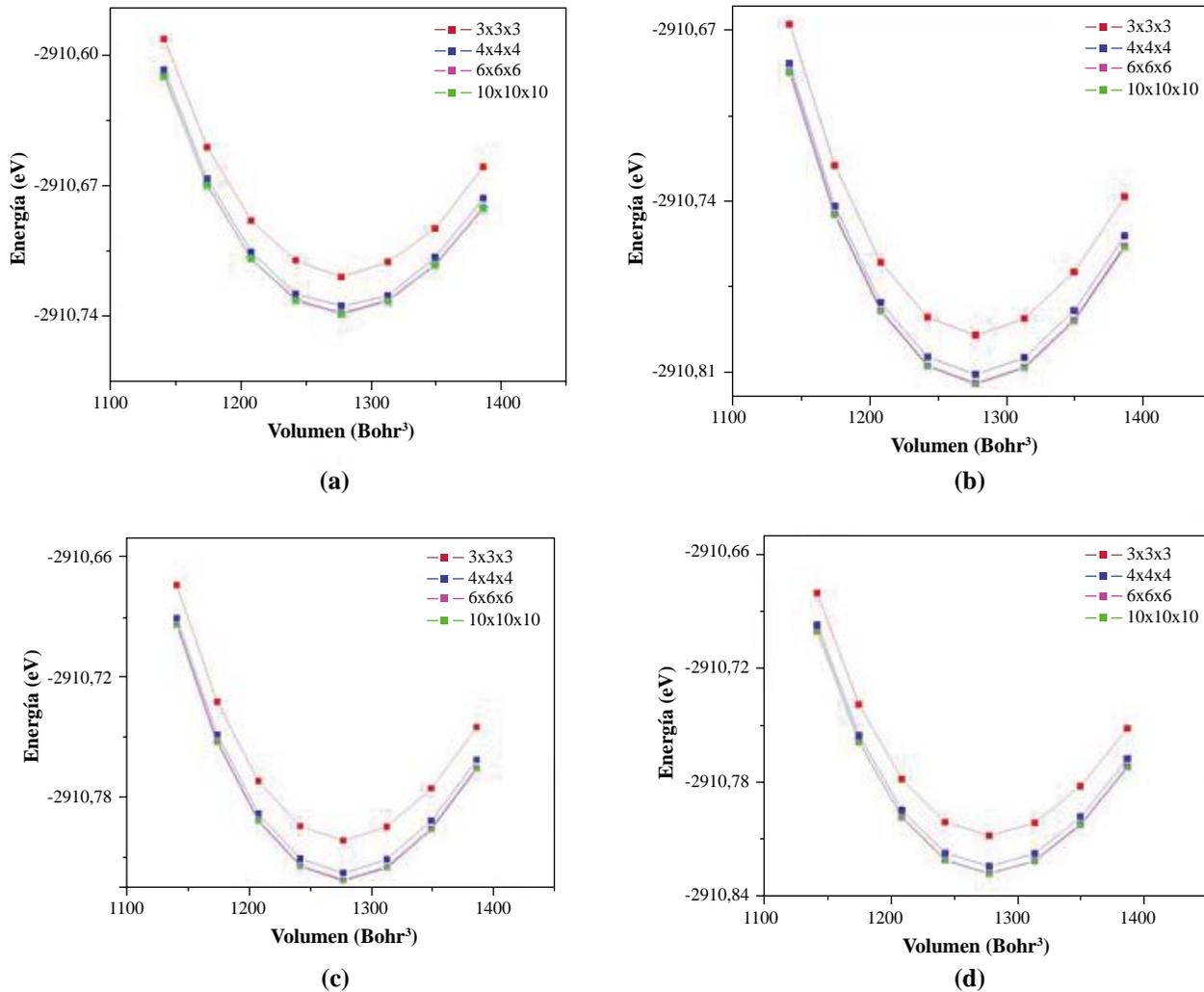


Figura 1. Energía Vs Volumen para el GaAs en su estructura zincblenda. Para una energía de corte de (a) 25 Ry, (b) 30 Ry, (c) 35 Ry y (d) 40 Ry.

Tabla 2. Constante de red, módulo de volumen, método de cálculo, porcentaje de error para el GaAs

a_0 (Å)	B_0 (GPa)	Método	% a_0 (Å)	% B_0 (GPa)
5,608 Ahmed, <i>et al.</i> (2007)	75,2 Ahmed, <i>et al.</i> (2007)	FP-LDA	0,94%	-18,94%
5,748 Ahmed, <i>et al.</i> (2007)	60,8 Ahmed, <i>et al.</i> (2007)	FP- GGA	-1,51%	0,24%
5,654 Hellwege, <i>et al.</i> (1982)	77,0 Hellwege, <i>et al.</i> (1982)	Experimento	0,12%	-20,84%
5,653 Fillipi, <i>et al.</i> (1994)	76,0 Fillipi, <i>et al.</i> (1994)	Experimento	0,14%	-19,80%
5,66*	60,95	Pseudopotenciales		

* Presente trabajo

y hasta -4 eV, la contribución de orbitales corresponde a orbitales 4p del Ga, 4p del As y 3d del Cr.

En la figura 3(b) se observan tres regiones por debajo del nivel de Fermi. La región más cerca al nivel de Fermi, entre -0.7 eV y -4 eV, tiene la mayor contribución en electrones 4p del As y 4p del Ga, la contribución de electrones 3d no es mayoritaria como en el caso de las bandas con spin up, se observa la presencia de un gap de energía.

Al analizar las gráficas de bandas de energía para el $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$ (gráficas 3 (a) y 4(a)), sustituyendo un átomo de Ga por uno de Cr en las estructuras 1x1x1 y 1x1x2 respectivamente, se confirma el comportamiento “half-metallic” del sistema.

En la figura 3(b) se observan tres regiones por debajo del nivel de Fermi. La región más cerca al nivel de Fermi, entre -0.7 eV y -4 eV, tiene la mayor contribución en electrones

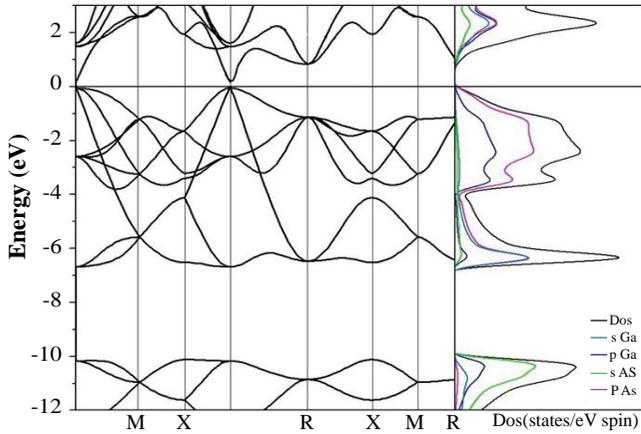


Figura 2. Bandas de energía para el GaAs 1x1x1

4p del As y 4p del Ga, la contribución de electrones 3d no es mayoritaria como en el caso de las bandas con spin up, se observa la presencia de un gap de energía

Al analizar las gráficas de bandas de energía para el $\text{Ga}_{1-x}\text{Cr}_x\text{As}$ ((gráficas 3 (a) y 4(a)), sustituyendo un átomo de Ga por uno de Cr en las estructuras 1x1x1 y 1x1x2 respectivamente, se confirma el comportamiento “half-metallic” del sistema.

Al hacer la sustitución de un átomo de Ga por uno de Cr en la supercelda 2x2x2, la concentración del dopante es de 0.03125. Al comparar las figuras 3, 4 y 5, se encuentra que la contribución de orbitales es similar para las estructuras 1x1x1, 1x1x2 y 2x2x2 como se ha descrito en párrafos anteriores, al sustituir un átomo de galio por uno de cromo, el compuesto presenta magnetización.

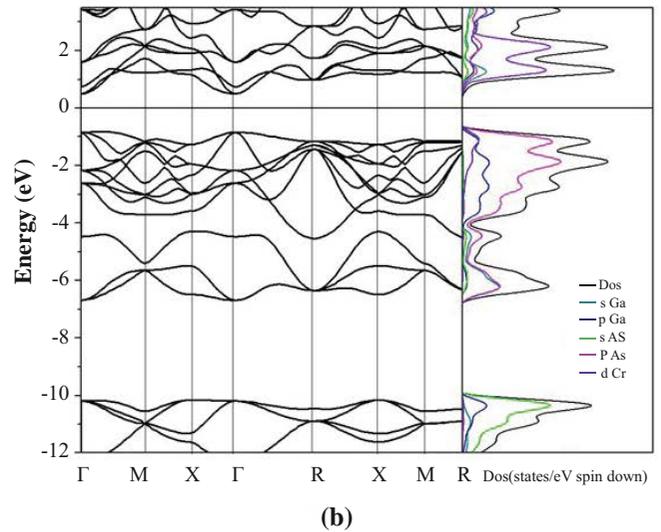
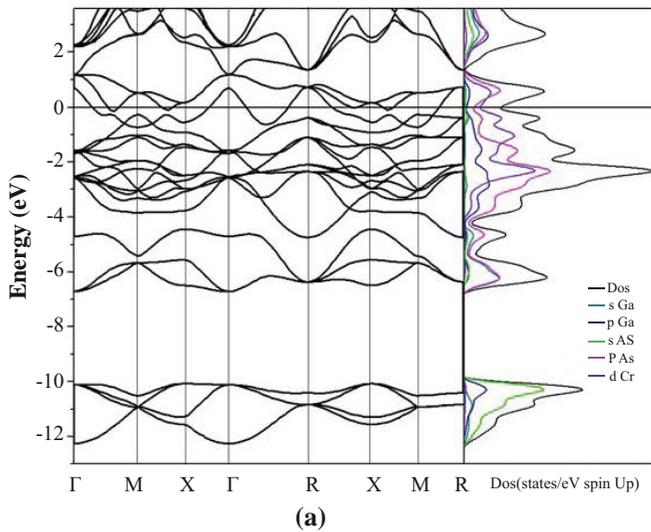


Figura 3. Bandas de energía para el GaAs 1x1x1 spin up (a) y spin down (b), al sustituir un átomo de Ga por uno de Cr.

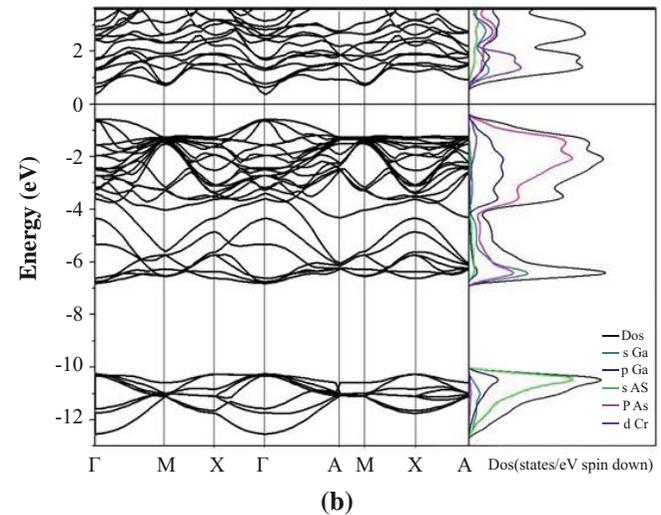
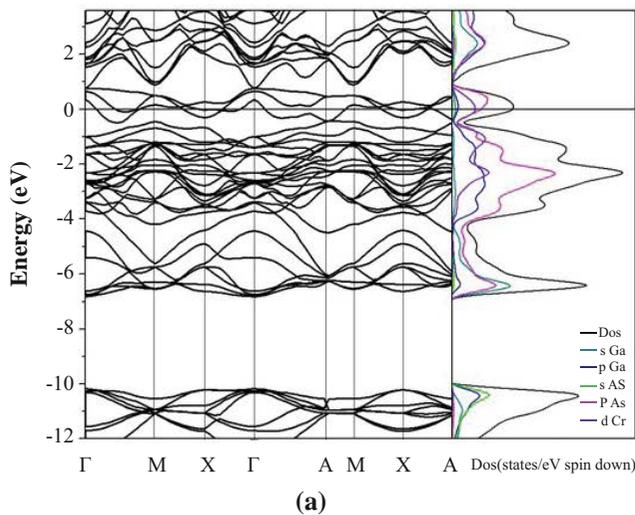


Figura 4. Bandas de energía para el GaAs 1x1x2 spin up (a) y spin down (b), reemplazando un átomo de Ga por uno de Cr.

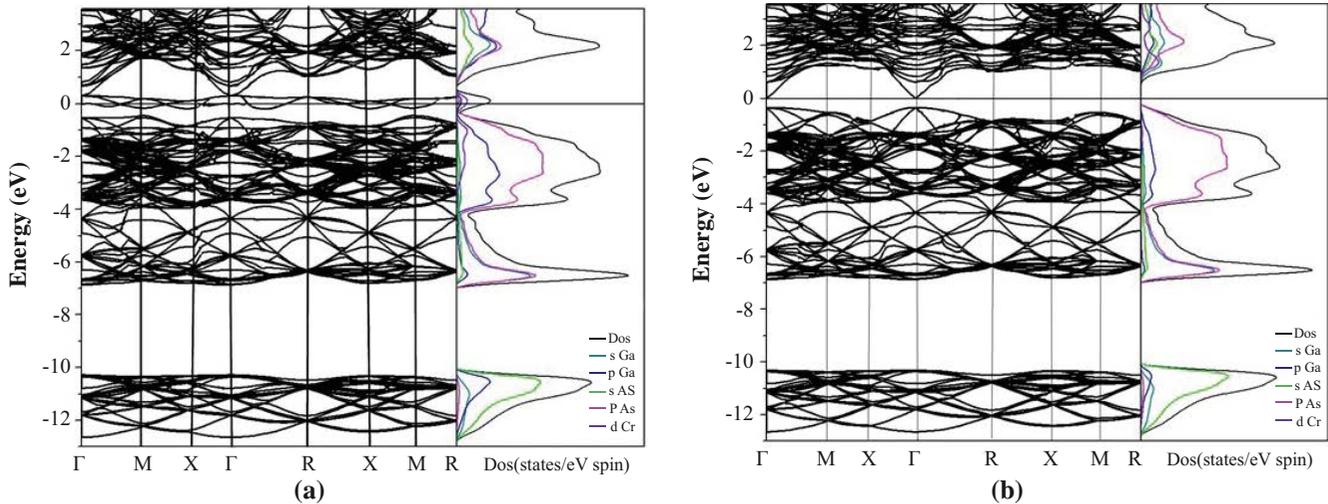


Figura 5. Bandas de energía para el GaAs 2x2x2 spin up (a), spin down, al hacer una sustitución de un átomo de Ga por uno de Cr.

En el tabla 3 se presenta la variación de la constante de red en función de la concentración, para las estructuras estudiadas.

Al hacer la sustitución de un átomo de Ga por uno de Cr, se encuentra que la constante de red no varía significativamente (analizando el caso en cada estructura), esto se debe a que la distribución de carga es similar para el átomo de Ga y el de Cr.

En el tabla 4 se presenta el momento magnético en $Ga_{1-x}Cr_xAs$, para las tres concentraciones trabajadas $x=0.25$, $x=0.125$ y $x=0.03125$. Se muestra el momento magnético de la impureza 3d, quien induce momento en los átomos vecinos de As. Igualmente se presenta el momento magnético total de la celda.

El momento magnético total en los casos presentados al hacer la sustitución de un átomo de Ga por uno de Cr en las estructuras consideradas es de 3 μB , independiente

Tabla 3. Constante de red para el GaAs con una concentración de Cr de 0.25, 0.125 y 0.03125, correspondientes a la estructura zincblenda, y a las superceldas 1x1x2 y 2x2x2 respectivamente.

Constante de Red	GaAs	GaAs Ga _{Cr}
a (Bohr) 1x1x1	10,99	10,97
a (Bohr) 1x1x2	10,98	10,99
a (Bohr) 2x2x2	10,98	11,00

Tabla 4. Momento magnético en $Ga_{1-x}Cr_xAs$. Las unidades del momento magnético son B.

		X=0,25	X=0,125	X=0,03125
(GaCr)As	Cr	3,45	3,46	3,55
	AS	-0,17	-0,15	-0,15
	Celda	3,00	3,00	3,00

de la concentración del dopante, esto está de acuerdo con lo reportado por **Sandratskii (Sandratskii & Bruno, 2003)**, y por **De-ming Ma (De-min Ma & Shi, 2016)**; la magnetización se presenta por la hibridación de los orbitales As-4p y Cr-3d.

Conclusiones

El GaAs en su estructura zincblenda, posee gap directo. Este hecho lo convierte en un material atractivo para su uso en celdas solares, heteroestructuras para emisores de luz, entre otros. Cerca al nivel de Fermi para este material se encuentra que la contribución electrónica corresponde a electrones 4p del As y 4p del Ga, y estando aun en el core, entre -4 eV y -7 eV la contribución corresponde a electrones 4p del As y 4s del Ga.

Dicho material no presenta magnetización. Al hacer la sustitución de un átomo de Ga por uno de Cr para diferentes concentraciones de dopante, el material presenta un comportamiento “half-metallic”, dicho material puede ser usado como un semiconductor magnético diluido, como inyector de espín, también es un material que se puede usar en aplicaciones en espintrónica.

La magnetización se presenta por la hibridación de orbitales As-4p y Cr-3d.

Contribución de los autores

NYMV, redactó los resultados del trabajo producto de la tesis de maestría, ajustó el texto de acuerdo con las recomendaciones del director y actualizó las referencias. JARM, llevó a cabo el análisis del compuesto $Ga_{1-x}Cr_xAs$, sus propiedades electrónicas, estructurales y magnéticas, redactó el artículo, revisó el texto e hizo las correcciones y ajustes.

Conflicto de intereses

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

Referencias

- Ahmed, R., Hashemifar, S. J., Akbarzadeh, H., Ahmed, M. & Aleem, F.** (2007). Ab initio study of structural and electronic properties of iii-arsenide binary compounds. Elsevier ScienceDirect.Computational Materials Science **39**, 580586.
- Baykov, V. I., Korzhavyi, P. A., Smirnova, E. A., Abrikosov, I. A. & Johansson, B.** (2007). Magnetic properties of 3d impurities in gaas. Journal of Magnetism and Magnetic Materials **310** (3): 2120-2122.
- De-min Ma, V. W. E.-I. L., Yong-yong Chai & Shi, W.** (2016). Electronic structure, magnetic and optical properties of c-doped GaAs using hybrid density functional. Computational Materials Science **113**: 75-79.
- Fillipi, B., Singh, D. & Umrigar, C.** (1994). Phys. Rev. B **50**: 14947.
- Giannozzi, P., Baroni, S., Bonini, N., Calandra, M., Car, R., Cavazzoni, C., Ceresoli, D., Chiarotti, G. L., Cococcioni, M., Dabo, I., Corso, A. D., de Gironcoli, S., Fabris, S., Fratesi, G., Gebauer, R., Gerstmann, U., Gougoussis, C., Kokalj, A., Lazzeri, M., Martin-Samos, L., Marzari, N., en Francesco Mauri, Mazzeo, R., Paolini, S., Pasquarello, A., Paulatto, L., Sbraccia, C., Scandolo, S., Sclauzero, G., Seitsonen, A. P., Smogunov, A., Umari, P. & Wentzcovitch, R. M.** (2009). Quantum espresso: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. Journal of Physics: Condensed Matter **39**, 395502, 19pp.
- Grivickas, P., McCluskey, M. D. & Gupta, Y. M.** (2009). Transformation of GaAs into an indirect l-band-gap semiconductor under uniaxial strain. Physical Review B **80**.
- He, L. & HaiMing, D.** (2008). Local electronic structure and magnetic properties of 3d transition metal doped GaAs. Sci China Ser G-Phys Mech Astron. **51** (5): 470-480.
- Hellwege, K., Madelung, O. & Börnstein, L.** (1982). New Series Group III, vol 17a.
- Ihm, J. & Joannopoulos, J. D.** (1981). Ground-state properties of gaas and alas. Physical Review B. **24** (8).
- J.P.Perdew, K.Burke & Emzerhof, M.** (1996). Phys Rev. Lett **77**: 3856.
- R.A.Groot, F.M.Mueller, Engen, P. & Buschow, K.** (1983). New class of materials: Half-metallic ferromagnets. Physical Review Letters **50** (25).
- Sandraskii, L. M. & Bruno, P.** (2003). Electronic structure, exchange interactions, and curie temperature in diluted III-V magnetic semiconductors: (GaCr)As, (GaMn)As, (GaFe)As. Physical Review B. **67**: 214402.
- Shirai, M.** (2001). Electronic and magnetic properties of 3d transition-metal-doped gaas. Physica E. **10**: 143-147.
- Sze, S. M. & Ng, K. K.** (2007). Physics of semiconductor devices. Third Edition. John Wiley and Sons.
- Wang, C. S. & Klein, B. M.** (1981). First principles electronic structure of Si, Ge, GaP, GaAs, ZnS and ZnSe. II optical properties. Phys. Rev. B. **24** (6): 3417-3429.

Numerical simulations of the formation of the Milky Way disk of satellites through the accretion of associations of dwarf galaxies

José Benavides Blanco^{1,2,*}, Rigoberto A. Casas-Miranda²

¹ Universidad Antonio Nariño, Bogotá, D.C., Colombia

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

Abstract

We present here the results of several numerical Newtonian N-body simulations of the accretion towards the Milky Way of associations of dwarf spheroidal galaxies with and without dark matter content. We generated the initial objects using ZENO and simulated an isolated environment where these associations fall towards the dark matter halo of the Milky Way using GADGET-2. In order to test if the disk of satellites of the Milky Way (DoS) could have been formed by that kind of accretions, we analyzed some characteristics of the final dwarf galaxies such as their distribution with respect to the disk of the Galaxy, their density profile, velocity dispersion and radial velocities. The associations were initially located at radial distances of 4, 2 y 1 Mpc from the center of the Milky Way, and the evolution of the system was simulated for 10 Gyr in each of the runs. We found that associations located at initial radial distances larger than 2 Mpc were not suitable because their time of infall was larger than a Hubble time, and that for the case of associations initially located at 1 Mpc from the center of the Milky Way, it is unlikely that, with the parameters used in this study, the satellites of the DoS could come from dark matter-free associations of dwarf galaxies, while it is possible that the DoS may have been formed by the infall of associations of dwarf galaxies embedded in dark matter haloes following parabolic orbits. However, the distances of the remnants at the final snapshot do not reproduce those reported in the literature for the satellites of the Milky Way. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Milky Way; Dwarf galaxies; Dark matter halo; Disk of satellites.

Simulaciones numéricas de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea a partir de la acreción de asociaciones de galaxias enanas

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de simulaciones numéricas newtonianas de N-cuerpos de la caída hacia el halo de materia oscura de la Vía Láctea de asociaciones de galaxias enanas esferoidales con materia oscura y sin ella. Se generaron las condiciones iniciales utilizando el programa ZENO y el GADGET-2 para simular un sistema aislado en donde estas asociaciones de enanas se precipitan hacia el halo de materia oscura de la Vía Láctea. Con el fin de evaluar la posibilidad de que el disco de satélites de la Vía Láctea hubiese tenido su origen en este tipo de procesos de acreción, se analizaron algunas características de las galaxias enanas finales, tales como la distribución en torno al disco de la galaxia, el perfil de densidad, la dispersión de velocidades y las velocidades radiales de las enanas. Las asociaciones se ubicaron a distancias radiales iniciales de 4, 2 y 1 Mpc del centro de la Vía Láctea y se dejó evolucionar el sistema durante 10 giga años en cada una de las simulaciones. Se encontró que las asociaciones ubicadas a distancias iniciales mayores o iguales a 2 Mpc no son apropiadas debido a que su tiempo de acreción es superior a un tiempo de Hubble. Para el caso de asociaciones ubicadas inicialmente a 1 Mpc del centro de la Vía Láctea, se encontró que no es posible que el disco de satélites se haya formado a partir de asociaciones libres de materia oscura, y que una estructura similar al disco de satélites se pudo haber formado mediante la acreción de asociaciones de galaxias enanas con materia oscura que cayeran al halo de la Vía Láctea siguiendo órbitas parabólicas. Sin embargo, las distancias de los remanentes al centro de la galaxia no reproducen aquellas reportadas en la literatura. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Vía Láctea; Galaxias enanas; Halo de materia oscura; Disco de satélites.

*Correspondencia:

José Benavides Blanco, joabenavidesbl@unal.edu.co, **Recibido:** 6 de diciembre de 2017, **Aceptado:** 1 de marzo de 2018

Editor: Diógenes Campos Romero

Introduction

Dwarf galaxies are small stellar structures with low surface brightness and low stellar content in relation to their total mass (Mateo, 1996); they are poor in metals since they are mostly composed of old stars (Da Costa, 1999). The importance of dwarf galaxies resides in that they are abundant in the local universe and constitute a fundamental tool to understand the formation processes and the evolution of larger galaxies given that, according to the model of hierarchical evolution, larger galaxies formed from mergers or accretion of smaller galaxies. Additionally, these dwarf galaxies are characterized by having low stellar masses, in the order of 10^7 to 10^8 solar masses (M_{\odot}), in relation to their total masses estimated from their mass-luminosity ratio. This lack of luminous mass has been interpreted so far by the existence of a dark matter halo of the order of 10^8 to 10^{10} M_{\odot} surrounding them (Mayer, 2010).

From the velocity dispersions in associations of dwarf galaxies, Tully, *et al.* (2006) concluded that their mass-to-light ratios exceed in order of magnitude the values for the globular clusters, which would indicate that a significant amount of dark matter dominates them. However, the high values of the mass-to-light ratios of dwarf spheroidal galaxies could be overestimated if we consider that these objects are not necessarily in virial equilibrium and could be considered as systems in quasi-equilibrium, so that the dwarfs would lack or have very little dark matter content (Casas, *et al.*, 2012). Studying the Milky Way dwarf satellites has great importance given the discrepancy between the predictions of the cold dark matter cosmological model (Λ CDM) and the observational data: the predicted number of satellite dwarf galaxies of the Milky Way is much higher (of the order of hundreds) than the one currently detected in the observations, which is barely of ~ 40 members (Klypin, *et al.*, 1999). Another important discrepancy has to do with the way these dwarf galaxies are distributed, which in the Λ CDM model should have an almost isotropic distribution around their host galaxy. However, from observations in the Milky Way, the galaxy of Andromeda, and, recently, the Centaurus A group (Müller, *et al.*, 2016; Tully, *et al.*, 2006), these dwarf galaxies present an inhomogeneous and anisotropic distribution (Metz, *et al.*, 2007), which corresponds to the Holmberg effect (Holmberg, 1969). The exploration of this phenomenon revealed that the satellite system associated to the Milky Way follows a spatial distribution mediated by a virtual plane called the disk of satellites (DoS) (Metz, *et al.*, 2008), more recently renamed as vast polar structure of satellites (VPOS), which includes other objects detected in the last decade such as the ultra-faint dwarf galaxies (UFDG) (Pawlowski, *et al.*, 2012). This disk structure, composed of satellite dwarf galaxies, lies in a geometric plane that forms an angle of approximately 88° with the plane of the galactic disk and has a galactocentric mean radius of hundreds of kiloparsec. Metz, *et al.* (2008) have shown that the CDM satellite orbital poles are fully

consistent with being drawn from a random distribution, while the MW satellite orbital poles indicate that the DoS of the Milky Way is rotationally supported, which probably indicates that the majority of them are of tidal origin rather than being dark matter-dominated structures. Metz, *et al.* (2009) investigated the selection bias introduced due to the limited sky coverage of the Sloan Digital Sky Survey (York, *et al.*, 2000). They found that the new Milky Way satellite galaxies follow closely the DoS defined by the more luminous dwarfs, thereby further emphasizing the statistical significance of this feature in the Galactic halo. Angus, *et al.* (2011) performed MOND N-body simulations of a Carina-like dSph orbiting the Milky Way and found that the simulated galaxies are stable, but that the tidal forces are not enough to artificially inflate their line-of-sight velocity dispersions. Bohórquez & Casas-Miranda (2016) found from N-body numerical simulations that a collision between two disk galaxies can recreate a structure like the DoS, but that the characteristics of the structures obtained are not similar to those reported in the literature. Casallas (2014) showed that the dynamical friction from the dark matter halo of the Milky Way is too weak, so that objects initially following circular orbits with initial radii ~ 1 Mpc cannot fall into the Milky Way during a Hubble time. Therefore, the issue about the origin and dynamics of the DoS or VPOS continues to be an open question in today's astrophysics, and constitutes one of the main motivations for the development of this work, since studying and understanding the formation models of the disk of satellites would allow to better address investigations on its origin, as well as the search for new objects that could belong to this structure. We present here the results of a set of numerical N-Body simulations for the infall of an association of dwarf galaxies towards the Milky Way following parabolic orbits. Some preliminary parts of the research work shown in this paper have been published in proceedings (Benavides & Casas Miranda, 2017; Benavides & Casas-Miranda, 2018). More details about this work can be found in the Master's thesis of Benavides, (2015).

Methodology

Generation of objects and interaction environment. Metz, *et al.* (2009) considered the possibility that the dwarf galaxies that make up the satellite disk had precipitated into the Milky Way halo in associations rather than in an individual way, so that the spatial distribution exhibited by this structure is directly related with the infall direction of these associations. In this work, we considered a model in which the dwarf galaxies grouped in associations and located in regions peripheral to the Local Group were precipitated by gravitational interaction towards the dark matter halo of the Milky Way following a parabolic orbit, taking into account the interaction of the dwarfs with the halo of the host galaxy, the interaction between them, and the evolution of their spatial distribution during the infall. For

this, we performed a set of Newtonian N-Body numerical simulations. We used the ZENO code package (Barnes, 2018) from the Institute for Astronomy of the University of Hawaii, to generate the astrophysical objects, and the GADGET software (Springel, 2005) to simulate the gravitational interactions.

Since the dwarf galaxies that are part of the disk of satellites of the Milky Way are mostly of the spheroidal type (Da Costa, 1999; Tully, *et al.*, 2006), we modeled them as bodies with spherical symmetry specifically using the Plummer profile (Plummer, 1911), the Hernquist profile (Hernquist, 1990) and the NFW profile (Navarro, *et al.*, 1996).

The stellar component of the dwarf galaxies was modeled using a Plummer profile with a radial gravitational potential of the form:

$$\phi_P(r) = \frac{3M}{4\pi b^3} \left(1 + \frac{r^2}{b^2}\right)^{-\frac{5}{2}} \quad (1),$$

where r is the radial distance from the center, b is the Plummer radius and M is the total mass.

To model the dark matter haloes we used a spherical Hernquist profile, whose potential is:

$$\phi_P(r) = -\frac{GM}{r+a} \quad (2),$$

where G is the Cavendish constant, M is the total mass and a is a parameter that depends on the scaling length r_s and the concentration c of the Navarro-Frenk-White profile of the dark matter halo (Springel, *et al.*, 2005):

$$a = r_s \sqrt{2 \left[\ln(1+c) - \frac{c}{1+c} \right]} \quad (3).$$

We used the stellar mass and dark matter halo parameter values following Sawala (2011), and Plummer's radius and softening length following Casas, *et al.* (2012) (Table 1).

Since the presence of dark matter in the dwarf spheroidal galaxies (dSphs) of the Milky Way is still under debate, we performed our simulations with initial dwarfs both with and without a dark matter halo to study the possible differences in the final distribution and structure of the remnant objects.

We simulated the host galaxy by an object resembling the Milky Way and its main features and components: Central spheroid, stellar disk and dark matter halo, the latter being the one that would bring the largest interaction with the group of dwarf galaxies due to its contribution in mass and size.

For the model of the disk we used an exponential density profile of the form (Springel & White, 1998):

$$\rho(R, z) = \frac{M_d}{4\pi z_0 R_d^2} \exp\left(-\frac{R}{R_d}\right) \operatorname{sech}^2\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4),$$

where R and z are the cylindrical coordinates, M_d is the mass of the disk, R_d is the radial scale length, and z_0 is the vertical scale length.

For the central spheroid and the dark matter halo, we used a spherical Hernquist profile. The parameters used are presented in Table 2.

Before simulating the gravitational interaction between the initial dwarfs and the host galaxy, they were simulated separately only under their self-gravity to eliminate spurious numerical effects caused at the numerical generation of each object (virialization).

Once we constructed and virialized each of the objects, we generated the initial environment for the infall of the associations in which the Milky Way is located at the origin of coordinates, with its disk on the xy plane and the association initially moving perpendicular to the plane of the disk on the xz plane (Figure 1). We constructed the initial association by locating a copy of the virialized dwarf galaxy at the center of the six faces of a cube with a few kiloparsec edges. Thus, the dwarfs initially orbited around the center of mass of the association, which is the geometric center of the cube, with velocities chosen to avoid collapse. We used six dwarfs to keep the arrangement as simple as possible and to have a spatial symmetry. In our simulations, the dwarfs in the association interacted gravitationally with each other. We performed the simulations taking initial distances of 4 Mpc, 2 Mpc and 1 Mpc for the associations (taking into account the distances at which the peripheral associations in filament 14 are with respect to the center of the Local Group), a size of the group of 100 kpc, and a velocity dispersion of 15.5 km/s.

Table 1. Assigned values for the model of a dwarf spheroidal galaxy with a Plummer profile and a dark matter halo following a Hernquist profile

Parameter	Value
Stellar mass	$1.0 \times 10^7 M_\odot$
Plummer radius	0.3 kpc
Halo mass	$9.22 \times 10^8 M_\odot$
Scale length of the halo	0.585
Softening length	0.007 kpc

Table 2. Values assigned to the model of a disk galaxy with the characteristics of the Milky Way, which conform to those presented by Metz, *et al.* (2009)

Parameter	Symbol	Value
Mass of the bulge	M_b	$5 \times 10^9 M_\odot$
Radial scale length of the bulge	a_b	0.3 kpc
Mass of the disc	M_d	$5 \times 10^{10} M_\odot$
Radial scale length of the disc	R_d	3.0 kpc
Vertical scale length of the disc	z_0	1 kpc
Mass of the dark matter halo	M_h	$1 \times 10^{12} M_\odot$
Scale length of the halo	a_h	12.96 kpc

Results and discussion

Virialization of the initial objects. Figure 2 shows the results of the virialization of the dark matter-free dwarf galaxy with initial conditions generated in GADEGT-2. The final snapshot of the simulation can be seen to the left of the figure, preserving its spherical shape after 2 Gyr; on the right, the energy curves are shown as a function of time. Total kinetic energy (green), total potential energy (red), and the sum of kinetic and potential energies (blue) show that the structure is in virial equilibrium.

Figure 3 shows the results of the virialization of the dwarf galaxy surrounded by a halo of dark matter with initial conditions generated using ZENO. The final snapshot of the simulation (green) + halo (red) can be seen the left, with

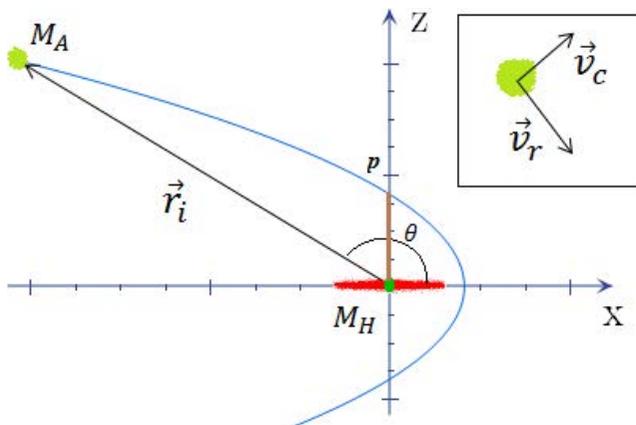


Figure 1. Scheme of the kinematic model of the association (green color and located in M_A) in its fall towards the Milky Way (with the disk of the galaxy in red and the spheroid in green, located in M_H) following a parabolic orbit. The Milky Way is located at the origin of coordinates and the center of mass of the association of dwarfs in. The brown segment indicates the location of the impact parameter p .

virial radius dimensions according to the calculated values; the curves of the halo + spheroid energies can be seen to the right: total kinetic energy (green), total potential energy (red) and the sum of kinetic and total potential energies (blue), which also show that the structure is virialized as in the case of the dark matter-free dwarf galaxy in Figure 2.

Figure 4 shows the result of the virialization simulation of a disk galaxy with characteristics similar to those of the Milky Way. The figure on the right shows the kinetic energy (green), potential energy (red) and total energy (blue) as functions of time. The leftmost panel shows the virialized disk and bulge projected on the xy plane, while the central panel shows the virialized dark matter halo and the disk projected on the xz plane. It can be noticed that, after initial large energy exchanges, the objects are stable, i.e., virialized.

Infall of associations located initially at 4 and 2 Mpc.

We performed simulations for the infall of associations with initial galactocentric distances of 2 and 4 Mpc following parabolic orbits, and found that these associations would need more than a Hubble time to fall into the halo of the Milky Way and, therefore, to start orbiting it. Thus, it is very unlikely that associations located farther than ~ 1 Mpc could have originated the DoS of the Milky Way. The following results are for associations initially located at 1 Mpc from the center of the Milky Way.

Infall of associations of dark matter-free dwarf galaxies. To calculate the initial orbital conditions of the center of mass of the dwarfs making up the association, we took the angle θ as the parameter to obtain an impact parameter p of the order of half the radius of the halo of dark matter of the Way Milky. We calculated the initial velocities for the established orbit from the value obtained for the impact parameter and the masses of the objects (association + Milky Way). The dwarf galaxies interacted gravitationally with each other and with the potential of the Milky Way during the whole simulation. We used an initial angle of 150°

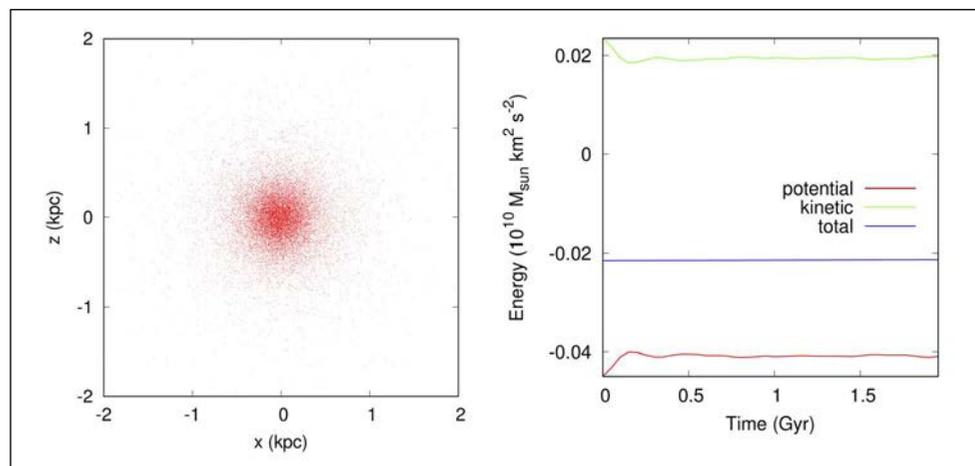


Figure 2. Results obtained from the virialization of the initial conditions for a dark matter-free dwarf galaxy. To the left, the snapshot of the virialized spheroidal structure. To the right, the energy curves in units of GADGET-2 as a function of time

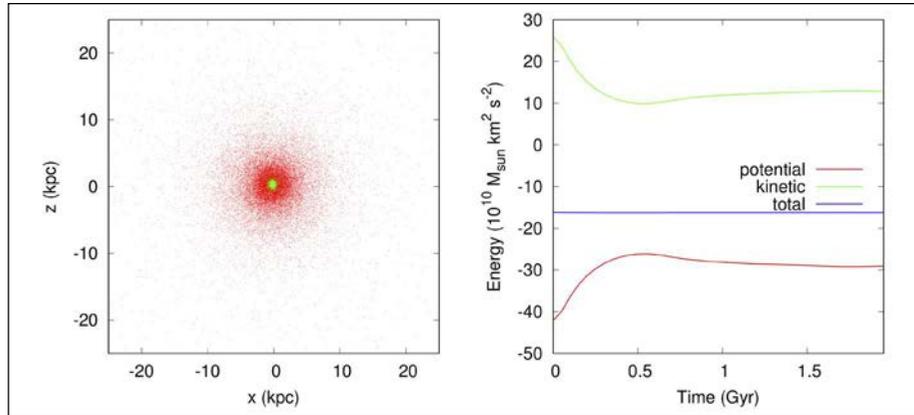


Figure 3. Results obtained from the virialization of a dwarf galaxy wrapped in a halo of dark matter with initial conditions generated with ZENO and virialized with GADGET-2. Left: Snapshot of the virialized stellar content of the dwarf spheroidal structure (green) and its extended halo of dark matter (red). Right: The curves of energies in units of GADGET as a function of time (Benavides & Casas-Miranda, 2018)

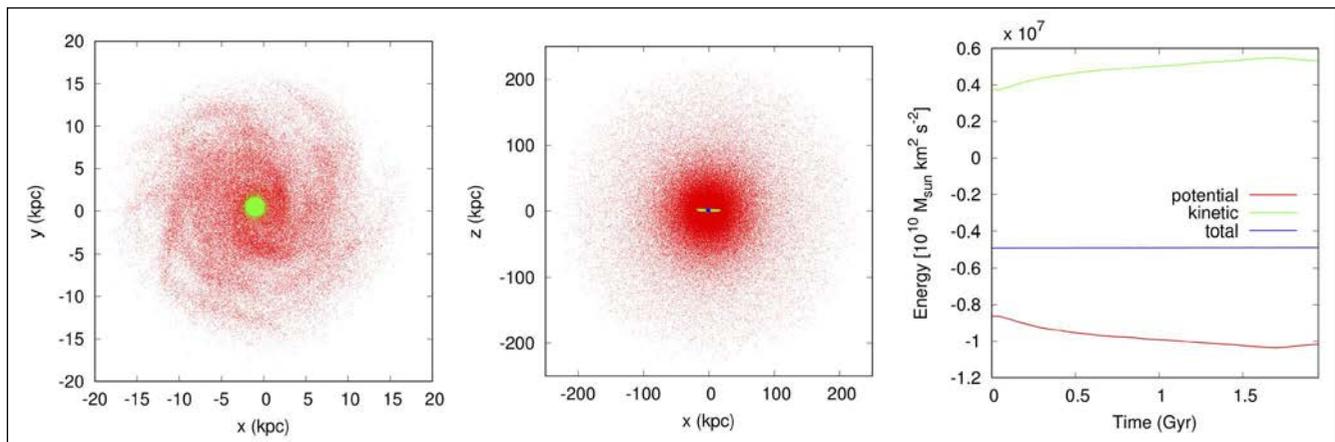


Figure 4. Results of the virialization of a disk galaxy with the properties of the Milky Way. The leftmost panel shows the disk (red) and the spheroid (green); the central panel shows the whole galaxy (red: dark halo, green: disk, blue: spheroid). To the right, we can see the energy as a function of time.

and an impact parameter of 134 kpc. Figure 5 shows the final snapshot of a simulation with an initial galactocentric distance of the association of 1 Mpc. From the figure, we can conclude that the remnant dwarfs are not located on a plane-like structure since both the positions projected on the xy and the yz planes show a very scattered pattern.

Figure 6 shows that the dwarf objects remained compact and the apparent dispersion of particles in the final snapshot was due to a resolution issue of the image and not to a significant loss of particles or deformation by tidal forces. Thus, these dark matter-free dwarf galaxies do not reproduce some intrinsic properties of the observed dSphs of the Milky Way such as their mass-to-light ratio, internal velocity dispersions and luminosity profiles. Table 3 shows the location of the dwarfs and their velocity dispersions. In addition, with those initial conditions none of the dwarfs managed to complete a closed orbit during the simulation time (10 Gyr), which is an unfavorable fact because some of

the DoS dwarfs are considered to have completed 2 to 3 full orbits (Law, *et al.*, 2005; Lokas, *et al.*, 2013).

Therefore, the associations of dark matter-free dwarf galaxies initially located at 1 Mpc from the center of the Milky Way following the parabolic orbit simulated in this work cannot have given origin to the disk of satellites of the Milky Way.

Infall of associations of dwarf galaxies with a dark matter halo. Figure 7 shows the final snapshot of a simulation with an initial galactocentric distance of 1 Mpc, an initial angle of 150° and an impact parameter of 134 kpc. In this case, each of the stellar structures is embedded in a dark matter halo. In the figure we can see that the positions of the dwarfs projected on the xz plane are scattered over a large region, while the positions projected on the yz plane lie on a very narrow region. Therefore, it can be concluded that the remnants of the initial dwarf galaxies lie on a plane that is nearly perpendicular to the plane of the galactic disk (xy plane).

Comparing Figure 6 and Figure 8 we can see that when the dwarf galaxies contain dark matter they remain more compact than when they are free of dark matter.

Table 4 shows the location of the dwarfs and their velocity dispersions. We can see that these properties are consistent with those observed in the dwarfs of the disk

of satellites of the Milky Way, presenting a distribution perpendicular to the plane of the galactic disc, although less dispersed than in the case of dark matter-free dwarfs. In addition, their radial distances are greater than the 300 kpc at which most of the dwarf galaxies of the disk of satellites are found.

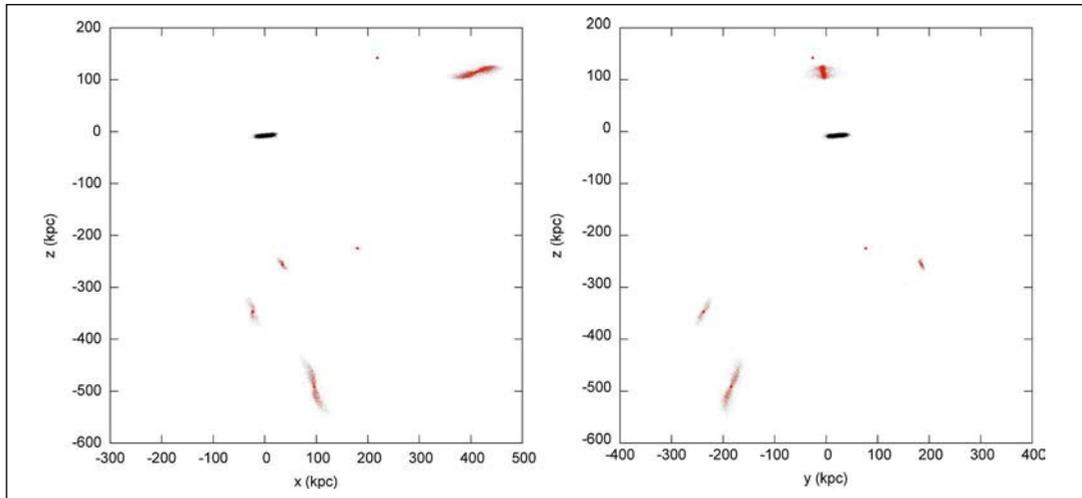


Figure 5. Final snapshot of a simulation with an initial galactocentric distance of the association of 1 Mpc, an initial angle of 150° and an impact parameter of 134 kpc. In red: Remnants of the dwarf objects. In black: the Milky Way's disk.

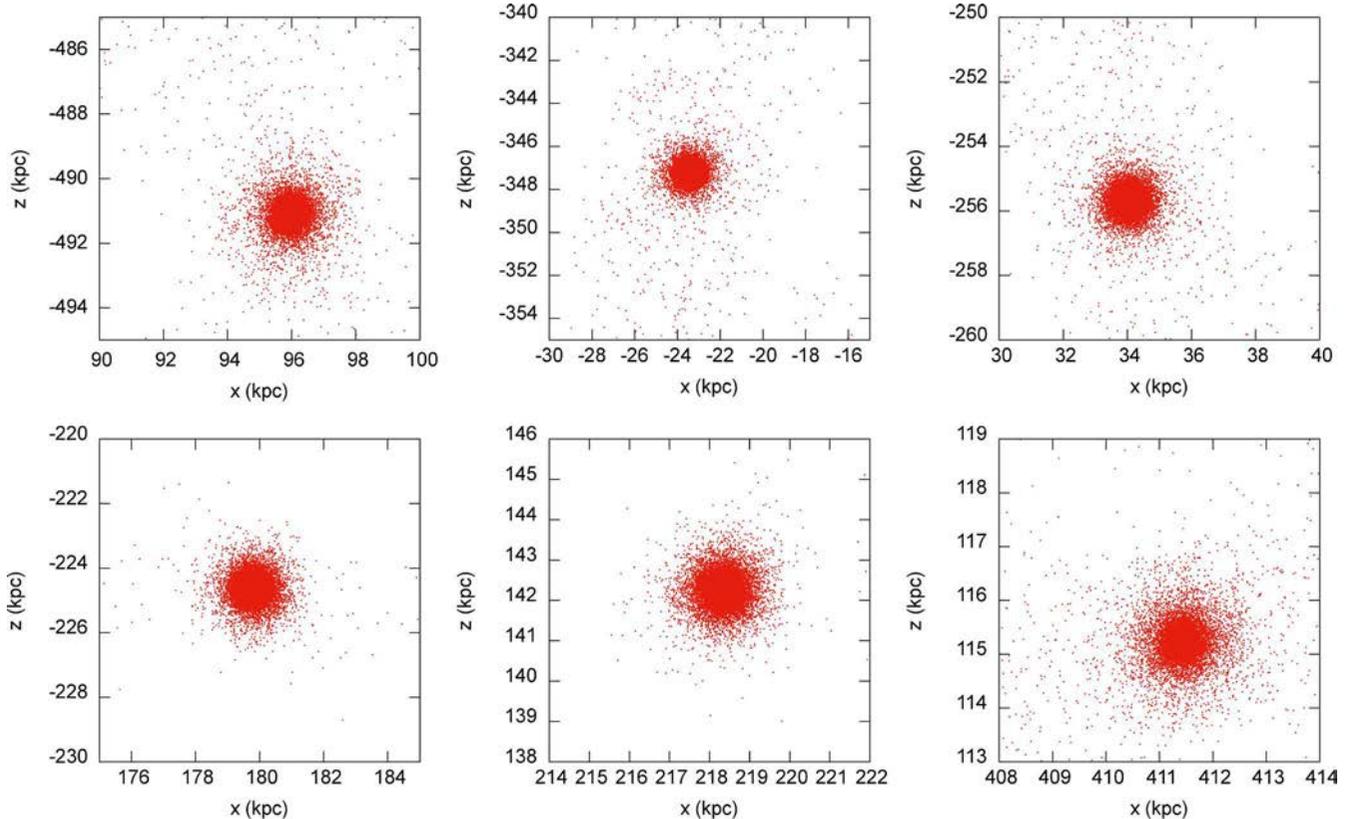
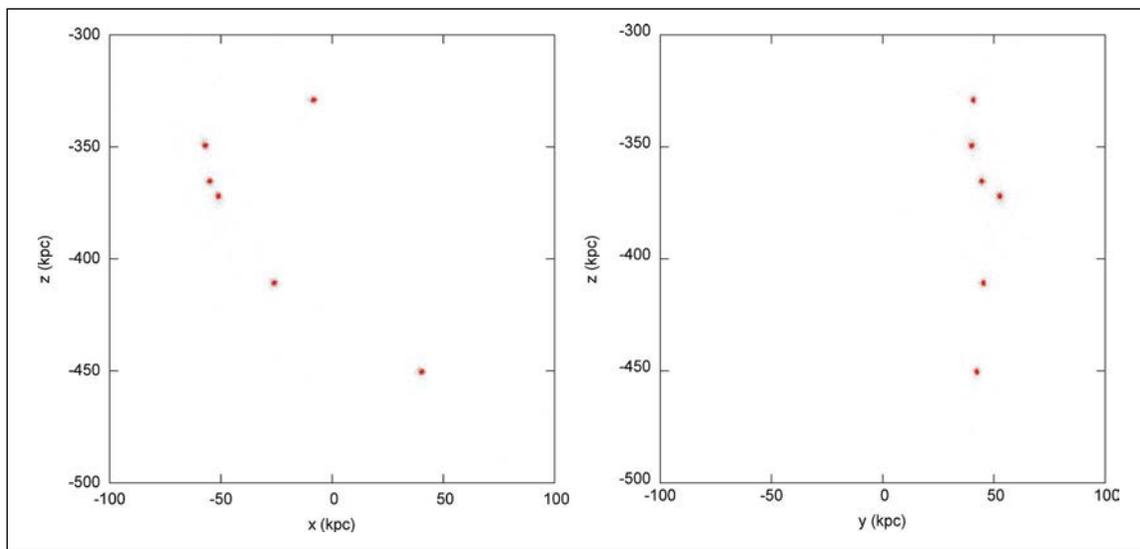


Figure 6. Zoom in of the remaining structures after the infall of an association of six dwarf galaxies candidate to be the progenitor of the disk of satellites of the Milky Way, projected on the xz plane.

Table 3. Results obtained for the kinematic properties of the association of dwarf galaxies that falls into the halo of the Milky Way from an initial distance of 1 Mpc

	Galactocentric distance (kpc)	Heliocentric distance (kpc)	Velocity dispersion (km/s)	Radial speed (km/s)
Dwarf 1	286.60	288.26	3.87	104.25
Dwarf 2	267.97	266.67	3.86	1.89
Dwarf 3	299.02	303.47	3.98	155.85
Dwarf 4	534.17	531.14	6.03	128.22
Dwarf 5	428.31	423.51	4.19	138.78
Dwarf 6	428.96	428.53	8.81	128.50
Average	374.17	373.60	5.12	131.12

**Figure 7.** Final snapshot of a simulation with an initial galactocentric distance of the association of 1 Mpc, an initial angle of 150° , and an impact parameter of 134 kpc. Each dwarf galaxy is embedded in a dark matter halo (not plotted). The remnants of the stellar components of the dwarf objects are plotted in red.

Conclusions

Regarding the formation of the disk of satellites of the Milky Way, we discarded associations of dwarf galaxies initially located at distances equal or greater than 2 Mpc because their time of infall was larger than a Hubble time. We can also state that associations of peripheral galaxies located at these distances from the Local Group cannot be considered as objects that could be part of the disk of satellites in the future.

As for the morphology of the dwarf galaxies, after 10 Gyr of interaction with the Milky Way we observed that if they are surrounded by a dark matter halo they remain more compact despite the effects of tidal forces, which supports the hypothesis of the presence of dark matter in dwarf galaxies.

In terms of the location distances of the simulated dwarf galaxies around the Milky Way, we can conclude that the distances at which they were located were better adjusted to the dark matter-free model for the dwarf satellites, since

most of the galaxies are at galactocentric distances ranging between 280 kpc and 500 kpc and, in that case, the formation of a disk of satellites could not be reproduced in the present study. Thus, with the parameters used in this study it is unlikely that the satellites of the DoS come from dark matter-free associations of dwarf galaxies that fall into the Milky Way halo.

On the other hand, we were able to reproduce a disk-like spatial distribution of the remnants of the initial objects when embedded in a dark matter halo, which supports the widely accepted hypothesis about dark matter content in dwarf galaxies. Thus, we have shown that it is possible that a feature like the DoS could have been formed from the infall of associations of dwarf galaxies embedded in dark matter haloes following parabolic orbits. However, the distances of the remnants to the center of the Milky Way at the final snapshot do not reproduce the distances reported in the literature for the satellites of the Milky Way.

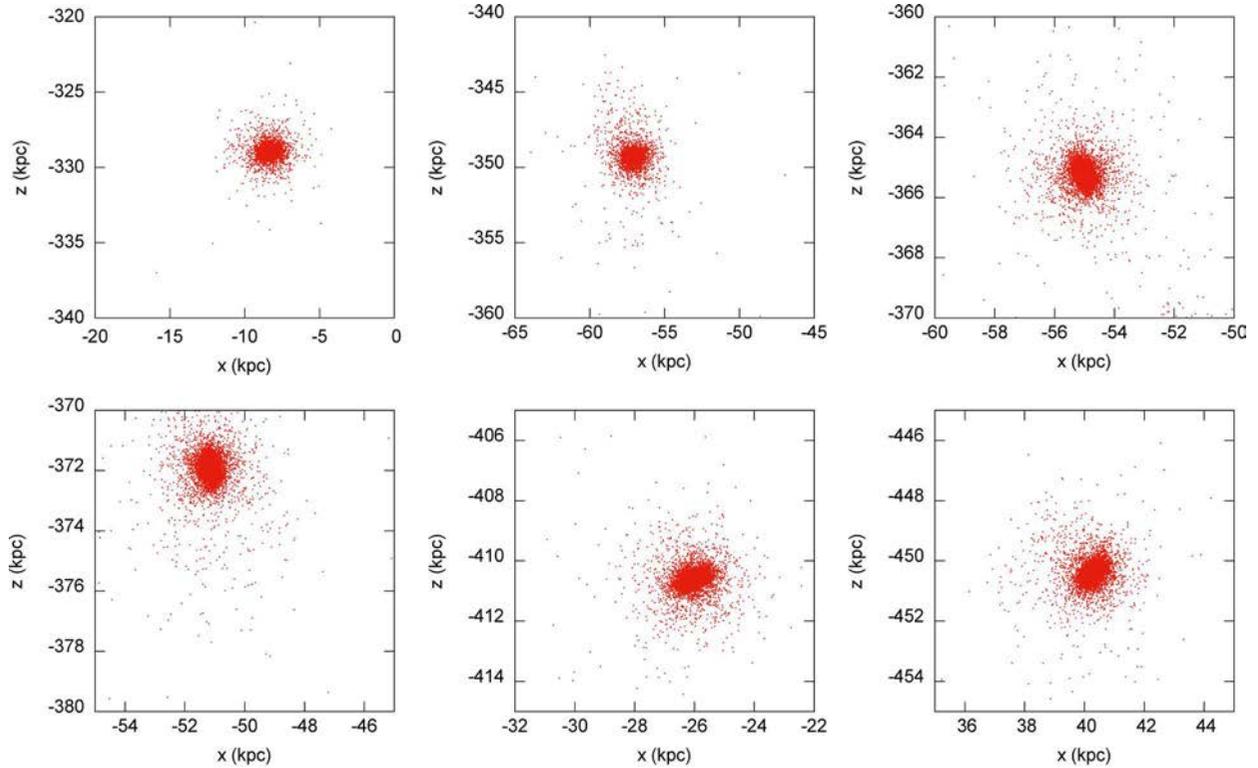


Figure 8. Zoom in for the set of six dwarf galaxies wrapped in a halo of dark matter after 10 Gyr of infall towards the halo of the Milky Way from an initial distance of 1 Mpc, projected on the xz plane.

Table 4. Results obtained for the kinematic properties of the association of dwarf galaxies with a dark matter halo falling towards the Milky Way from an initial distance of 1 Mpc

	Galactocentric distance (kpc)	Heliocentric distance (kpc)	Velocity dispersion (km/s)	Radial speed (km/s)
Dwarf 1	327.40	327.97	5.41	146.41
Dwarf 2	409.80	410.34	5.77	119.47
Dwarf 3	351.71	352.21	5.57	126.06
Dwarf 4	374.08	374.82	6.58	132.01
Dwarf 5	450.93	451.37	6.10	149.28
Dwarf 6	367.35	367.93	6.41	143.15
Average	380.21	380.77	5.97	136.06

This discrepancy could be solved with a larger simulation time, and by selecting the final time of the simulation as that one in which the distances of the simulated objects are close to the observational ones, as well as by fine-tuning some quantities like the initial dark matter content of the association, the number of complete orbits the satellites should have done, the velocity dispersions and their circular velocities around the Milky Way.

Acknowledgements

JBB acknowledges financial support from *Colciencias* and the *Universidad Nacional de Colombia* through the

program *Jóvenes Investigadores*, round No. 617 of 2013, Hermes project Nr. 21152. We thank the members of the Astrophysics group and our anonymous referees for their useful comments.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding the contents of the paper.

Authors contribution

José Benavides developed the theoretical formalism and performed the numerical simulations. Both José Benavides

and Rigoberto Casas worked on the analysis of the simulations and contributed to the final version of the manuscript. Rigoberto Casas supervised the research project.

References

- Angus, G. W., Diaferio, A., Kroupa, P.** (2011). Using dwarf satellite proper motions to determine their origin. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **416** (2): 1401-1409. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.19138.x>
- Barnes, J. E.** (2018). ZENO. World-wide electronic publication, Institute for Astronomy, University of Hawaii, Hawaii. Available at <http://www.ifa.hawaii.edu/~barnes/software.html>, accessed between January and March 2018.
- Benavides, J. & Casas Miranda, R. A.** (2017). Fall of associations of dwarf galaxies into the Milky Way halo. In M. A. Higuera Garzón & S. Vargas Domínguez (Eds.), XV Latin American Regional IAU Meeting Cartagena 2016. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*. **49**: 174.
- Benavides, J.** (2015). Simulaciones numéricas de la caída de asociaciones de galaxias enanas al halo de la Vía Láctea (Master's thesis). Universidad Nacional de Colombia.
- Benavides, J. & Casas-Miranda, R. A.** (2018). Infall of Associations of Dwarf Galaxies into the Milky Way Halo. In A. García-Varela, K. Vieira, R. A. Méndez, C. Allen, W. van Altena, & M. Altmann (Eds.), VII Reunión de Astronomía Dinámica en Latinoamérica (ADeLA 2016). *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)*. **50**: 13-14.
- Bohórquez, O. & Casas-Miranda, R.** (2016). Origin of the Milky Way Disk of Satellites: Collision of Two Disk Galaxies. *Tecciencia*. **11** (21): 33-37. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2016.21.6>
- Casallas, A.** (2014). Estudio de la formación del disco de satélites de la Vía Láctea (DoS) como un grupo de progenitores que entra al halo de la galaxia (Master's thesis). Universidad Nacional de Colombia.
- Casas, R. A., Arias, V., Peña-Ramírez, K., Kroupa, P.** (2012). Dwarf spheroidal satellites of the Milky Way from dark matter free tidal dwarf galaxy progenitors: Maps of orbits. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **424** (3): 1941-1951. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21319.x>
- Da Costa, G. S.** (1999). The Dwarf Spheroidal Galaxies in the Galactic Halo. In B. K. Gibson, R. S. Axelrod, & M. E. Putman (Eds.). *The Third Stromlo Symposium: The Galactic Halo* (Vol. 165, p. 153). Retrieved from <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9901258>
- Hernquist, L.** (1990). An analytical model for spherical galaxies and bulges. *The Astrophysical Journal*. **356**: 359. <https://doi.org/10.1086/168845>
- Holmberg, E.** (1969). A study of physical groups of galaxies. *Arkiv for Astronomi*, **5**: 305-343.
- Klypin, A., Kravtsov, A. V., Valenzuela, O., Prada, F.** (1999). Where Are the Missing Galactic Satellites? *The Astrophysical Journal*. **522** (1): 82-92. <https://doi.org/10.1086/307643>
- Law, D. R., Johnston, K. V., Majewski, S. R.** (2005). A Two Micron All-Sky Survey View of the Sagittarius Dwarf Galaxy. IV. Modeling the Sagittarius Tidal Tails. *The Astrophysical Journal*. **619** (2): 807-823. <https://doi.org/10.1086/426779>
- Lokas, E. L., Gajda, G., Kazantzidis, S.** (2013). Tidal tails of dwarf galaxies on different orbits around the Milky Way. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **433** (1): 878-888. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt774>
- Mateo, M.** (1996). Dwarf Spheroidal Galaxies and the Formation of the Galactic Halo. In H. L. Morrison & A. Sarajedini (Eds.). *Formation of the Galactic Halo...Inside and Out*. (Vol. 92, p. 434).
- Mayer, L.** (2010). Environmental Mechanisms Shaping the Nature of Dwarf Spheroidal Galaxies: The View of Computer Simulations. *Advances in Astronomy*. **2010**: 1-21. <https://doi.org/10.1155/2010/278434>
- Metz, M., Kroupa, P., Jerjen, H.** (2007). The spatial distribution of the Milky Way and Andromeda satellite galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **374** (3): 1125-1145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.11228.x>
- Metz, M., Kroupa, P., Jerjen, H.** (2009). Discs of satellites: The new dwarf spheroidals. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **394** (4): 2223-2228. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14489.x>
- Metz, M., Kroupa, P., Libeskind, N. I.** (2008). The Orbital Poles of Milky Way Satellite Galaxies: A Rotationally Supported Disk of Satellites. *The Astrophysical Journal*. **680** (1): 287-294. <https://doi.org/10.1086/587833>
- Metz, M., Kroupa, P., Theis, C., Hensler, G., Jerjen, H.** (2009). Did the Milky Way Dwarf Satellites Enter the Halo As a Group? *The Astrophysical Journal*. **697** (1): 269-274. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/697/1/269>
- Müller, O., Jerjen, H., Pawlowski, M. S., Binggeli, B.** (2016). Testing the two planes of satellites in the Centaurus Group. *A&A*. **595** (2015): 1-10. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629298>
- Navarro, J. F., Frenk, C. S., White, S. D. M.** (1996). A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering. *The Astrophysical Journal*. **490** (2): 493-508. <https://doi.org/10.1086/304888>
- Pawlowski, M. S., Pflamm-Altenburg, J., Kroupa, P.** (2012). The VPOS: A vast polar structure of satellite galaxies, globular clusters and streams around the Milky Way. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **423** (2): 1109-1126. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20937.x>
- Plummer, H. C.** (1911). On the Problem of Distribution in Globular Star Clusters: (Plate 8.). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **71** (5): 460-470. <https://doi.org/10.1093/mnras/71.5.460>
- Sawala, T.** (2011). Simulations of Dwarf Galaxy Formation (PhD thesis). Ludwig-Maximilians-Universität München. Retrieved from: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-132531>
- Springel, V.** (2005). The cosmological simulation code gadget-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **364** (4): 1105-1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09655.x>
- Springel, V., Di Matteo, T., Hernquist, L.** (2005). Modelling feedback from stars and black holes in galaxy mergers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. **361** (3): 776-794. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09238.x>
- Springel, V., White, S. D. M.** (1998). Tidal tails in CDM cosmologies. *MNRAS*. **307**: 162-178. <https://doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02613.x>
- Tully, R. B., Rizzi, L., Dolphin, A. E., Karachentsev, I. D., Karachentseva, V. E., Makarov, D. I., ... Shaya, E. J.** (2006). Associations of Dwarf Galaxies. *The Astronomical Journal*. **132** (2): 729-748. <https://doi.org/10.1086/505466>
- York, D. G., Adelman, J., Anderson, Jr., J. E., Anderson, S. F., Annis, J., Bahcall, N. A., ... Yasuda, N.** (2000). The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary. *The Astronomical Journal*. **120** (3): 1579-1587. <https://doi.org/10.1086/301513>

Experimental study of nanobubbles in salt solutions

Carlos Andrés Sjogreen^{1*}, David A. Landínez Téllez¹, Jaiver Eduardo Rosas Pérez^{2,3},
Paulo César Plazas Hurtado¹, Jairo Roa-Rojas¹

¹ Grupo de Física de Nuevos Materiales, Departamento de Física,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

² Grupo de Síntesis y Aplicación de Moléculas Peptídicas, Departamento de Farmacia,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

³ Grupo de Sistemas para Liberación Controlada de Moléculas Biológicamente Activas,
Departamento de Farmacia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C., Colombia

Abstract

The characterization of oxygen nanobubbles in NaCl solutions has been performed in order to study the variation of their size, concentration, pH, temperature and aggregation levels, through oxygen saturation and cavitation processes for different times. The nanobubbles were produced by the injection of oxygen by rotation to the saline solution in a diffusive medium, at constant temperature, in the way of searching for a solution with homogeneous distribution. The solution finally obtained was subjected to several tests at different times to observe changes in the nanobubbles. The size characterization of nanobubbles in the solution was performed using the dynamic light scattering technique. The concentration of the solution was determined by a semi-quantitative process taking into account the concentration of standard particles and the counting rate per second of the device. Potential ζ was measured in order to establish the aggregation and stability levels of the nanobubbles at different temperatures and pHs. At a temperature $T=4\text{ }^{\circ}\text{C}$ the diameter of the nanobubbles remains approximately constant in time (1000 to 2000 nm), regardless of the pH values, and the highest stability of nanobubbles is reached.

Key words: Nanobubbles; Production; Characterization; Critical diameter; Stability.

Estudio experimental de nanoburbujas en soluciones salinas

Resumen

La caracterización de nanoburbujas de oxígeno en soluciones de NaCl ha sido efectuada con el objeto de estudiar la variación de su tamaño, concentración, pH, temperatura y niveles de agregación, a través de procesos de saturación de oxígeno y cavitación para diferentes tiempos. Las nanoburbujas fueron producidas mediante la inyección de oxígeno por rotación a la solución salina en un medio difusivo, a temperatura constante, en la procura de una solución con distribución homogénea. La solución finalmente obtenida fue sometida a varias pruebas, a varios tiempos diferentes, para observar los cambios en las nanoburbujas. La caracterización del tamaño de las nanoburbujas en la solución fue llevada a cabo utilizando la técnica de dispersión dinámica de la luz. La concentración de la solución se determinó mediante un proceso semicuantitativo teniendo en cuenta la concentración de partículas estándar y la tasa de conteo por segundo del dispositivo. Se midió el potencial ζ para establecer los niveles de agregación y estabilidad de las nanoburbujas a diferentes temperaturas y pH. A una temperatura $T=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observó que el diámetro de las nanoburbujas permanece aproximadamente constante en el tiempo (1000 to 2000 nm), independientemente de los valores de pH, alcanzándose la mayor estabilidad de las nanoburbujas.

Palabras clave: Nanoburbujas; Producción; Caracterización; Diámetro crítico; Estabilidad.

Introduction

Diameter of nanobubbles is usually less than $10\text{ }\mu\text{m}$ (Prosperetti A., 1982) and their physical properties are unique because they differ from one type of bubble to another, whereby, nanobubbles allows being applied in multiple fields. In recent years the concept of ultrafine bubbles has been introduced, literally meaning extremely small bubbles. In this work, both terms are treated indistinctly. Bubbles with a diameter smaller than $50\text{ }\mu\text{m}$ are

compressed by the ions at the gas-liquid interface to a critical diameter, while those having values below their critical diameter increase. As a result of the above, the concentration of ions at the gas-liquid interface, the internal

*Correspondencia:

Carlos Andrés Sjogreen, Sjogreen, gfmn.unal@gmail.com

Recibido: 30 de octubre de 2017

Aceptado: 14 de marzo de 2018

Editor: Román Castañeda

pressure and the system temperature increase, which leads to various types of phenomena. Ultrafine bubbles have been known since 1894, when the violent vibration of the propeller of a high-speed torpedo boat owned to the Royal Navy in test period significantly rusted its surface because the propeller in motion generated a large number of bubbles that completely covered its surface. Also, it was found that the hot water noise in the boilers directly before the boiling point reaches levels in the ultrasound range generated by the microbubbles (**Prosperetti A., 1982**). Technology based on ultrafine bubble can be applied in several new types of medical treatments (**Azevedo A., Etchepare R., Calgaroto S. & Rubio J., 2016**) and in the process of concentrating and collapsing ultrafine bubbles where oxygen is activated in the air molecules, forming products such as OH and O_3 , which has sterilizing properties (**Kim J.-G., Yousef A. & Dave S., 1999**). Also, nanobubbles are applicable in a wide range of industries, in waste disposal processes (**Paraskeva P. & Graham N., 2002**), pharmaceuticals and cosmetics (**Agarwal A., Ng W. & Liu Y., 2011**), hydroponic (**Khasnavis S., Jana A., Roy A., Mazumder M., Bhushan B., Wood T., Ghosh S., Watson R. & Pahan K., 2012**) and in the food production and filtration systems (**Greenstein G. & Tonetti M., 2000**). By introducing nanobubbles with oxygen into a determined area, marine bacteria can perform improvements in their waste and reuse process, which results in a biological chain reaction that can significantly increase the biodiversity and population of organisms in the local environment. Furthermore, nanobubble technology can be useful for nature restoration and environmental sustainability projects (**Michioku K., Minagawa H., Yamada S., Ikeguchi T. & Ohkawa N., 2012**). Other of many applications for nanobubbles, as a microorganism growth agent, is being used in several physical human illness like oesophageal cancer, laryngeal cancer, skin cancer, gum disease, arterial sclerosis, infections, artificial dialysis and diseases like asthma, Alzheimer's and Parkinson's disease (**Choi S., Yu E., Rabello G., Merlo S., Zemmar A., Walton K.D., Moreno H., Moreira J.E., Sugimori M. & Llinás R.R., 2014**). Since applications depends on each property, in the present work, characterization of nanobubbles is carried out in a saline solution, with the main interest to analyze the size and stability as a function of different parameters such as temperature, time of revolution (energy supplied to the system), evolution time, solution concentration, pH and ζ potential.

Experimental setup

The production of the nanobubbles was carried out through an oxygen tank with regulator, a bicker, an Ultraturax T10 homogeniser and a ceramic diffuser, as shown in Figure 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/543/2569>.

The experimental measurements were made using a Zetasizer Nano ZS that performs the analyses of samples via processes of dynamic light scattering. This device allows

measurements of both molecular and particle size. It also has a potential ζ analyser, which uses the electrophoretic light scattering of particles, molecules and surfaces. Finally, it contains a molecular mass analyser by means of static light scattering. In addition, it has the option of micro-rheology to measure the viscosity of the sample and viscoelastic properties, as well as the option of measuring protein mobility. The Zetasizer Nano ZS has three techniques in a single unit and a variety of options and accessories to optimize and simplify the measurement of different types of samples (Malvern Instruments Ltd., 2004). Dynamic light scattering is used to measure the size of particles and molecules. This technique measures the particles in diffusion that move under Brownian motion and converts this measure to the size and distribution of the dimensions using the Stokes-Einstein relation. Doppler laser microelectrophoresis is used for potential ζ measurements. External electric field is applied to a dispersion of particles whose speed will be related to its potential. This velocity is measured by a patented laser interferometric technique named M3 (PALS light scattering with phase analysis). Thus it is possible to calculate the electrophoretic mobility, which serves as a starting point in obtaining the potential ζ . Static light scattering is used to determine molecular weight in proteins and polymers. In this technique the dispersion intensity measures the samples at different concentrations in order to create a Debye graph. Thereafter, it is possible to calculate the average molecular weight and the second virial coefficient, which provides a measure of the solubility of the molecules. The experimental setup used by the Zetasizer Nano ZS is shown in figure 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/543/2570>.

In the assembly of figure 2S, a laser 1 is used to provide a light source for illuminating the sample particles within the cell 2. Most part of the laser beam passes directly through the sample, remaining part is dispersed by the particles within the sample. Detector 3 is used to measure the intensity of the scattered light. Since light is dispersed by these particles in all directions, it is possible any random setting of the detector. With the Zetasizer Nano series, depending on the particular model, position of the detector will be anywhere at 173° or 90° . Intensity of the scattered light must be within a specific range for the right operation of the detector. If excess light is detected then the detector will be overloaded. To overcome this an attenuator 4 is used to reduce the intensity of the laser and therefore reduce the intensity of the dispersion. For samples that disperse low light, such as very small particles or samples of low concentration, the amount of scattered light must be increased. In this situation, the attenuator will allow more laser light through the sample. For samples that disperse more light, such as large particles or samples of higher concentration, the amount of scattered light must be decreased. This is achieved by using the attenuator to reduce the amount of laser light passing through the

sample. The Zetasizer determines the proper position of the attenuator during the measurement sequence automatically. The scatter intensity signal for the detector is transferred to a digital signal processing plate called correlator 5. The correlator compares the scattering intensity at successive time intervals to derive the rate at which the intensity is variable. The correlator information is then transferred to computer 6, where software specialist Zetasizer will analyze the data and obtain the information.

Theoretical requirements

Dynamic light scattering. This technique is also known as photon correlation spectroscopy and is currently one of the most popular methods used to determine particle size. A monochromatic light beam, such as a laser, on a solution with spherical particles in the Brownian motion causes a Doppler shift when the light reaches the moving particle, changing the wavelength of the incoming light. This change is related to the size of the particle. It is possible to calculate the sphere size distribution and give a description of the movement of the particle in the medium, by measuring the diffusion coefficient of the particle and the use of the autocorrelation function (Schmitz J.-G., 1990).

Temporal first order autocorrelation function. Dynamic light scattering (DLS) studies properties of dynamic and non-homogeneous media. A generic situation is illustrated in Figure 3S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/download/SuppFile/543/2571>, where a flat wave is dispersed in a randomly moving particle system. In that figure, \mathbf{R} is the position vector from P , with the fluctuating dispersion position $\mathbf{r}_m(t)$ along the direction $\mathbf{R}-\mathbf{r}_m(t)$.

For the weak dispersion media, the problem can be described by the Born approximation. If we consider the dispersion medium as a discrete and positions of particles fluctuate over time, we can define a dynamic dispersion potential as a collection of point scatters given by a function $F(\mathbf{r}, t)$ with amplitude f_o , which represents the dispersion potential of a single particle, and phase $\sum_j \delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_j)$, where the sum extends to all particles. The variable t is due to the fluctuations of the particles around their positions and should not be confused with the reciprocal variable of frequency in optics ω . The dispersion potential lies in the frequency domain $F(\mathbf{r}, \omega)$; then, for simplicity, the explicit argument ω is ignored. The dynamic scattering amplitude is given by the Fourier transform of this function,

$$f(\mathbf{q}, t) = f_o(\mathbf{q}) \cdot \sum_j e^{i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}_j(t)}, \quad (1)$$

where $\mathbf{q} = \mathbf{k}_s - \mathbf{k}_j$. The dynamic signal is originated by the overlap of dispersed fields with fluctuating phases. To characterize these fluctuations the temporal autocorrelation of the dispersed field along \mathbf{k}_s , can be calculated by using

$$\Gamma(\mathbf{q}, t) = \langle f(\mathbf{q}, t) f^*(\mathbf{q}, t + \tau) \rangle$$

$$\Gamma(\mathbf{q}, t) = |f_o(\mathbf{q})|^2 \langle \sum_m \sum_n e^{i\mathbf{q} \cdot [\mathbf{r}_m(t+\tau) - \mathbf{r}_n(t)]} \rangle \quad (2)$$

In equation (2) Γ represents the first order correlation function, which must be distinguished from the correlation intensity, and $\langle \rangle$ denotes average time that is given by $\langle f(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$. It is assumed that the particles move independently from each other. It is valid for a dispersed distribution of particles. Under these circumstances the correlations between the displacements of different particles fade, therefore

$$\langle e^{i\mathbf{q} \cdot [\mathbf{r}_m(t+\tau) - \mathbf{r}_n(t)]} \rangle = 0 \quad \text{for } m \neq n \quad (3)$$

Combining equations (2) and (3), gives

$$\Gamma(\mathbf{q}, t) = N \sigma_d(\mathbf{q}) \langle e^{i\mathbf{q} \cdot [\mathbf{r}_m(t+\tau) - \mathbf{r}_n(t)]} \rangle \quad (4)$$

where $\sigma_d(\mathbf{q}) = |f_o(\mathbf{q})|^2$ is the differential cross-section associated with a single particle and N is the total number of particles in the dispersion volume (Schmitz J.-G., 1990).

It is considered that all the terms of the sum are equal, i.e., all particles are governed by the same statistics. Temporal autocorrelation Γ is normalized to give

$$g_1(\mathbf{q}, \tau) = \frac{\Gamma(\mathbf{q}, \tau)}{N \sigma_d(\mathbf{q})} \quad (5)$$

$$g_1(\mathbf{q}, \tau) = \langle e^{i\mathbf{q} \cdot [\mathbf{r}_m(t+\tau) - \mathbf{r}_n(t)]} \rangle.$$

Here, g_1 is the first order correlation function.

Second order correlation function (Siegert relation).

In practice, only dispersed intensity is accessed along the direction \mathbf{k}_s . The measurable physical variable is the autocorrelation intensity function that is defined as

$$g_2(\tau) = \frac{\langle I(t)I(t+\tau) \rangle}{\langle I(t)^2 \rangle}, \quad (6)$$

where

$$I(t) = \sum_m \sum_n U_m(t) \cdot U_n^*(t). \quad (7)$$

The double sum is applied to the assembly on the set of scattered fields. Combining equations (6) and (7), we have

$$g_2(\tau) = \frac{1}{\langle I(t)^2 \rangle} \langle \sum_m \sum_n U_m(t) \cdot U_n^*(t) \cdot \sum_k \sum_l U_k(t+\tau) \cdot U_l^*(t+\tau) \rangle. \quad (8)$$

In equation (8), two different contributions appears: for $m=n=k=l$, the sum results $\langle I(t)^2 \rangle$; for the case $m=l, n=k$ and $m \neq n$, terms are obtained with the form

$$\langle \sum_m I_m g_1(\tau) \cdot \sum_n I_n g_1^*(\tau) \rangle. \quad (9)$$

Because the particles are dispersed independently of one another, all other terms vanish. Hence, equation (8) becomes

$$g_2(\tau) = \frac{1}{\langle I(t)^2 \rangle} \cdot [\langle I(t)^2 \rangle + \langle I(t)^2 \rangle |g_1(\tau)|^2]. \quad (10)$$

simplifying,

$$g_2(\tau) = 1 + |g_1(\tau)|^2. \quad (11)$$

This result connects the second and first order correlation functions and is known as the Siegert relation. To evaluate the average $\langle e^{i\mathbf{q} \cdot \Delta \mathbf{r}(\tau)} \rangle$, being $\Delta \mathbf{r}$ the displacement of a single particle, information about the physical phenomenon that generates fluctuations in the particle positions is required. This gives the probability density of the displacement to evaluate the average.

Assuming that this probability density is $\psi(\mathbf{r}, t)$, the average interest can be calculated as an average of the assemblage,

$$\langle e^{iq \cdot \Delta \mathbf{r}(t)} \rangle = \int_V \psi(\mathbf{r}, t) \cdot e^{iq \cdot \mathbf{r}(t)} d^3 \mathbf{r}. \quad (12)$$

The average is nothing other than the 3D spatial Fourier transform of the probability density $\psi(\mathbf{r}, t)$. In the next section we determine $\psi(\mathbf{r}, t)$ and the mean $\langle e^{iq \cdot \Delta \mathbf{r}(t)} \rangle$ for diffusion particles, which is a situation widely found in practice.

Particles under Brownian motion. For fluctuating particles in thermal equilibrium under Brownian motion, the probability density associated with a particle at position \mathbf{r} and time t undergoes the homogeneous diffusion process given by equation

$$D \nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{r}, t) = 0, \quad (13)$$

where D is the diffusion coefficient for a spherical particle of radius a is given by the Stokes-Einstein equation (**Schmitz J.-G., 1990**),

$$D = \frac{K_B T}{6\pi\eta a}. \quad (14)$$

Here, $K_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K is the Boltzmann constant, $T = 298$ K is the room temperature, and η represents the viscosity of the fluid at room temperature. Taking the spatial Fourier transform of equation (13), we obtain

$$\frac{\partial \tilde{\psi}(\mathbf{q}, t)}{\partial t} = D q^2 \tilde{\psi}(\mathbf{q}, t), \quad (15)$$

where the solution is

$$\tilde{\psi}(\mathbf{q}, t) = e^{-Dq^2 t} \quad (16)$$

From equations (5), (13) and (16) we have that the first-order correlation function for a particle under Brownian motion is of the form

$$g_1(q, \tau) = \langle e^{-Dq^2 \tau} \rangle \quad (17)$$

Equation (17) is commonly used in dynamic light scattering. It is established by measurements that $q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin(\theta/2)$, for a fixed scattering angle θ , where the correlation function has a characteristic time given by $\tau_o = \frac{1}{Dq^2}$. For higher dispersion angle, it becomes the diffusion coefficient; for shorter dispersion angle, it becomes the correlation time τ_o . For example, a particle with diameter of $1 \mu\text{m}$, suspended in water at room temperature, will have a characteristic $\tau_o = 2.5$ ms. Experimentally, we have direct access to the second-order correlation function and, using the Siegert relation, information about the diffusion coefficient can be obtained through

$$g_2(\tau) = 1 + e^{-2Dq^2 \tau} \quad (18)$$

where, the correlation time approaches to the form

$$\tau_o = \frac{6\pi\eta a}{q^2 K_B T}, \quad (19)$$

which relates the correlation time to the radius of the particles.

Results and discussion

Because one of the main applications is related to medicine, the characterization was performed considering the ranges

in which a solution can be administered intravenously to humans. For this reason studies were conducted in the ranges in which water or 0.9% NaCl saline can be injected into a human (**United States Pharmacopeia, 2012**). Likewise, the different pH values were established in the range of 5 to 7. The pH was changed through an electrochemical process, based on the protocol of Kikuchi et al (**Kikuchi K., Takeda H., Rabolt B., Okaya T., Ogumi Z., Saihara Y. & Noguchi H., 2001**), according to which the electrical decomposition of water is carried out in an electrolytic cell divided by an ion exchange membrane or diaphragm in compartments of an anode and a platinum cathode. Although theoretically the minimum voltage necessary to decompose the water is 1.23 V at 25 °C, in our case the application of 1.73 V was necessary. The elevation of the pH took place through the control of the cathodic reaction, in which the addition of electrons breaks the water molecules, giving rise to H_2 ions and OH^- anions. The study was performed at storage temperatures of 25 °C and 4 °C, because they are temperatures in which solutions are normally stored. It should be noted that the temperature from 4 °C to 1 atm pressure is the temperature at which the liquid water shows its highest density, which, as we will see in the development of the work, will help to stabilize the nanobubbles. Finally, a filtration study was carried out, emulating the process that occurs in the lungs, which constitute a natural filter of living beings. It is indicated that no surfactant (detergent) was added to generate stability to the nanobubbles, since these can be dangerous when supplied intravenously.

For the filtration of the different solutions, 100 nm filters were the smallest ones used, since the DLS does not distinguish between a particle and a bubble. Then the first study was carried out in distilled and deionized water, supplying oxygen between 0.5-1 L/s to water for the creation of nanobubbles in a cavitation process of Ultrasound, through a Sonicator (Qsonica Q125), with diffusion in porous medium (ceramic material) and rotation by means a Homogenizer (Ika Ultraturrax T10), in regimes of 8000-30000 rpm and at different exposure times. In addition, a combination of all of the aforementioned cavitative processes was performed, none of which gave appreciable results in the range of the nanobubbles. In addition, a combination of all of the aforementioned cavitative processes was performed, none of which gave appreciable results in the range of the nanobubbles (**Khasnavis S., Jana A., Roy A., Mazumder M., Bhushan B., Wood T., Ghosh S., Watson R. & Pahan K., 2012**). Subsequently, the same study was performed with a 0.9% NaCl saline solution using the above processes, finding bubbles of nanometric sizes. The nanobubbles were obtained with a combination of diffusion and rotation by determining the speed limit for which the highest density of bubbles per unit volume (more than 10^6 bubbles/mL) was obtained. Once the nanobubbles were found the procedure was configured with a supply of 1.0 L/s of oxygen. The speed of creation of the nanobubbles was 30000 rpm for volumes

of 500 mL with exposures of rotation of 1-7 min. Initially, the creation of nanobubbles was attempted, by means of an ultrasonic process with the sonicator. The goal was to obtain nanobubbles from the order of microns or larger, which are generated through the rotating medium. However, this method was discarded because of rotation process generated the expected nanobubbles but the application of the ultrasound eliminated them.

In the analysis, the first relation treated was the evolution of the nanobubble diameter as a function of time. It consists in measuring the size of the nanobubbles at different evolution times: 1, 2, 3, 24 and 192 hours. The measurement was performed at a temperature of 25 °C, which is standard for most of the tests, except when analyzing the behavior against a temperature change.

The objective of this measurement was to observe the evolution of the diameter for the first hours of creation and in the long term. As we expected from the nucleation theory (model by which the critical diameter of the bubbles can be established, from which they lose their stability), a critical diameter was found to exist (Fang C-K., Ko H-C., Yang C-W., Lu Y-H., Hwang I-S., 2016). This can be seen in Figure 1, whose graph fits to an exponential curve that tends to a constant value that corresponds to the critical diameter. The result is performed for a $pH = 5$. For other pHs the trend of the curve was similar.

The critical diameter as a function of the revolution time of the Ultraturax T10 equipment was also analyzed for a speed of 30000 rpm. It is observed that the critical diameter is maintained in a range between 1000 and 2000 nm. In figure 2 this result is exemplified for a $pH = 5$ but the results were essentially identical when other pHs were considered.

Measure of the nanobubbles diameter as a function of the time of revolution was carried out, at a time of evolution of 1 hour, maintaining the pH invariant. For each time of revolution, 5 measurements were taken in order to calculate an average value and a standard deviation. Results are shown in figure 3 for three different pHs, 7, 6 and 5. Here we have a linear trend between the diameter and the energy supplied to the system (time of revolution), and occurs for all the studied pHs. This apparently linear behavior is due to the small ranges of revolution time. On the other hand, from the correlation coefficients of the adjustments, it is clear in figure 3 that the tendency to a linear behavior is more evident for the higher pH values.

Next, the diameter of nanobubbles was measured as a function of pH for a time of evolution of 1 hour. The revolution time for the measurement exemplified in figure 4a was 3 minutes (for other revolution times the result was similar).

From this result it can be concluded that the diameter of the nanobubbles presents behavior with a negative slope of -21.835, i.e., it decreases very slowly. This result was expected from previously reported measurements, for which the pH does not affect substantially (Azevedo A., Etcchepare R., Calgaroto S. & Rubio J., 2016).

Measurements of critical diameter as a function of pH are shown in figure 4b for revolution time of 3 min. It was found that the critical diameter decreases linearly respect to the pH. As we predicted regarding the revolution time, the linear behavior may be due to the small range of pH values.

Following suggestions of literature [Khasnavis S., Jana A., Roy A., Mazumder M., Bhushan B., Wood T., Ghosh S., Watson R. & Pahan K., 2012; Kirby B., 2010], the temperature value was modified to 4 °C and the diameter was measured as a function of time for the pH values 5, 6 and 7, considering a revolution time of 3 min. It was also observed at room temperature, the diameter remains approximately constant for any evolution time, as shown in Figure 5.

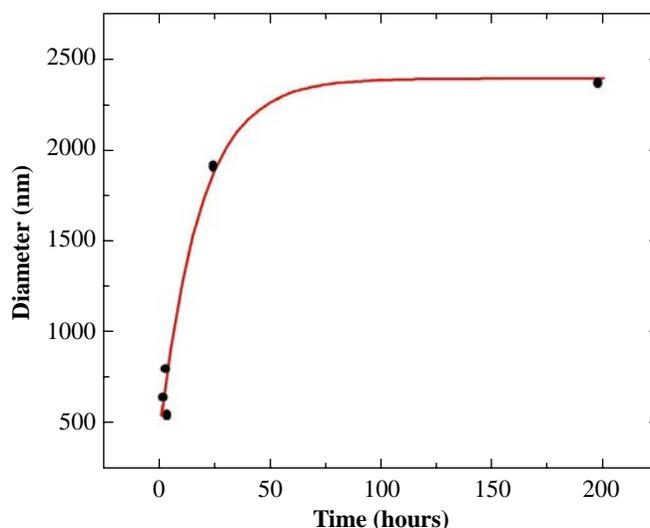


Figure 1. Experimental data of nanobubble diameter as a function of time, for a salt solution with $pH=5$ and 3 min of revolution time.

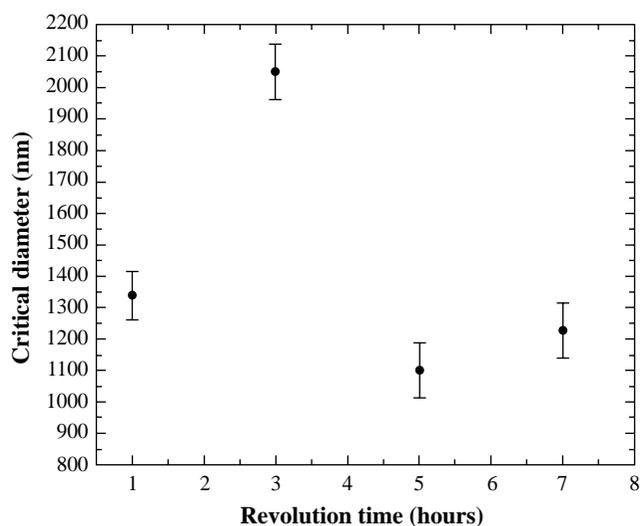


Figure 2. Critical diameter of nanobubbles as a function of revolution time for a salt solution with $pH=5$.

Analyzing the deviation of the measurements taken can be noted for the pH of 5 the dynamicity of the process is high, but the system tends to stabilize at higher pHs. From the figure 5 it is clear that the particular value of pH = 7 is quite stable at $T=4\text{ }^{\circ}\text{C}$. On the other hand, the diameter as a function of revolution time is more stable for the highest evolution times, above $t=24\text{ hours}$, compared to the first 3 hours.

A measurement of great interest in the processes related to nanobubbles corresponds to the analysis of the potential ζ , since this gives a measure of the stability of nanoparticles. In the literature it is found that the particles are more stable for potentials with magnitudes greater than 20 mV (Kirby B., 2010). The potential was measured as a function of the evolution time for two pH values (6 and 7), as is shown in the figure 6. The two curves show that the potential is

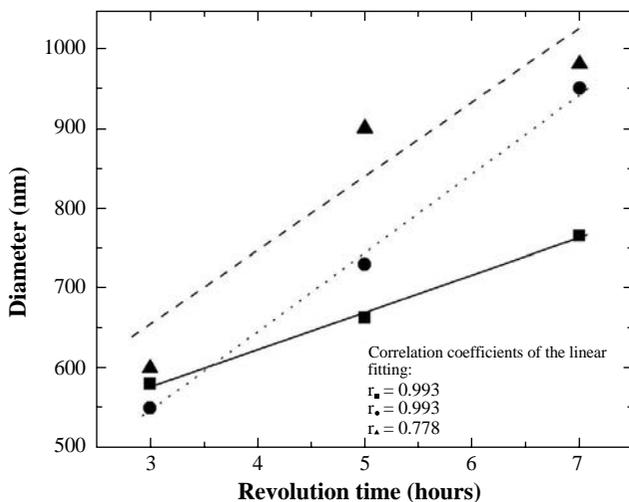
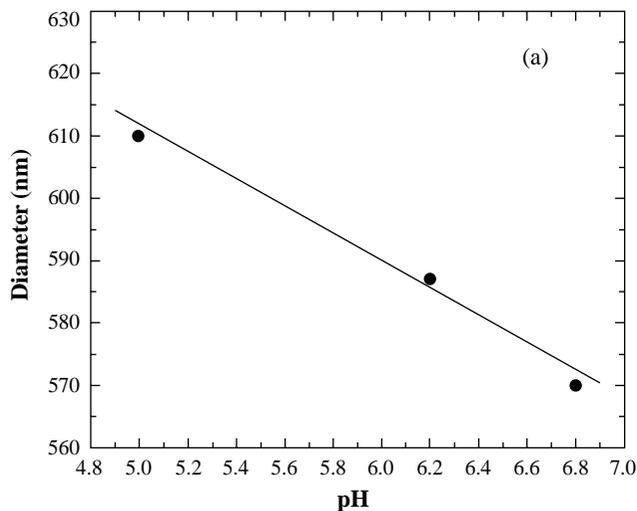


Figure 3. Diameter of nanobubbles as a function of revolution time at 25 °C, evolution time 1 hour and pHs of 5 (triangles and dashed line), 6 (squares and continuous line) and 7 (circles and dots line).



constant during the last 24 hours. This independence of time agrees with other reports (Wu C., Nessel K., Masliyah J. & Xu Z., 2012; Kirby B., 2010). Values for the potential ζ as a function of pH are shown in Table 1. It can be seen how the magnitude of the potential increases as the pH becomes higher. This result corroborates that the stability of nanobubbles improves with increasing pH.

In order to emulate the filtration process that occurs in organs of living organisms such as the lung, a 1 μm filter was applied to the solution with nanobubbles and the potential ζ was measured as a function of time for different pH values. In Table 1 it can be seen that the effect of the filter is a decrease between 14-20% of the ζ potential values. This result suggests that the stability of the bubbles is greater for the higher pH value and diminishes when the pH is decreased. Similarly, the effect of filtering affects the stability of the bubbles, which could limit biomedical application in the transport of substances through organic membranes. However, this limitation is controllable through potential monitoring.

With the objective of determining the concentration of the solution at different pH values, a conductivity measurement was performed as a function of pH at room temperature, as shown in Figure 7a, with conductivity values between 17,22 and 17,59 mS/cm ($\text{mS}=1/\text{m}\Omega$) for 5, 6 and 7 pH values. From this result the graph of the conductivity as a function of the concentration was elaborated as is shown in the figure 7b, where it is clear that the conductivity response grows linearly with the salt concentration in the solution. From the linearization of the data we obtained that the concentration of the solution is between 0,90-0,99 %.

Conclusions

It is possible to obtain nanobubbles in a NaCl solution from diffusion and rotation, keeping them stable for concentration ranges for concentration ranges, pH and storage

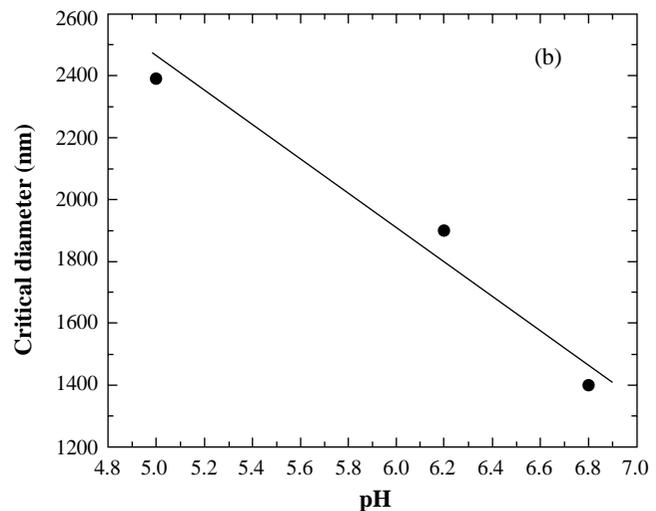


Figure 4. (a) Diameter of nanobubbles as a function of pH, for revolution time of 3 min at 25 °C, 1 hour evolution time and (b) Critical diameter as a function of pH at 25 °C and revolution time 3 min.

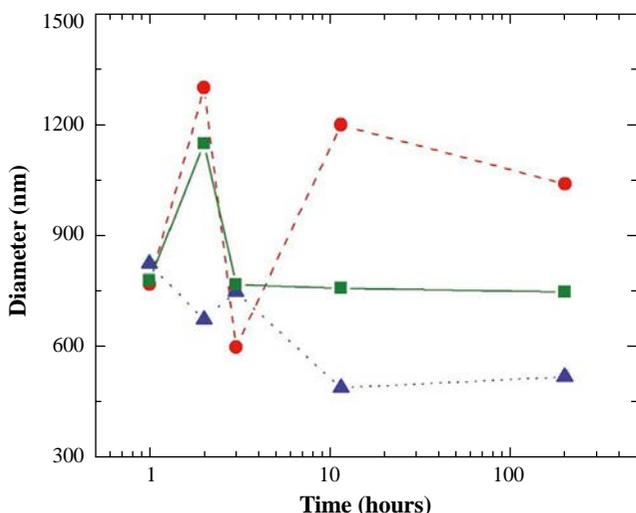


Figure 5. Measures of diameter as a function of time at 4 °C, for the pH values 5 (circles), 6 (triangles) and 7 (squares), with a revolution time of 3 min.

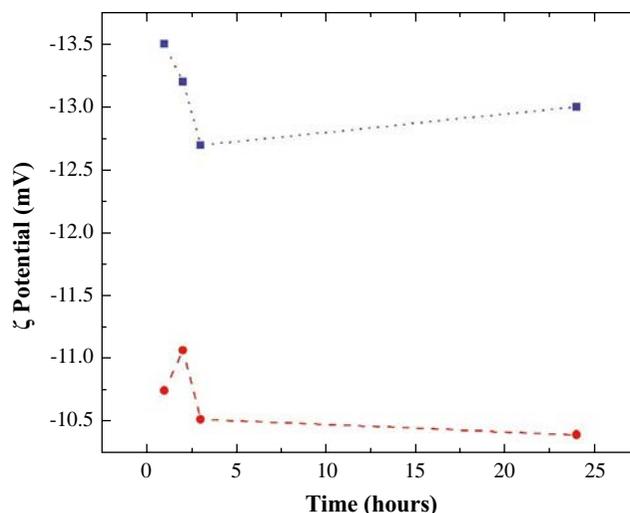


Figure 6. Results of measurements of potential ζ as a function of evolution time by considering two pH values, 6 (circles) and 7 (squares).

Table 1. Relation between pH values and potential ζ , filtered and without filter.

pH	ζ Without filter (mV)	ζ Filtered (mV)	ζ Difference (%)
6.8	-13.1	-10.4	20.6
6.2	-10.7	- 9.1	15.0
5	- 8.6	- 7.0	18.6

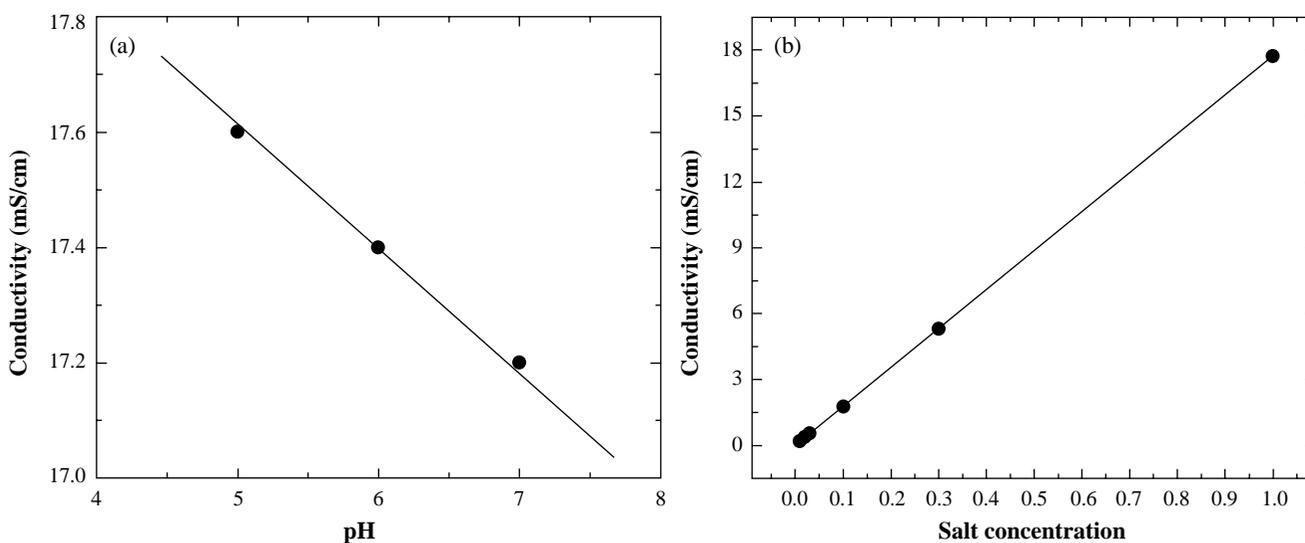


Figure 7. (a) Measurements of conductivity as a function of pH and (b) linear behavior of conductivity as a function of salt concentration in the solution.

temperatures, typical in the administration and preservation of solutions applied intravenously to humans. From the analysis of the performed measurements, it is possible to conclude that the diameter of the nanobubbles grows with the evolution time and tends to stabilize, reaching a critical

diameter, for a temperature of 25 °C. The critical diameter measured with respect to the revolution time is maintained in a range between 1000 to 2000 nm whereby, it is still in the nanometric range of the nanobubbles. The diameter of the nanobubble grows linearly with the revolution

time, for measurements with evolution time of 1 hour. A linear relationship between the diameter and the energy supplied to the system can also be derived. The diameter of the nanobubble remains approximately constant, shows slowly decreases with respect to pH, for measurements at 1 hour of evolution time. The process is highly dynamic for pH=5 but this stabilizes for 6 and 7. The critical diameter decreases linearly with respect to pH. When the temperature is changed to 4 °C the diameter is approximately constant with respect to the evolution time and the different pH. Also for the temperature of 4 °C it can be seen that the process stabilizes for higher pH. The process is also more stable as a function of evolution time for the 4 °C temperature increases. The potential ζ grows with pH. This result is consistent with the stability of the nanobubble as the pH increases. Applying a filter to the solution with nanobubbles produces a decrease in potential ζ of 10-20 %. The concentration of the solution oscillated between 0.90 to 0.99 % with respect to pH when it is modified. This is interesting to note that, although the literature suggests preserving the solutions at 4 °C without explaining the reason, the results of this study allow to establish that nanobubbles have a great stability at that temperature, so the suggestion is not only concordant but can offer a meaningful explanation. It is important to note that the production of nanobubbles and their respective characterization involves rather complicated procedures, which is why systematic measurements with more sophisticated equipment are advisable. However, our conclusions can be considered as an initial contribution to the study of the physical properties of nanobubbles in order to infer possible applications in medicine.

Acknowledgements

This work was partially supported by Division of Investigations of the National University of Colombia.

Supplementary Information

Figure 1S. Experimental assembly used in the production of nanobubbles. See figure 1S in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/543/2569>.

Figure 2S. Diagram of the Zetasizer Nano ZS equipment used in the measurement of nanobubbles. See figure 2S in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/543/2570>.

Figure 3S. Description of light scattering in a moving particle system. See figure 3S in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download/SuppFile/543/2571>.

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.

Authors' contributions

C.A. Sjogreen and J.E. Roses have made the experimental assembly for the production and measurement of nanobubbles. C.A. Sjogreen, D.A. Landínez Téllez, P.C. Plazas and J. Roa-Rojas, have participated in the analysis and interpretation of the results. C.A. Sjogreen, P.C. Plazas and J. Roa-Rojas have drafted the document and have drawn up all the figures and tables of the same. J. Roa-Rojas has carried out the review of style and the review process of the final document.

References

- Agarwal A., Ng W., Liu Y. 2011. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment, *Chemosphere*. **84**: 1175-1180.
- Azevedo A., Etchepare R., Calgaroto S., Rubio J. 2016. Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features, *Minerals Engineering*. **94**: 29-37.
- Choi S., Yu E., Rabello G., Merlo S., Zemmar A., Walton K.D., Moreno H., Moreira J.E., Sugimori M., Llinás R.R. 2014. Enhanced synaptic transmission at the squid giant synapse by artificial seawater based on physically modified saline. *Front Synaptic Neurosci*. **6** (2): 1-13.
- Fang C-K., Ko H-C., Yang C-W., Lu Y-H., Hwang I-S. 2016. Nucleation processes of nanobubbles at a solid/water interface. *Scientific Reports* **6** (24651): 1-10.
- Greenstein G., Tonetti M. 2000. The role of controlled drug delivery for periodontitis. The Research, Science and Therapy Committee of the American Academy of Periodontology, *J. Periodontol*. **71**: 125-140.
- Khasnavis S., Jana A., Roy A., Mazumder M., Bhushan B., Wood T., Ghosh S., Watson R., Pahan K. 2012. Suppression of nuclear factor-kappa B activation and inflammation in microglia by a physically-modified saline, *J. Biol. Chem*. **285**: 29529-29542.
- Kikuchi K., Takeda H., Rabolt B., Okaya T., Ogumi Z., Saihara Y., Noguchi H. 2001. Hydrogen particles and supersaturation in alkaline water from an Alkali-Ion-Water electrolyzer, *J. Electroanal. Chem*. **506**: 22-27.
- Kim J.-G., Yousef A., Dave S. 1999. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review, *J. Food Prot*. **62**: 1071-1087.
- Kirby B. 2010. Micro- and nanoscale fluid mechanics: transport in microfluidic devices. New York: Cambridge University Press.
- Malvern Instruments Ltd. 2004. *Zetasizer Nano Series Manual*, Worcestershire.
- Michioku K., Minagawa H., Yamada S., Ikeguchi T., Ohkawa N. 2012. In-Situ Experiment on Oxygen Solubility of Micro-Bubble Aeration in A Eutrophic Dam-Reservoir, *Proc. Int. Symp. Dams for A Changing World* **2**: 99-104.
- Paraskeva P., Graham N. 2002. Ozonation of municipal wastewater effluents, *Water Environ. Res*. **74**: 569-581.
- Prosperetti A. 1982. A generalization of the Rayleigh-Plesset equation of bubble dynamics, *Phys. Fluids* **25**: 409-410.
- Schmitz J.-G. 1990. *An Introduction to Dynamic Light Scattering by Macromolecules*, San Diego: Academic Press.
- United States Pharmacopeia. 2012. USP **35**, Baltimore: United Book Press.
- Wu C., Nasset K., Masliyah J., Xu Z. 2012. Generation and characterization of submicron size bubbles, *Adv. Colloid Interface Sci*. **179**: 123-132.

Aporte al conocimiento de las medusas (Cnidaria: Medusozoa) en el departamento del Atlántico, Colombia

Jeferson Durán-Fuentes^{1,*}, Adriana Gracia C.¹, Carlos Osorio M.¹, Cristina Cedeño-Posso²

¹ Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico, Atlántico, Colombia

² Grupo de Investigaciones en Manejo y Conservación de Fauna, Flora y Ecosistemas Estratégicos Neotropicales, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia

Resumen

El subfilo Medusozoa (clases Cubozoa, Hydrozoa y Scyphozoa) se caracteriza por un esquema corporal predominantemente medusoide. El subfilo agrupa organismos con características pelágicas, lo que en cierta medida ha dificultado su conocimiento y estudio. En el Caribe colombiano se han registrado 25 de las 130 especies presentes en el mar Caribe, pero se considera que aún debe ahondarse en el conocimiento en torno a su diversidad local y regional. En este trabajo se registró la composición de las especies de Medusozoa presentes en algunas localidades del departamento del Atlántico, con énfasis en el sector turístico de Puerto Velero. Los registros se obtuvieron entre agosto de 2016 y diciembre de 2017. Las muestras se recolectaron de diversas formas: manualmente, utilizando arrastres superficiales con una red rectangular (1 mm de apertura de malla), o durante actividades de pesca. Se observaron siete especies: una de Hydrozoa, una de Cubozoa y cinco de Scyphozoa. *Aurelia aurita* y *Chrysaora* sp. fueron las más frecuentes en el sector de Puerto Velero. Aunque la mayoría de las especies son de distribución amplia o cosmopolita y ocasionalmente llegan a las costas del Caribe colombiano, en el Atlántico solo se tenía registro de una de ellas, por lo que estas observaciones amplían la información sobre su diversidad y frecuencia de aparición en esta zona del país, lo cual es de importancia para gestión y conservación en los lugares que desarrollan actividades turísticas. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Caribe colombiano; Zona turística; Medusas.

Contribution to the knowledge on jellyfishes (Cnidaria: Medusozoa) in the department of Atlántico, Colombia

Abstract

The Medusozoa subphylum (Cubozoa, Hydrozoa, and Scyphozoa classes) is characterized mainly by a medusoid body scheme. The subphylum groups together organisms with pelagic characteristics, which to some extent has hindered their knowledge and study. Twenty five of the 130 species found in the Caribbean Sea have been recorded for the Colombian Caribbean, but new efforts are required to understand their diversity at local and regional level. In this study we registered the composition of subphyla species in some localities of the department of Atlántico, with an emphasis in the Puerto Velero tourist area. We collected the material between August 2016 and December 2017. Samples were collected manually, using a rectangular surface net (1 mm mesh opening), or during fishing activities. We recorded seven species: One from the Hydrozoa subphylum, one from the Cubozoa, and five from the Scyphozoa. Among these, *Aurelia aurita* and *Chrysaora* sp. were the most frequent in the Puerto Velero area. Although most of these species are widely distributed or cosmopolitan, and occasionally reach the Colombian Caribbean coasts, only one of them was previously recorded in the department of Atlántico. This new register increases the knowledge regarding their diversity and frequency of occurrence in this area of the country, and it is of particular interest for tourist places, especially for management and conservation purposes. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Colombian Caribbean; Tourist area; Jellyfishes.

Introducción

El filo Cnidaria Verrill, 1865, está constituido por un grupo de invertebrados, predominantemente marino, que abarca unas 11.665 especies descritas (WoRMS, 2017), entre medusas, anémonas, corales, hidras de agua dulce y otras menos conocidas (Collins, 2002; Daly, *et al.*, 2007). La principal característica de las especies agrupadas en este filo es la presencia de células urticantes, los cnidocitos, las cuales contienen un orgánulo denominado nematocisto

(Marques & Collins, 2004); estas células contienen toxinas (neurotoxinas, cardiotoxinas, nefrotoxinas, miotoxinas, etc.) que funcionan como mecanismo de ataque (captura de presas) o defensa (Vera, *et al.*, 2004; Gasca & Loman-Ramos, 2014; Jouiaei, *et al.*, 2015).

*Correspondencia:

Jeferson Durán-Fuentes, jalexisduran@mail.uniatlantico.edu.co

Recibido: 13 de septiembre de 2017

Aceptado: 1 de febrero de 2018

Editor: Marta Ramírez Pinilla

En la actualidad Cnidaria se encuentra dividido en dos subfilos, Anthozoa y Medusozoa (Marques & Collins, 2004; Technau, *et al.*, 2015). Los antozoos se presentan solo como pólipos solitarios o coloniales, mientras que los medusozoos (clases Staurozoa, Hydrozoa, Scyphozoa y Cubozoa), además de formar pólipos solitarios o coloniales, forman una medusa que contiene gametos (Technau, *et al.*, 2015); así mismo, exhiben un ciclo de vida característico con, por lo menos, tres fases: una larva plánula, un pólipo generalmente sésil, y una medusa generalmente pelágica (Collins, 2002; Marques & Collins, 2004; Collins, *et al.*, 2006).

Las medusas se caracterizan por ser uno de los organismos más importantes de las comunidades bióticas marinas del neoton y del zooplancton (Boero, 2013). Debido a su forma de vida (nadadoras libres), la mayoría de especies marinas presentan distribución cosmopolita y se localizan en mares de todo el mundo (Ponce & López, 2013). En las últimas décadas ha habido un gran interés sobre el grupo, debido a los crecientes problemas que generan proliferaciones masivas de estos organismos, conocidas como *blooms*. Estos episodios causan efectos disruptivos en las comunidades biológicas de la columna de agua (Mills, 2001; Purcell, *et al.*, 2007; Boero, *et al.*, 2008; Boero, 2013), y también afectan de manera negativa la economía y el equilibrio bioecológico de una región, especialmente sectores como el turismo por la disminución de bañistas, las pesquerías, debido a la ingestión de huevos y larvas de especies comerciales, las faenas de pesca, pues disminuye la abundancia de las capturas y se enredan en las artes de pesca, y, por último, porque causan la disminución de la biomasa planctónica disponible para las siguientes tramas ecológicas (Mills, 2001; Purcell, *et al.*, 2007; Boero, *et al.*, 2008; Boero, 2013). Aún no se conocen con precisión las causas de tales florecimientos, y aunque no hay consenso, se han sugerido el calentamiento global, las perturbaciones antropogénicas y la eliminación de los grandes depredadores en la red trófica (Mills, 2001; Purcell, *et al.*, 2007; Boero, *et al.*, 2008; Boero, 2013).

En las playas costeras, que son áreas de esparcimiento muy concurridas, estas proliferaciones son responsables de uno de los envenenamientos más comunes para el humano. Se conoce que más de 1.000 especies son tóxicas, y el contacto con ellas puede originar inmediatamente ronchas, vesículas dolorosas y pruriginosas con sensación urente, además de eritema y edema cutáneos, que rara vez llegan a la necrosis y el colapso cardiorrespiratorio (Auerbach, 1991; Vera, *et al.*, 2004; Otero, 2012; Jouiaei, *et al.*, 2015). Cuando suceden estas proliferaciones, las autoridades costeras tienden a restringir el acceso a las playas para evitar cualquier incidente (Boero, 2013).

En el Caribe colombiano hasta ahora el grupo más estudiado es el de los cnidarios que producen esqueletos carbonatados y son generalmente sésiles, en tanto que aún hay muchos vacíos de información sobre la taxonomía, la ecología y la distribución de los medusozoos. Hasta el momento se han registrado allí 16 especies de sifonóforos

(Hydrozoa) (Domínguez, 2002), siete de Scyphozoa (Moncaleano & Niño, 1979; Cedeño-Posso, 2010) y dos de Cubozoa (Cedeño-Posso, 2010; Cedeño-Posso & Lecompte, 2013a), mientras que en el Mar Caribe se han registrado 114 especies de la primera de estas clases, 12 de la segunda y cuatro de la tercera (Mianzan & Cornelius, 1999; Humann & Deloach, 2002). A nivel mundial el número aumenta significativamente a 3.678 especies de Hydrozoa, 191 de Scyphozoa y 47 de Cubozoa (WoRMS, 2017).

El objetivo de este trabajo fue aportar información sobre el grupo en el departamento del Atlántico, determinando, en lo posible, la diversidad estacionaria de las formas medusoides, con énfasis en el área turística de Puerto Velero. Dicha información es clave desde el punto de vista de la conservación, así como del manejo y el uso de las playas para las actividades turísticas.

Materiales y métodos

Área de estudio. La playa de Puerto Velero (10°56'48,7"N, 75°02'12,8"O) está ubicada al oeste de la playa de Caño Dulce y Puerto Caimán (municipio de Tubará, Atlántico) sobre la costa Caribe de Colombia (Figura 1). En el sector de Puerto Velero se encuentra el parque Caribe Aqualand (10°56'49,31"N, 75°2'13,16"O) (Estación M1, Figura 1), en donde se concentraron las actividades de observación y de registro durante el estudio. Las otras localidades incluidas en el estudio, y sus respectivas estaciones, se presentan en la Figura 1.

Para el departamento del Atlántico, el promedio anual de la temperatura superficial del agua del mar oscila entre los 25,5 °C y 29,5 °C y la salinidad entre los 34,5 y los 37 ppm (Posada & Henao, 2008). Hay dos periodos de lluvia (abril a mayo y octubre a noviembre) y dos periodos secos (diciembre a marzo y julio a septiembre) (Rangel-Buitrago, *et al.*, 2017). Los vientos presentan valores medios de velocidad inferiores a 23 nudos. Los valores de velocidad más altos están asociados con los vientos que soplan desde el noreste durante el período seco, en tanto que los valores son más bajos entre septiembre y noviembre cuando los vientos soplan desde el este (Anfuso, *et al.*, 2015).

La influencia del río Magdalena en las costas del departamento es evidente, debido al aporte de sedimentos y de materiales orgánicos e inorgánicos (Rangel-Buitrago, *et al.*, 2017).

Fase de recolección y análisis. Los avistamientos y recolecciones en Puerto Velero se realizaron durante 17 meses, entre agosto del 2016 y diciembre del 2017, con visitas cada 15 días, aproximadamente. La estación comprendía ~50.000 m² y abarcaba desde la orilla de la playa hasta 200 m mar adentro (Estación M1, Figura 1). Se hicieron muestreos exploratorios de medusas mediante 'careteo' y nado libre limitados a la parte superficial de la columna de agua.

Los individuos recolectados se fijaron y preservaron en una solución de formalina entre 4 a 10 % en agua de mar. La velocidad del viento y la altura de la ola se consultaron en la base de datos de Windguru (2017).

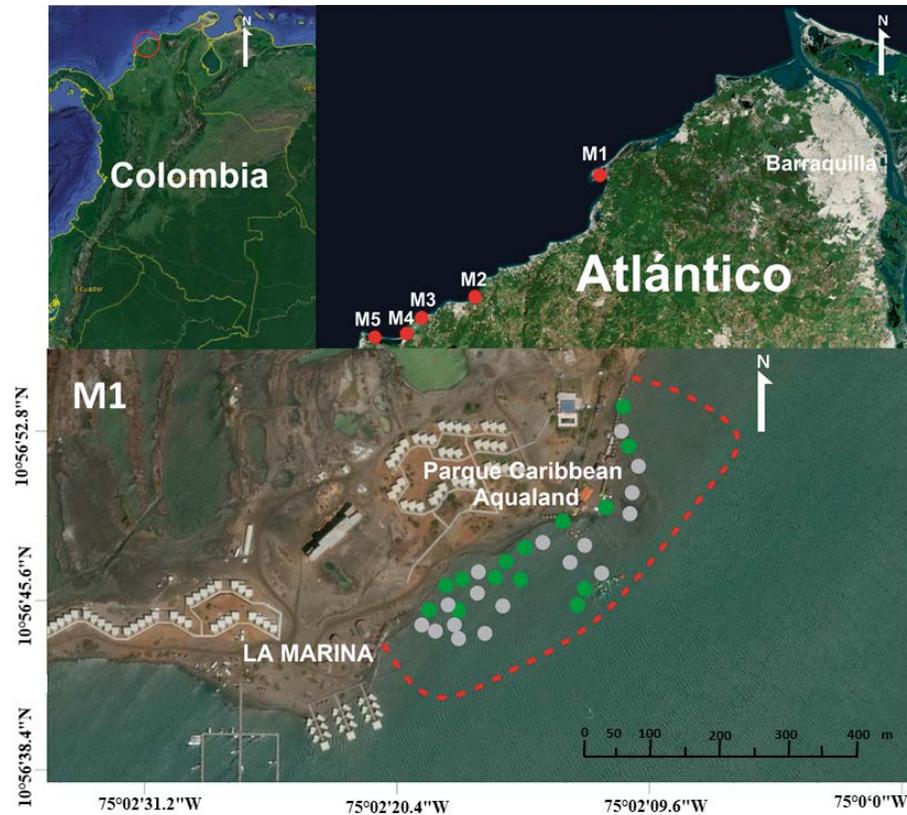


Figura 1. Área de estudio en el departamento del Atlántico. M1: Puerto Velero; M2: Aguamarina; M3: Bocatocinos; M4: Punta Astilleros; M5: Salinas de Galerazamba. Puntos grises: avistamientos (AVIS); puntos verdes: recolecciones (COL)

La identificación de los individuos se hizo en el Laboratorio de Zoología de la Universidad del Atlántico con ayuda de microscopios estéreo ZEISS Stemi 305; se utilizaron claves dicotómicas y pictóricas (Kramp, 1961; Hummelinck, 1968; Mianzan & Cornelius, 1999). El material se incorporó en la colección biológica de la Universidad del Atlántico, sede del km 7, vía Puerto Colombia.

Resultados

En Puerto Velero se hicieron 39 visitas, en 21 de las cuales se avistaron medusas en nueve eventos: marzo, agosto y octubre de 2016, y abril, julio, agosto, septiembre, noviembre y diciembre de 2017. En las otras localidades (estaciones M2, M3, M4, M5), se obtuvieron registros de especies durante visitas puntuales. En la Tabla 1 se detallan las observaciones en campo y las recolecciones.

Se registraron 506 ejemplares (30 recolecciones y 476 avistamientos) pertenecientes a tres clases, cuatro órdenes y siete especies, distribuidos de la siguiente manera: para la clase Scyphozoa se registraron 104 ejemplares de la especie *Chrysaora* sp. (13 recolecciones y 91 avistamientos); 16 ejemplares de *Cassiopea xamachana* (6 recolecciones y 10 avistamientos); 305 ejemplares de *Aurelia aurita* (3 recolecciones y 302 avistamientos); 66 ejemplares de *Lychnorhiza* cf. *lucerna* (4 recolecciones y 62 avistamientos) y 10 ejemplares de *Stomolophus meleagris* (1 recolección y

9 avistamientos). En dos avistamientos se registró la especie *Physalia physalis* de la clase Hydrozoa, y, por último, se recolectaron tres ejemplares de *Chiropsalmus quadrumanus* de la clase Cubozoa (Tabla 1).

Se destacó la observación de más de 65 individuos de *Chrysaora* sp. y 238 individuos de *A. aurita* en una misma faena de pesca llevada a cabo el 4 de junio de 2017 en el sector de Puerto Velero.

A continuación se presenta la síntesis de las especies observadas. El ordenamiento taxonómico se hizo según el registro de WoRMS (2017):

Filo: Cnidaria Verrill, 1865
Clase: Hydrozoa Owen, 1843
Subclase: Hydroidolina Collins, 2000
Orden: Siphonophorae Eschscholtz, 1829
Suborden: Cystonectae Haeckel, 1887
Familia: Physaliidae Brandt, 1835
Género: *Physalia* Lamarck, 1801

Physalia physalis (Linnaeus, 1758) (Figura 2A)

Material observado en campo: dos ejemplares varados en la playa (marzo 15 de 2016), estación M3

Nueva localidad: Bocatocinos (Atlántico)

Distribución: cosmopolita (Yanagihara, et al., 2002; Pontin & Cruickshank, 2012; Haddad, et al., 2013). En el Caribe colombiano se ha registrado en Bolívar (Domínguez, 2002)

Tabla 1. Registro de las recolecciones y avistamientos de medusas en las localidades de Puerto Velero, Aguamarina, Bocatocinos, Punta Astilleros y Salinas de Galerazamba en el departamento del Atlántico

Clase	Especie	2016								2017									
		Marzo		Agosto		Octubre		Abril		Julio		Agosto		Septiembre		Noviembre		Diciembre	
		AVIS	REC	AVIS	REC	AVIS	REC	AVIS	REC	AVIS	REC	AVIS	REC	AVIS	REC	AVIS	REC	AVIS	REC
Hidrozoa	<i>Physalia physalis</i>	2 ^C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Scyphozoa	<i>Lychnorhiza cf. lucerna</i>	0	0	0	0	32 ^A	0	0	0	1 ^A	1 ^A	25 ^A ; 4 ^D	3 ^B	0	0	0	0	0	0
	<i>Stomolophus meleagris</i>	0	0	0	0	7 ^A	0	0	0	0	1 ^A	2 ^A	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Chrysaora</i> sp.	0	0	0	0	0	0	10 ^A	1 ^A	81 ^A	12 ^A	0	0	0	0	0	0	0	0
	<i>Aurelia aurita</i>	0	0	25 ^A	0	15 ^A	0	0	0	243 ^A	3 ^A	0	0	9 ^A	0	10 ^A	0	0	0
	<i>Cassiopea xamachana</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10 ^E	6 ^E
Cubozoa	<i>Chiropsalmus quadrumanus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3 ^B	0	0	0	0	0	0

^A: Puerto Velero; ^B Aguamarina; ^C Bocatocinos; ^D Punta Astilleros; ^E: Salinas de Galerazamba; AVIS: avistamiento; REC: recolección

Comentario: la observación estuvo a cargo de estudiantes del programa de Biología de la Universidad del Atlántico durante una salida de campo hacia el sector de Bocatocinos.

Clase: Scyphozoa Goette, 1887

Subclase: Discomedusae Haeckel, 1880

Orden: Rhizostomeae Cuvier, 1799

Familia: Lychnorhizidae Haeckel, 1880

Género: *Lychnorhiza* Haeckel, 1880

Lychnorhiza cf. lucerna Haeckel, 1880 (Figura 2B)

Material examinado: un ejemplar (UARC-CNI 033), recolectado en la parte superficial de la columna de agua en el parque Caribe Aqualand, estación M1 (julio 9 de 2017); tres ejemplares (UARC-CNI 035, UARC-CNI 036 y UARC-CNI 037) extraídos en redes durante actividades de pesca en el sector de la estación M2 (agosto 1 de 2017)

Material observado en campo: 32 ejemplares varados en la playa cerca de la estación M1 (octubre 12 de 2016) (10°57'07,1"N, 75°01'58,8"O); un ejemplar nadando cerca del parque acuático de Puerto Velero (julio 19 de 2017) (10°56'48,6"N, 75°02'12,9"O); cuatro ejemplares varados en la playa en la estación M4 (agosto 1 de 2017); 21 ejemplares varados cerca de los límites de la estación M1 (agosto 20 de 2017) (10°56'52,7"N, 75°02'10,8"O)

Nueva localidad: Puerto Velero, Aguamarina y Punta Astilleros (Atlántico)

Distribución: costa atlántica de Suramérica. En el Caribe colombiano se ha registrada en Bolívar, Magdalena y La Guajira (Cedeño-Posso, 2010)

Características morfológicas: umbrella hemisférica con un promedio de 73 ± 6,8 mm de diámetro (n=4); cuatro pares de brazos orales de tres alas de longitud de 52 ± 12,8 mm en promedio; gránulos de tamaño minúsculo, casi

imperceptibles, en la exumbrela; coloración blanquecina tanto en la umbrella como en los brazos orales y ocho manchas de color azulmorado, dos en cada punto, redondeando el estómago; ocho ropalios incrustados en nichos profundos formando surcos sobre la exumbrela, cada uno de ellos protegido por dos lóbulos ropaliales pequeños, paralelos y punteados; 35 a 40 lóbulos marginales triangulares con puntas redondeadas; ausencia de la boca central y presencia de cuatro ostios genitales

Comentarios: el material recolectado correspondía a dos ejemplares juveniles y dos adultos, con algunas características concordantes con las de la especie *Lychnorhiza lucerna*, pero sin filamentos en los brazos orales ni la coloración azul en el margen umbrelar, por lo cual en este estudio se registró como *Lychnorhiza cf. lucerna*, según la propuesta de Cedeño-Posso & Lecompte (2013b). La presencia de ejemplares varados en la playa en octubre del 2016 probablemente se asocia con los vientos moderados (11,3 nudos) y con el oleaje (1,27 m) en ese sector (Windguru, 2017).

Según diversos estudios, la descripción inicial de la especie *Lychnorhiza lucerna* presentaba un gran número de sinonimias, lo cual ha llevado a proponer revisiones (Cedeño-Posso & Lecompte, 2013b). Los ejemplares encontrados en la costa Caribe presentaban una variedad morfológica diferente a las reportadas en otros lugares del mundo, por lo que sería de gran importancia llevar a cabo análisis moleculares que permitan confirmar si se trata de otra especie o corresponde a una variación morfológica producto de las condiciones ambientales del lugar (Cedeño-Posso & Lecompte, 2013b).

Familia: Stomolophidae Haeckel, 1880

Género: *Stomolophus* Agassiz, 1862

Stomolophus meleagris Agassiz, 1862 (Figura 2C)

Material examinado: un ejemplar (UARC-CNI 034) recolectado en la parte superficial de la columna de agua en el parque Caribe Aqualand, estación M1 (julio 16 de 2017)

Material observado en campo: siete ejemplares varados cerca de los límites de la estación M1 (octubre 12 de 2016) (10°57'03,0"N, 75°01'43,7"O) y dos avistamientos en la parte superficial de la columna de agua en la estación M1 (agosto 20 de 2017)

Nueva localidad: Puerto Velero (Atlántico)

Distribución: mar Caribe, golfo de México, Caribe colombiano (Bolívar y Magdalena), mar Mediterráneo, Atlántico norte y sur, océano Pacífico del norte (Cedeño-Posso, *et al.*, 2016)

Características morfológicas: umbrela hemisférica de 43 mm de diámetro (n=1); superficie exumbrelar lisa; ocho brazos orales dicotómicos, cortos y fusionados formando un pseudo-manubrio sin filamentos y con una boca central primaria; dos escapulas (16 en total) con aperturas bucales en la base de cada brazo oral de 15 mm de longitud, y ocho ropalios

Comentarios: el material recolectado correspondía a un ejemplar juvenil. Al igual que en el caso de *Lychnorhiza* cf. *lucerna*, se considera que los ejemplares varados en la playa pudieron estar asociados con los vientos moderados (11,3 nudos) y el oleaje (1,27 m) que se presentaban en el sector.

Familia: Cassiopeidae Agassiz, 1862

Género: *Cassiopea* Péron & Lesueur, 1810

Cassiopea xamachana (Fig. 2D-E)

Material examinado: en total seis ejemplares de la misma localidad. Catalogados de la siguiente manera: dos ejemplares UARC-CNI 041, dos ejemplares UARC-CNI 042, un ejemplar UARC-CNI 043 y un ejemplar UARC-CNI 044. Los ejemplares se recolectaron en el borde de una laguna temporal ubicada en la parte posterior de la playa de Salinas de Galerazamba, estación M5 (diciembre 17 de 2017)

Material observado en campo: diez ejemplares observados en el mismo punto del material examinado

Nueva localidad: Salinas de Galerazamba, Atlántico, Bolívar

Distribución: se encuentra en todo el Mar Caribe desde el extremo sur de Florida (Hummelinck, 1968; Fitt & Costley, 1998). En el Caribe colombiano se ha registrado en Magdalena (Cedeño-Posso, 2010)

Características morfológicas: umbrela achatada y cóncava en la zona aboral con un promedio de $64,2 \pm 10,2$ mm de diámetro (n=6); entre 72 y 86 lóbulos marginales pequeños y redondos, separados entre sí por surcos profundos; ocho brazos orales que exceden el margen umbrelar, $30,3 \pm 11,9$ mm de largo en promedio, con ramificaciones irregulares provistas de aperturas diminutas de bocas secundarias rodeadas de un collar de tejido; ausencia de boca central y presencia de vesículas de 5 a 15 mm de largo en forma de cinta de coloración azul oscuro; 14 a 18 ropalios protegidos

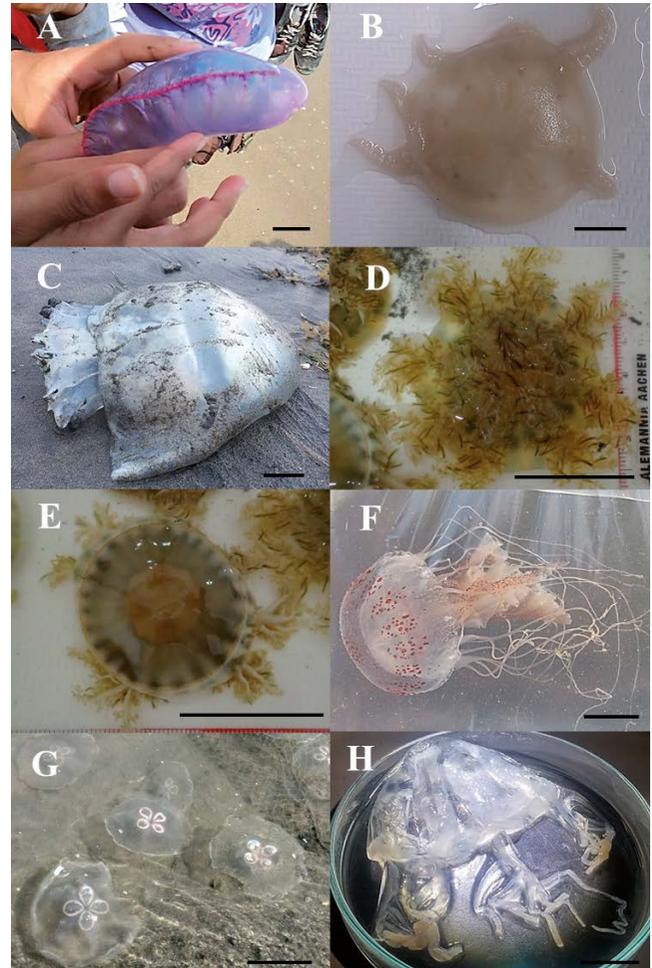


Figura 2. Registros fotográficos de las especies del subfilo Medusozoa presentes en la línea de costa del departamento del Atlántico. A. *Physalia physalis*; B. *Lychnorhiza* cf. *lucerna*; C. *Stomolophus meleagris*; *Cassiopea xamachana*. D. posición oral, E. posición aboral; F. *Chrysaora* sp.; G. *Aurelia aurita*; H. *Chiropsalmus quadrumanus*. Escalas: A-F, H: 2 cm, G: 20 cm

en nichos con una fina membrana; canales radiales que se comunican por anastomosis y generalmente divergen de los vasos radiales hacia la periferia formando un ángulo más o menos agudo; cuatro gónadas y cuatro fosas subgenitales separadas; coloración verdosa-azul debido a la simbiosis de numerosas zooxantelas densamente empaquetadas

Comentarios: los ejemplares se encontraron en el borde del agua atrapados por material vegetal en una pequeña laguna formada en la parte posterior de la playa cuando todavía estaban vivos y flotaban. En el momento de la observación se presentaban vientos que oscilaban entre los 15 y 25 nudos (Windguru, 2017). Se presume que por estas condiciones fueron arrastrados desde la laguna anexa a la salina a esta parte de la playa. Las salinas de Galerazamba limitan con el departamento de Bolívar, lo que corresponde al registro de detección de estos organismos más al sur.

Orden: Semaestomeae L. Agassiz, 1862

Familia: Pelagiidae Gegenbaur, 1856

Género: *Chrysaora* Péron & Lesueur, 1810

Chrysaora sp. (Fig. 2F)

Material examinado: un ejemplar (UARC-CNI 019), abril 10 de 2017, estación M1; dos ejemplares (UARC-CNI 020 y UARC-CNI 021), julio 2 de 2017, estación M1; nueve ejemplares (UARC-CNI 023, UARC-CNI 024, UARC-CNI 025, UARC-CNI 026, UARC-CNI 027, UARC-CNI 028, UARC-CNI 029, UARC-CNI 030 y UARC-CNI 031), julio 4 de 2017, estación M1; un ejemplar (UARC-CNI 032), julio 5 de 2017, estación M1

Material observado en campo: diez ejemplares nadando en la parte superficial de la columna de agua en la estación M1 (abril 11 de 2017); 65 ejemplares nadando en la parte superficial de la columna de agua en la estación M1 (julio 4 de 2017); un ejemplar varado en la orilla de la playa cerca de la estación M1 (julio 5 de 2017) (10°56'47,3"N, 75°02'17,1"O); ocho ejemplares varados y seis nadando cerca de la estación M1 (julio 9 de 2017) (10°57'2,99"N, 75°2'3,51"O), y un ejemplar varado en la playa cerca de la estación M1 (julio 23 de 2016) (10°57'0,56"N, 75°2'8,44"O)

Nueva localidad: Puerto Velero (Atlántico)

Distribución: Atlántico occidental, desde Jamaica hasta la costa norte de Argentina (Morandini, *et al.*, 2006). En el Caribe colombiano se ha registrado en Magdalena (Cedeño-Posso, 2010)

Características morfológicas: umbrella hemisférica de 61,54 ± 17,73 mm de diámetro en promedio (n=13); exumbrela de color blanco con manchas de puntos rojizos; en los ejemplares se encontraron los cuatro patrones de coloración de la exumbrela registrados en la literatura; 24 tentáculos con una medida máxima de 40 cm de largo en algunos ejemplares, tres por cada octante; ocho ropalios sin ocelos, y cuatro brazos orales con los bordes festoneados, de 58,15 ± 26,3 mm de largo

Comentarios: los ejemplares recolectados de la especie *Chrysaora* sp. eran juveniles, por lo tanto, no habían desarrollado algunos caracteres morfológicos necesarios para definir la especie. Podrían tratarse de *C. lactea* o *C. quinquecirrha*, ambas especies registradas para el Caribe.

Vale la pena destacar que el 4 de julio de 2017, en la estación de muestreo M1 (10°56'46,2"N, 75°02'18,3"O), se encontró una acumulación de 65 individuos de *Chrysaora* sp. Para esta fecha se registró un frente frío con una velocidad del viento de 15 nudos en dirección suroeste. Además, algunos ejemplares estaban acompañados por peces juveniles de la familia Carangidae, que nadaban sobre la umbrella y alrededor de los brazos orales.

Familia: Ulmaridae Haeckel, 1879

Género: *Aurelia* Lamarck, 1816

Aurelia aurita Linnaeus, 1758 (Fig. 2G)

Material examinado: tres ejemplares (UARC-CNI 022) nadando en la estación M1 (julio 4 de 2017)

Material observado en campo: 25 ejemplares varados en la playa en la estación M1 (agosto 1 de 2016); 15 ejemplares nadando en la estación M1 (octubre 29 de 2016); 238 ejemplares nadando en la estación M1 (julio 4 de 2017); dos ejemplares varados en la playa en la estación M1 y tres flotando en la playa, sin señales de movimiento, cerca del parque Caribe Aqualand (julio 9 de 2017); dos ejemplares varados en la playa en la estación M1 (septiembre 9 de 2017); siete ejemplares nadando en la columna de agua superficial en la estación M1 (septiembre 10 de 2017).

Nueva localidad: Puerto Velero (Atlántico)

Distribución: cosmopolita (Dawson & Jacobs, 2001; Schroth, *et al.*, 2002). En el Caribe colombiano se ha registrado en Magdalena, Bolívar y La Guajira (Cedeño-Posso, 2010)

Características morfológicas: umbrella hemisférica con 301 ± 80,8 mm de diámetro en promedio (n=14); campana plana con forma de cúpula, firme y transparente; cuatro anillos de gónadas de color azulado-rosa con largo y ancho promedio (54,44 ± 54,6 y 40,73 ± 13,4 mm, respectivamente), y cuatro brazos orales de 136,82 ± 42,1 mm de longitud en promedio

Comentarios: los ejemplares recolectados eran adultos y exhibían todas las características típicas de la especie. El 4 de julio de 2017 se encontró en la estación M1 una acumulación de *A. aurita* que coincidió con un frente frío registrado en el sector (velocidad de 15 nudos, dirección suroeste). Los 238 ejemplares registrados como material observado en campo fueron encontrados en una red de pesca de más de 40 m de largo por pescadores que estaban en la zona.

Clase: Cubozoa Werner, 1973

Orden: Chirodropida Haeckel, 1880

Familia: Chiropsalmidae Thiel, 1936

Género: *Chiropsalmus* Agassiz, 1862

Chiropsalmus quadrumanus (F. Muller, 1859) (Figura 2H)

Material examinado: tres ejemplares (UARC-CNI 038, UARC-CNI 039 y UARC-CNI 040), en redes de pesca, estación M2 (agosto 1 de 2017)

Nueva localidad: Playa Aguamarina (Atlántico)

Distribución: costa Atlántica de Sur América y mar Caribe (Kramp, 1961; Mianzan & Cornelius, 1999). En el Caribe colombiano se ha registrado en Magdalena (Cedeño-Posso, 2010; Cedeño-Posso & Lecompte, 2013a)

Características morfológicas: forma cúbica, con un ancho de la campana de 59,3 ± 6,6 y un largo de 39,6 ± 2 mm en promedio (n= 3); cuatro ropalios a cada lado de la campana dentro de los nichos ropaliales en forma de domo; cuatro pedalias ramificadas de 25 ± 3,5 mm en promedio, con dos patrones en el desprendimiento de los tentáculos (5-5-5-5 y 6-6-6-6); manubrio con cuatro labios, y coloración blanca con tonalidad translúcida y blanquecina

Comentario: los individuos fueron recolectados por pescadores del sector quienes los encontraron enredados en la red de fondo. Los ejemplares correspondían a ejemplares

juveniles de la especie (Dra. Ilka Straehler-Pohl, comunicación personal, febrero 1 de 2018) y, por lo tanto, no presentaban todas las características propias descritas para un adulto; los ejemplares juveniles presentan un tentáculo y llegan a tener nueve cuando alcanzan su tamaño corporal de adulto.

Discusión

Se hicieron nuevos registros para el departamento del Atlántico. Únicamente la especie *A. aurita* fue previamente registrada por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (C.R.A., 2016), probablemente porque su gran tamaño la hace más notoria y, por ende, los avistamientos pueden ser más frecuentes que los de otras especies; sin embargo, ese registro anterior no contiene la ubicación ni la fecha del avistamiento de la especie.

Con relación a la metodología empleada, ésta se centró en la recolección y observación de organismos que llegan a la línea de la costa, por lo que posteriores estudios con diversas metodologías costa afuera (chinchorros playeros, redes para peces mesopelágicos e, incluso, redes de zooplacton e ictioplancton), seguramente ayudarán a establecer la presencia de un mayor número de especies.

No se pudieron establecer correlaciones entre la presencia de medusas y los parámetros ambientales medidos *in situ* por falta de información como la proveniente de boyas oceanográficas. En el futuro sería importante contar con dichas herramientas para establecer relaciones entre las variables ambientales y los pulsos de proliferación de estos organismos. Sin embargo, se observó que el aumento en la velocidad del viento puede estar relacionado con los varamientos de estos individuos en la playa turística de Puerto Velero y en otros sectores. Se evidenció que las especies *A. aurita*, *S. meleagris* y *L. cf. lucerna* fueron arrastradas hacia a la playa, donde muchas de ellas quedaron varadas debido a velocidades del viento entre los 7,55 y 15,12 nudos (Windguru, 2017) durante octubre de 2016. En julio de 2017, las especies *A. aurita* y *Chrysaora* sp., también se vieron afectadas por vientos con velocidades que oscilaban entre los 13,67 y 18,66 nudos (Windguru, 2017).

Los estudios de línea de base y el conocimiento de las especies que se pueden encontrar localmente son una herramienta de gestión que permite tomar medidas de manejo adecuadas en cualquier lugar. El sector de Puerto Velero se proyecta como un punto de desarrollo turístico en la región, y es visitado por una gran cantidad de personas que, infortunadamente, no reconocen a estos organismos como habitantes naturales del entorno y, en muchos casos, los extraen y los dejan en la playa sin razón. Estas acciones pueden afectar la cadena trófica del ecosistema, causando un efecto dominó en otros organismos de interés comercial, como los peces, u otros que puedan ser sus depredadores naturales.

La información presentada constituye la línea de base para un mejor conocimiento y manejo de los recursos y la

biodiversidad marina, así como de la gestión en playas con vocación turística, y permite implementar planes conjuntamente con la comunidad local y los visitantes del sector.

Conclusiones

Este estudio aporta al conocimiento de la composición de las especies del subfilo Medusozoa encontradas en algunas playas turísticas del departamento del Atlántico. A pesar de que no se consideraron los parámetros ambientales locales para determinar su variación estacional, se pudo observar dónde y cuándo se presentaron proliferaciones masivas de algunas especies. En la medida en que se visiten otras localidades y se utilicen otras herramientas de observación, se espera aumentar el número de registros de especies en este sector del Caribe colombiano.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Geología, Geofísica y Procesos Marino-Costeros (GGPMC) de la Universidad del Atlántico; a la Universidad del Atlántico por la disponibilidad de los laboratorios y el uso de los estereoscopios; a José Moreno y Martha Torres por facilitarnos la instalaciones en el parque Caribe Aqualand; a Carlos Altamar por suministrarnos la fotografía de la Figura 2A y el reporte de *P. physalis* en Bocatocinos (Atlántico); a José Bustamante por la fotografía de la Figura 2C y el reporte de avistamientos de medusas; a Andre Morandini e Ilka Straehler-Pohl, por la confirmación de la cubomedusa; a la comunidad de pescadores en Puerto Velero y Aguamarina (Atlántico), y al grupo de estudiantes del GGPMC por su gran colaboración.

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Jeferson Durán-Fuentes: actividades de campo, identificación de las muestras, escritura y análisis de la información; Adriana Gracia C.: financiación del proyecto, actividades de campo, escritura y análisis de la información; Carlos Osorio M.: actividades de campo y escritura de la información; Cristina Cedeño-Posso: escritura y análisis de la información.

Referencias

- Anfuso, G., Rangel-Buitrago, N., Correa, I. (2015). Evolution of sands pits along the Caribbean Coast of Colombia: Natural and human influences. En: Randazzo, G., Jackson, D., Cooper, J.A. (Eds.), Sand and Gravel Spits. Springer, Nueva York, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-13716-2>
- Auerbach, P. (1991). Marine Envenomations. New England Journal of Medicine, **324**: 1332-1338. <https://doi.org/10.1056/NEJM199108153250707>
- Boero, F. (2013). Review of jellyfish blooms in the Mediterranean and Black Sea. Studies and Reviews. General Fisheries Commission for the Mediterranean. Rome, Italia. FAO. <https://doi.org/10.1080/17451000.2014.880790>

- Boero, F., Bouillon, J., Gravili, C., Miglietta, M.P., Parsons, T., Piraino, S.** (2008). Gelatinous plankton: Irregularities rule the world (sometimes). *Marine Ecology Progress Series*. **356**: 2993-3010. <https://doi.org/10.3354/meps07368>
- Corporación Autónoma Regional del Atlántico – C.R.A.** (2016). Atlas de Flora y Fauna Marino Costero del departamento del Atlántico. Barranquilla, Colombia. Editorial Gente Nueva. p. 282.
- Cedeño Posso, C. M.** (2010). Composición preliminar de las medusas (Cnidaria: Cubozoa y Scyphozoa) de las aguas superficiales costeras de la región de Santa Marta. Tesis de pregrado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4327.9840>
- Cedeño-Posso, C. & Lecompte, O.** (2013a). Cubomedusas (Cnidaria: Cubozoa) del mar Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*. **18**: 205-210.
- Cedeño-Posso, C. & Lecompte, O.** (2013b). Primer registro de medusas del género *Lychmorhiza* (Cnidaria: Scyphozoa: Rhizostomae: Lychmorhizidae) en el Mar Caribe Colombiano. *Biol. Invest. Mar. Cost.* **42** (2): 387-393.
- Cedeño-Posso, C.M., Suárez-Mozo, N.Y., Castaño-Gómez, J.** (2016). La medusa bala de cañón (*Stomolophus meleagris*) en Colombia, revisión de su distribución y primer reporte en el océano Pacífico. *Revista Biodiversidad Neotropical*. **6**: 221-226.
- Collins, A.G.** (2002). Phylogeny of medusozoa and the evolution of cnidarian life cycles. *Journal of Evolutionary Biology*. **15**: 418-432. <https://doi.org/10.1046/j.1420-9101.2002.00403.x>
- Collins, A.G., Schuchert, P., Marques, A.C., Jankowski, T., Medina, M., Schierwater, B.** (2006). Medusozoan phylogeny and character evolution clarified by new large and small subunit rDNA data and an assessment of the utility of phylogenetic mixture models. *Systematic Biology*. **55**: 97-115. <https://doi.org/10.1080/10635150500433615>
- Daly, M., Brugler, M.R., Cartwright, P., Collins, A.G., Dawson, M.N., Fautin, D.G., France, S.C., McFadden, C.S., Opresko, D.M., Rodríguez, E., Romano, S.L., Stake, J.L.** (2007). The phylum Cnidaria: A review of phylogenetic patterns and diversity 300 years after Linnaeus. *Zootaxa*. **1668**: 127-182. <https://doi.org/10.5281/zenodo.180149>
- Dawson, M., Jacobs, D.** (2001). Molecular evidence for cryptic species of *Aurelia aurita* (Cnidaria, Scyphozoa). *The Biological Bulletin*. **200**: 92-96. <https://doi.org/10.2307/1543089>
- Domínguez, H.** (2002). Hidromedusas y Sifonóforo (Cnidaria: Hydrozoa) de las aguas superficiales de la Bahía de Gaira, Caribe colombiano: taxonomía, abundancia y relación con la oferta alimenticia (Tesis de pregrado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano).
- Fitt, W.K. & Costley, K.** (1998). The role of temperature in survival of the polyp stage of the tropical rhizostome jellyfish *Cassiopea xamachana*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. **222**: 79-91. [https://doi.org/10.1016/S0022-0981\(97\)00139-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(97)00139-1)
- Gasca, R., Loman-Ramos, L.** (2014). Biodiversidad de Medusozoa (Cubozoa, Scyphozoa e Hydrozoa) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. **85**: 154-163. <https://doi.org/10.7550/rmb.32513>
- Haddad-Junior, V., Virga, R., Bechara, A., da Silveira, F. L., Morandini, A. C.** (2013). An outbreak of Portuguese man-of-war (*Physalia physalis* - Linnaeus, 1758) envenoming in Southeastern Brazil. *Revista Da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*. **46**: 641-644. <http://doi.org/10.1590/0037-8682-1518-2013>
- Humann, P. & Deloach, N.** (2002). Reef Creature Identification: Florida, Caribbean, Bahamas. The Reef Set (2nd ed.). Jacksonville, Florida USA: New Word Publications, Inc.
- Hummelinck, P.** (1968). Caribbean scyphomedusae of the genus *Cassiopea*. *Studies of fauna of Curaçao and other Caribbean Islands*. **23**: 1131-1143.
- Jouiaei, M., Yanagihara, A.A., Madio, B., Nevalainen, T.J., Alewood, P.F., Fry, B.G.** (2015). Ancient venom systems: A review on Cnidaria toxins. *Toxins*. **7**: 2251-2271. <https://doi.org/10.3390/toxins7062251>
- Kramp, P.L.** (1961). Synopsis of the medusae of the world. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*. **40**: 7-382.
- Marques, A.C., Collins, A.G.** (2004). Cladistic analysis of Medusozoa and cnidarian evolution. *Invertebrate Biology*. **123**: 23-42. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7410.2004.tb00139.x>
- Mianzan, H. & Cornelius, P.** (1999). Cubomedusae and Scyphomedusae. *South Atlantic Zooplankton*. **1**: 513-559.
- Mills, C.E.** (2001). Jellyfish blooms: Are populations increasing globally in response to changing ocean conditions? *Hydrobiologia*. **451**: 55-68.
- Moncaleano, A. & Niño, L.** (1979). Celenterados planctónicos de la Bahía de Cartagena, descripciones y notas ecológicas. *Boletín Museo del Mar*. **9**: 37-96.
- Morandini, A.C., Da Silveira, F.L., Cornelius, P.F.** (2006). Redescription of *Chrysaora lactea* Eschscholtz, 1829 (Cnidaria, Scyphozoa) from the Brazilian coast, with designation of a neotype. *Zootaxa*. **1135**: 29-48. <https://doi.org/10.5281/zenodo.171956>
- Otero, V.** (2012). Dermatitis acuáticas. *Revista de la Asociación Colombiana de Dermatología y Cirugía Dermatológica*. **3**: 281-284.
- Ponce, D. P. & López, E.** (2013). Medusas: las bailarinas del mar. *CONABIO Biodiversi.* **109**: 1-6.
- Posada, B. & Henao, W.** (2008). Diagnóstico de la erosión en la zona costera del Caribe colombiano. Santa Marta, Colombia. INVEMAR, Serie Publicaciones Especiales No. **13**: 34-35.
- Pontin, D. R., Cruickshank, R. H.** (2012). Molecular phylogenetics of the genus *Physalia* (Cnidaria: Siphonophora) in New Zealand coastal waters reveals cryptic diversity. *Hydrobiologia*. **686**: 91-105. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0994-8>
- Purcell, J.E., Uye, S.I., Lo, W.T.** (2007). Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: A review. *Marine Ecology Progress Series*. **350**: 153-174. <https://doi.org/10.3354/meps07093>
- Rangel-Buitrago, N., Williams, A., Anfusio, G., Árias, M., Gracia, A.** (2017). Magnitudes, sources, and management of beach litter along the Atlántico department coastline, Caribbean coast of Colombia. *Ocean and Coastal Management*. **138**: 142-157. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.01.021>
- Schroth, W., Jarms, G., Streit, B., Schierwater, B.** (2002). Speciation and phylogeography in the cosmopolitan marine moon jelly, *Aurelia* sp. *BMC Evolutionary Biology*. **2**: 1-10. <https://doi.org/10.1186/1471-2148-2-1>
- Technau, U., Genikhovich, G., Kraus, J.E.M.** (2015). Cnidaria. En: Wanninger, A. (ed.). *Evolutionary Developmental*

- Biology of Invertebrates 1: Introduction, Non-Bilateria, Acoelomorpha, Xenoturbellida, Chaetognatha. Springer-Verlag Wien. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1862-7_6
- Vera K, C., Kolbach M., Zegpi, M.S., Vera F., Lonza J.** (2004). Picaduras de medusas: actualización. Revista Médica de Chile. **132**: 233-241. <https://doi.org/10.4067/S0034-98872004000200014>
- Windguru.** (2017). The windguru.cz / windguru.com server. Fecha de consulta: octubre del 2016 a agosto del 2017. Disponible en: <http://www.windguru.cz>
- WoRMS.** (2017). The World Register of Marine Species aims to provide the most authoritative list of names of all marine species globally, ever published. Fecha de consulta: febrero y diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.marinespecies.org/>
- Yanagihara, A. A., Kuroiwa, J. M. Y., Oliver, L. M., Kunkel, D. D.** (2002). The ultrastructure of nematocysts from the fishing tentacle of the Hawaiian bluebottle, *Physalia utriculus* (Cnidaria, Hydrozoa, Siphonophora). *Hydrobiologia*. **489**: 139-150. <https://doi.org/10.1023/A:1023272519668>

Plantas utilizadas como tiendas por murciélagos tenderos en la selva pluvial central del Chocó, Colombia

Yucely del Carmen Copete-Mosquera^{1,*}, Yinerla Rentería-Machado¹, Leison Palacios-Mosquera¹,
Hugo Mantilla-Meluk^{1,2}, Alex Mauricio Jiménez-Ortega¹

¹ Grupo de Investigación en Manejo de Fauna Silvestre Chocoana, Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia

² Programa de Biología, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Resumen

La selección de hojas para la construcción de tiendas por parte de algunas especies de murciélagos frugívoros de la familia Phyllostomidae es uno de los ejemplos más interesantes de la relación entre planta y animal. Las especies de plantas utilizadas para este fin están determinadas, en gran medida, por la región biogeográfica que habitan las especies. El objetivo de este estudio fue describir los patrones de selección y utilización de plantas como tiendas por murciélagos que acampan en hojas en la selva pluvial central del Chocó, Colombia. Para ello se hicieron muestreos en bosques primarios de la localidad de Pacurita, en el municipio de Quibdó. La búsqueda y la localización de las tiendas se hicieron en recorridos al azar en el interior del bosque a lo largo de senderos naturales, caminos y orillas de quebradas. Cada tienda localizada se georreferenció, y la especie de las plantas utilizadas se registró, así como la altura desde el suelo, el estado de habitabilidad, la ocupación y la temperatura (registrada con un termómetro laser). Las tiendas se clasificaron según su arquitectura, y en los que estaban habitados se hicieron capturas de ejemplares con redes manuales. Se registraron 114 tiendas en 12 especies de plantas, siendo la palma *Attalea allenii* la más utilizada. Se reporta por primera vez la utilización de *Vismia laevis*, *A. allenii*, *Iriarte deltoidea*, *Aniba puchury minor* y *Heliconia atratensis* en tiendas de los tipos bifido (65,8 %), apical (20,1 %), cónico (11,4 %) y bote (2,6 %). Se encontraron cuatro tiendas habitadas, en las cuales se capturaron siete individuos de *Dermanura rosenbergi*. Los resultados sugieren que el tipo de tienda está más relacionado con la especie de planta que con la de los murciélagos, ya que *D. rosenbergi* se encontró en varios tipos de tiendas, en tanto que en cada especie de planta solo se registró un tipo de tienda. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Murciélagos; *Dermanura*; Palmas; Quiropteros; Tiendas.

Plants used as refuge by bats in the central rainforest of Chocó, Colombia

Abstract

The selection of leaves in the construction of shelters by some species of frugivorous bats of the Phyllostomidae family is one of the most interesting examples of plant-animal relationship. The species of plants used as refuges are largely determined by the biogeographic region inhabited by the bats. The objective of the present study was to describe the patterns of selection and utilization of plants as shelters by these bats in the central rainforest of Chocó, Colombia. We took samples in primary forests in the locality of Pacurita, municipality of Quibdó, Chocó. We searched and located refuges during random walks inside the forest along natural trails, roads and streams. We georeferenced each refuge, and we described the species of plant used, the height from the soil, as well as the habitability, occupation and temperature, which was registered using a laser thermometer; we classified the refuges according to their architecture. In inhabited refuges the catches were made manually. We recorded 114 refuges in 12 species of plants. We documented for the first time the use of *Vismia laevis*, *Attalea allenii*, *Iriarte deltoidea*, *Aniba puchury minor* and *Heliconia atratensis* as refuges, the palm *A. allenii* being the most used. We found four types of architecture: bifid (65.8%), apical (20.1%), conical (11.4%) and boat (2.6%). Our results suggest that the type of refuge relates more to the species of plant than to the species of bat, since we found *D. rosenbergi* inhabiting several types of refuges, while in each species of plant we registered only one type of refuge. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Bats; *Dermanura*; Palms; Shopkeepers.

*Correspondencia:

Yucely del Carmen Copete-Mosquera, yucacomo@gmail.com

Recibido: 21 de noviembre de 2017, **Aceptado:** 05 de marzo de 2018, **Editor:** Jairo Castaño Zapata

Introducción

La selección de tiendas diurnas con condiciones microclimáticas adecuadas, que proporcionen un ambiente térmicamente estable y minimicen las fluctuaciones de las variables ambientales, es de vital importancia para los murciélagos (Kunz & Lumsden, 2003), ya que estos pasan la mayor parte del día descansando en sus tiendas diurnas, lo que constituye un evento importante en su ecología y evolución (Kunz, 1982). Las tiendas diurnas proveen a los murciélagos sitios para su alimentación, reproducción, hibernación y crianza, además de ser espacios que promueven las relaciones sociales entre los miembros de la población y brindan protección contra los depredadores. Las tiendas utilizadas por los murciélagos incluyen grietas en rocas, cuevas, árboles huecos y edificaciones humanas. Algunas especies de murciélagos pertenecientes a la familia Phyllostomidae se caracterizan por modificar las hojas de las plantas, o partes de ellas, para construir tiendas (Rodríguez & Medellín, 2007). Se sabe de al menos 17 especies de filostómidos que construyen tiendas, 13 de las cuales están presentes en Colombia (Rodríguez & Medellín, 2007), país que posee la mayor diversidad de especies en este grupo (Mantilla-Meluk, et al. 2009).

A pesar de que los murciélagos tenderos corresponden a una fracción importante de la diversidad de quirópteros de Colombia, hasta ahora no se habían hecho estudios sobre su ecología en la selva pluvial central del Chocó, región que se ha considerado como una de las más diversas en quirópteros en el Neotrópico, por lo que ha sido propuesta como “Área de Importancia para la Conservación de Murciélagos” (AICOM) en esta parte del planeta (Mantilla-Meluk, 2012). En este estudio se documentan las especies de plantas utilizadas por los murciélagos tenderos en la construcción de tiendas en la selva pluvial central del Chocó, al tiempo en que se analizan los tipos de construcción y las especies de plantas asociadas con ellos.

Materiales y métodos

El trabajo de campo se desarrolló entre abril y julio de 2010 en tres sitios de muestreo en zonas de bosque primario: Cabí, quebrada Los Puercos y quebrada La Honda, en el corregimiento de Pacurita, municipio de Quibdó (34° 0' 00" N, 68° 54' 5" O; 53 msnm), ubicado en la selva pluvial central del Chocó. El área presenta una precipitación de 7.776 mm, una temperatura media de 26 °C y un balance hídrico de perhúmedo a superhúmedo (248,9 a 385,8) (Poveda, et al., 2004).

Búsqueda y clasificación de las tiendas. La búsqueda de tiendas se efectuó siguiendo la metodología reportada por Kunz & McCracken (1996) y Chaverri & Kunz (2006) consistente en muestreos extensivos al azar en el interior del bosque a lo largo de senderos naturales, caminos y orillas de quebradas. Las tiendas se clasificaron según su arquitectura como bífidos, apicales, cónicos, y botes (Figura 1) (Rodríguez & Medellín, 2007). Se registró la especie

de planta utilizada en cada tienda, la temperatura interna medida con un termómetro láser marca Brixco (rango: 35 – 230 °C, precisión: 0,1 °C), la altura con respecto al suelo de la hoja modificada medida con un flexómetro profesional de 12,5 mm x 50 m, la posición espacial registrada mediante un GPS Garmin Colorado® 400, y el estado de ocupación. Todas las tiendas se fotografiaron.

Identificación del material vegetal. Para la determinación taxonómica de las plantas utilizadas por los murciélagos en la construcción de tiendas, se hicieron recolecciones botánicas siguiendo la metodología empleada por Mahecha (1997). Se documentó la altura total de cada uno de los ejemplares recolectados para determinar su influencia en los tipos de tienda y en las especies de plantas. La identificación del material vegetal recolectado se hizo con las claves taxonómicas de Gentry (1993) y Mahecha (1997), utilizando publicaciones especializadas en diferentes grupos botánicos (Forero & Gentry, 1989; Mahecha, et al. 1984; Rangel & Petter, 2004), y comparándolo con material de referencia del Herbario “CHOCÓ” de la Universidad Tecnológica del Chocó.

Identificación de murciélagos. Los individuos observados en tiendas se capturaron con redes manuales y se depositaron en bolsas de tela numeradas para su transporte y posterior registro de los datos morfológicos de cada ejemplar (medidas). Para la determinación taxonómica se recurrió a la bibliografía especializada (Rodríguez & Wilson, 1999; Tirira, 2007; Gardner, 2007a; Aguirre, et al., 2009) y a la comparación con material de referencia de la Colección Teriológica y Ornitológica del Grupo de Investigación en Manejo de Fauna Silvestre Chocoana de la Universidad Tecnológica del Chocó. Los ejemplares capturados se



Figura 1. Tipos de tiendas y especies de plantas en las que se registraron los murciélagos: **A)** Bífido en *Iriarte deltoidea*. **B)** Apical en *Cyclantus bipartitus*. **C)** Bote en *Philodendron fragrantissimum*. **D)** Cónico en *Nectandra* sp.

conservaron en el sistema piel-cráneo, siguiendo los protocolos de preparación descritos por **Handley** (1988) y **Simmons & Voss** (2009).

Relación entre los tipos de tiendas y las especies de plantas utilizadas por murciélagos tenderos. Se hizo un análisis de correspondencia simple, con el fin de determinar la relación entre los tipos de tienda y las especies de plantas utilizadas por los murciélagos que acampan en hojas, y uno de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias de las variables de temperatura interna y altura del suelo de los diversos tipos de tiendas. Ambos análisis se realizaron en los programas PAST, versión 2.17, (**Hammer, et al.**, 2001) y Rwizard (**Guisande**, 2015).

Resultados

Se registraron 114 tiendas en 12 especies de plantas agrupadas en siete familias (Tabla 1). Se reportan por primera vez las especies *Attalea allenii*, *Vismia laevis*, *Iriarte deltoidea*, *Aniba puchury minor* y *Heliconia atratensis* como especies de plantas modificadas por murciélagos para su uso como tienda.

En cinco especies de la familia Arecaceae se encontraron 90 tiendas, lo que representa el 78,95 % del total de las tiendas documentadas. Cabe destacar que una especie de la mencionada familia, *A. allenii*, presentó 70 registros. En dos especies de la familia Lauraceae se encontraron cinco tiendas, mientras que las familias restantes estuvieron representadas por una sola especie. Todas las especies de plantas, excepto *A. allenii*, presentaron registros relativamente bajos, entre uno y ocho tiendas (Tabla 1).

Se documentaron cuatro tipos de arquitectura de tiendas (Figura 1), siendo las bifidas las de mayor frecuencia, con 75 registros (65,79 %), 57 de los cuales correspondieron

a la especie *A. allenii*; las tiendas de tipo apical correspondieron al 20,1 %, los de tipo cónico, 11,4 %, en tanto que solo se encontraron tres tiendas de tipo bote (Tabla 1). Se constató una relación significativa entre el tipo de tienda y las especies de plantas utilizadas mediante un análisis de correspondencia simple que evidenció que las tiendas de tipo bífido se asociaban con las palmas *A. allenii*, *Wittinia quinaria*, *Welfia regia* y *Asteroginea martiana*; por su parte, las tiendas cónicas se asociaron a *V. laevis*, *Nectandra* sp y *A. puchury minor*, los apicales con *Philodendros fragrantissimum*, *Iriartea deltoidea*, *Calathea* sp., y, por último, los de tipo bote, con *H. atratensis* y *Cyclanthus bipartatus* (Figura 2).

De las 114 tiendas reportadas en este estudio, solo cuatro se encontraron ocupados por murciélagos en el momento del avistamiento, y solo en tres de estos fue posible la recuperación de los siete individuos encontrados, todos de la especie *D. rosebergi*, identificados con los siguientes números de recolección: CMCH000949, CMCH000828, CMCH000829, CMCH000830, CMCH000831, CMCH000750 y CMCH000759 (Tabla 2). Estos especímenes corresponden a los primeros registros de esta especie de murciélago frugívoro en el Chocó biogeográfico, y también es la primera vez que se registra la fabricación de tiendas por parte de esta especie.

En lo que respecta a las diferencias estadísticas entre las alturas desde el suelo de los distintos tipos de tiendas, estas fueron significativas en las tiendas cónicas con relación a los otros tipos: bote ($p = 0,006$), bífido ($p = 0,02$), y apical ($p = 0,004$), los cuales presentaron alturas medias de 1,40 m y 3,39 m, respectivamente, mientras que no hubo diferencias estadísticamente significativas en el caso de las tiendas de tipo bífido y apical (Tabla 3, Figura 3). Tampoco

Tabla 1. Lista de las especies de plantas y abundancia de los tipos de tiendas de murciélagos encontrados en la selva pluvial central del Chocó

Familia	Especies Plantas	Bífida	Apical	Bote	Cónica	Total	%
Arecaceae	<i>Wettinia quinaria</i>	5	0	0	0	5	4,39
	<i>Attalea allenii</i>	57	13	0	0	70	61,40
	<i>Asterogynemartiana</i>	7	1	0	0	8	7,02
	<i>Welfia regia</i>	6	0	0	0	6	5,26
	<i>Iriartea deltoidea</i>	0	1	0	0	1	0,87
Araceae	<i>Philodendros fragrantissimum</i>	0	1	0	0	1	0,87
Cyclantaceae	<i>Cyclanthus bipartitus</i>	1	1	2	0	4	3,50
Hipericaceae	<i>Vismia laevis</i>	0	0	0	7	7	6,14
Heliconeaceae	<i>Heliconia atratensis</i>	0	4	1	0	5	4,39
Lauraceae	<i>Aniba puchury minor</i>	0	0	0	1	1	0,87
	<i>Nectandra</i> sp	0	0	0	4	4	3,50
Marantaceae	<i>Calathea</i> sp	0	2	0	0	2	1,70
	Total	75	23	3	12	114	
	%	65,79	20,17	2,63	10,53		

se encontraron diferencias significativas cuando se analizó la relación entre el tipo de tienda y su temperatura interna (Figura 4).

Discusión

Los filostómidos son endémicos del neotrópico, y Colombia es el país con mayor riqueza en este grupo (Solari, *et al.*, 2013). El conocimiento de las características de los sitios usados para el descanso, tales como su temperatura media y humedad relativa, son relevantes, ya que estos factores abióticos influyen de forma importante en la selección de tiendas y en las tasas metabólicas, así como en la termorregulación y el desarrollo de los embriones y las crías. Su importancia se manifiesta en el hecho de que varias especies de murciélagos muestran preferencias por temperaturas y humedades específicas en sus sitios de descanso (Torres & López, 2010)

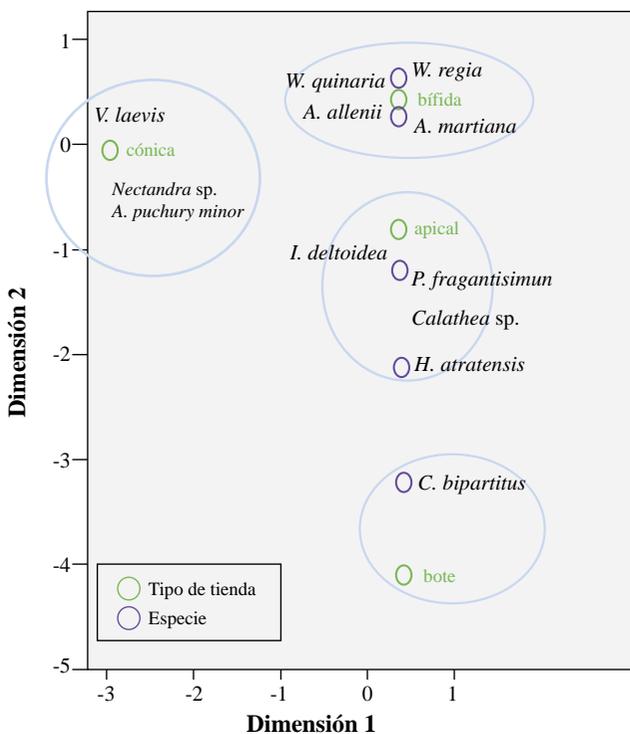


Figura 2. Relación entre los tipos de tiendas y las especies de plantas utilizadas por murciélagos que acampan en hojas en la selva pluvial central del Chocó, Colombia

En la construcción de las tiendas los murciélagos recurren generalmente a hojas de plantas que modifican mediante cortes sobre las nervaduras, con lo cual producen dobleces que los protegen de la lluvia y el sol, y les permiten, además, una mejor regulación de la temperatura corporal (Kunz & Lumsden, 2003). Al ser la tienda un sistema mecánicamente dinámico, los movimientos bruscos producidos por potenciales depredadores alertan a los murciélagos sobre su presencia. Las tiendas, además, constituyen un elemento de selección sexual, pues en la mayoría de las especies de murciélagos que acampan en hojas es el macho quien está a cargo de la construcción de la tienda para reclutar en él un harem de hembras (Rodríguez-Herrera & Medellín, 2007). Todos las especies de este tipo de murciélagos son frugívoras y, por ende, potenciales dispersores de semillas, con un aporte importante en los procesos de regeneración y restauración de los bosques (Gardner, 1977b).

El tipo de tienda, al igual que las plantas utilizadas en su construcción, puede estar condicionado por rasgos morfológicos o fisiológicos característicos de las especies de murciélagos que acampan en hojas (Rodríguez, *et al.*, 2007). Es así como la selección de ciertos tipos de especies vegetales, o de la arquitectura de la tienda, son aspectos importantes de la ecología de las especies de murciélagos que acampan en hojas e, incluso, pueden llegar a determinar sus patrones de distribución (Avila & Medellín, 2004; Fenton, *et al.*, 2000).

En el Neotrópico se han registrado 77 especies de plantas modificadas como tiendas, agrupadas en 41 géneros y 18 familias, la mayoría nativas de esta región. Las familias Araceae y Arecaceae, conocidas comúnmente como palmas, agrupan el 55 % del total de especies usadas en la construcción de tiendas, con 21 especies cada una (Rodríguez-Herrera, *et al.*, 2007). En general, las plantas usadas como tiendas son monocotiledóneas, y alrededor de 20 % son epífitas. La mayoría de ellas pertenecen a los bosques húmedos de tierras bajas, con excepción de algunas epífitas que llegan hasta los bosques nubosos.

El papel de las palmas en los ecosistemas se refleja en las múltiples interrelaciones que ocurren entre ellas y la fauna. Bernal & Galeano (1993) señalan que las palmas proveen alimento y refugio a una gran cantidad de especies animales, muchas de los cuales, a su vez, actúan como polinizadoras o dispersoras de semillas. De las 17 especies reportadas como murciélagos que acampan en hojas, 12 utilizan palmas

Tabla 2. Murciélagos recolectados en tiendas en la selva pluvial central del Chocó

Especie de murciélago	Sexo y abundancia	Planta utilizada	Tipo de tienda	Estado/tienda	Altura de la tienda(metros)	Temperatura (°C)
<i>Dermanura rosenbergii</i>	1M	<i>Asterogyne martiana</i>	Bífida	Nueva	0,80	32
	3H-1M	<i>Philodendron fragrantissimum</i>	Bote	Nueva	2,20	30
	2H	<i>Attalea allenii</i>	Bífida	Nueva	3,00	32

H=hembras, M=machos

Tabla 3. Lista de los tipos de tiendas, su altura del suelo (media) y sus medidas promedio (rango)

Tipo de tiendas	Media (m)	Rango
Bífida	2,21	(0,5 - 5,0)
Apical	2,11	(0,8 - 3,4)
Cónica	3,39	(1,8 - 5,1)
Bote	1,40	(1,1 - 1,6)

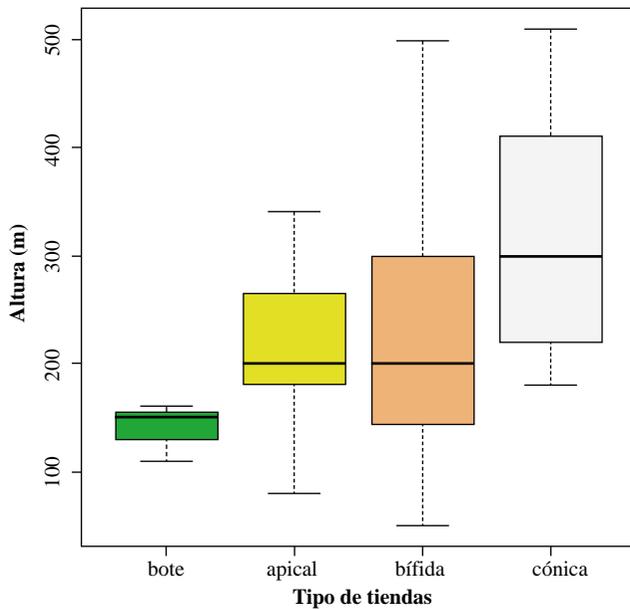


Figura 3. Diferencias estadísticas entre las alturas (m) con respecto al suelo de cada tipo de tienda utilizado por murciélagos

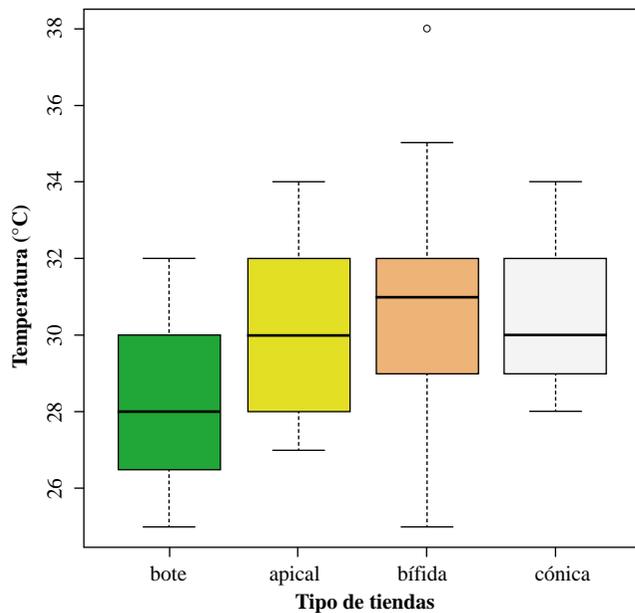


Figura 4. Relación entre las temperaturas de los distintos tipos de tienda ($p=0,3424$)

como tiendas. Cinco de las especies registradas como tiendas de murciélagos en los muestreos correspondieron a palmas (*A. allenii*, *W. quinaria*, *A. martiana*, *W. regia* y *I. deltoidea*), y el 78,95 % de las tiendas se encontraron en estas especies de palmas durante el desarrollo del estudio. Algunos autores sugieren que el uso de las palmas obedece a que estas son más abundantes en los bosques tropicales y comunes en sotobosque, y que, además, el diseño de sus hojas presenta ventajas para la elaboración de tiendas, lo cual implica un menor gasto energético para los murciélagos en la localización y construcción de sus tiendas (Bernal & Galeano, 1993; Rodríguez, *et al.*, 2007).

Estudios realizados por Kunz & Lumsden (2003) demuestran que la variedad de arquitecturas de tiendas que los murciélagos pueden construir se basa en el tamaño y la forma de la hoja en combinación con el número de cortes. En este estudio se encontraron asociaciones entre el tipo de tienda y las especies de plantas utilizadas. Las tiendas bífidas fueron el tipo de construcción más frecuente, lo cual se relaciona con su mayor frecuencia en las especies de la familia *Arecaceae*. Este dato concuerda con lo hallado por Rodríguez & Medellín (2007), quienes señalan, además, que estas especies de plantas son relativamente comunes en sotobosques de bosques maduros. Stoner (2000), quien estudió las características de las tiendas bífidas, encontró que los murciélagos prefieren palmas con peciolo más altos, hojas de mayor tamaño y vena central gruesa, características que se observaron en las especies de plantas en las cuales se capturaron los murciélagos durante nuestro estudio.

Rodríguez & Medellín (2007) sugieren que las tiendas cónicas están a más de 2 m de altura, mientras que Brooke (1990) ha sugerido que los otros tipos de tiendas (bote, bífido, apical) se suelen encontrar entre 1 y 1,5 m de altura. Los datos de este estudio confirman estas diferencias entre las tiendas cónicas y los otros tipos, las cuales se deben a la altura de la especie de planta usada en cada tipo de construcción, ya que las especies arbustivas utilizadas para las tiendas cónicas son de mayor altura que las utilizadas para las de tipo bote, cónico y bífido. En cambio, no se encontraron diferencias en la altura de la construcción de las tiendas bífidas y apicales, lo cual concuerda con los hallazgos de estudios previos que sugieren una altura máxima de 2 m para estas tiendas por encontrarse en los primeros estratos del bosque.

En cuanto a la temperatura de las tiendas, no se encontraron diferencias significativas entre aquellos documentados. Nuestros datos concuerdan con los de Rodríguez & Medellín (2007), quienes señalan que en las regiones tropicales las variaciones diarias y anuales de la temperatura son mucho menos críticas que en las zonas templadas, lo cual significa que la termorregulación ejerce una menor presión en los murciélagos a la hora de seleccionar sus tiendas.

La captura de murciélagos en tiendas con jama entomológica no fue tan efectiva como se esperaba, debido a la dificultad de acceder a estos antes de que los murciélagos

huyeran. En este estudio se identificó la especie *D. rosenbergii* como restringida al Chocó biogeográfico (Hooper, *et al.*, 2008), y se la reporta por primera vez habitando dos tipos de tiendas.

La determinación de las especies de plantas utilizadas como tiendas por murciélagos es de gran importancia para la conservación del ambiente que habitan. En Latinoamérica, factores como la deforestación y la fragmentación de los bosques constituirían las principales amenazas y causas de la desaparición de los refugios de muchos animales, incluidos los murciélagos (Medellín, *et al.*, 2000). Los bosques del Chocó están afectados principalmente por actividades como la extracción maderera y la minería, las cuales cambian la estructura del bosque natural, caracterizado por su complejidad, su particularidad y su diversidad (Ramírez & Ledezma, 2007). Los murciélagos que acampan en hojas pueden considerarse especialistas en lo que respecta a la selección de refugios, dado que algunas especies los utilizan únicamente para su descanso y que, en la mayoría de los casos, los construyen en unas pocas especies de plantas con características específicas, por lo que enfrentan amenazas de extinción más graves que las especies generalistas (Rodríguez & Medellín, 2007), característica que permitiría considerarlas como especies indicadoras del estado de conservación del ambiente.

Agradecimientos

Se expresan los más sinceros agradecimientos a la Universidad Tecnológica del Chocó, en especial al Grupo de Investigación en Gestión y Manejo de la Vida Silvestre del Chocó, por brindar los medios para el desarrollo de este estudio. A la comunidad local de Pacurita por su hospitalidad y ayuda durante el trabajo de campo, y a los revisores que con sus aportes permitieron perfeccionar lo aquí expuesto.

Contribución de los autores

YCCM y YRM: estructuración del documento, revisión de la literatura, levantamiento de datos en campo, preservación y montaje del material en el laboratorio, identificación taxonómica, análisis estadísticos, redacción del manuscrito, proceso editorial. LPM: levantamiento de datos en campo, revisión de la literatura, análisis de datos, redacción del manuscrito. AMJO y HMM: análisis de la información, revisión y redacción del manuscrito

Conflicto de intereses

Los autores declaramos no tener ningún conflicto de intereses que pudiera influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación del manuscrito.

Referencias

Aguirre, L.F., Vargas, A. Solari, S. (2009). Clave de campo para la identificación de los murciélagos de Bolivia. Centro de estudio en biología teórica y aplicada. Cochabamba, Bolivia. p. 38.

- Ávila, R., Medellín, R.A. (2004). Ecological, taxonomic and physiological correlates of cave use by Mexican bats. *Journal of Mammalogy*. **85**: 675-687.
- Bernal, R., Galeano, G. (1993). Palmas del Andén Pacífico. En: Colombia Pacifico Tomo I, Leyva P, editor. Editorial del Fondo FEN, Colombia, Bogotá. p. 220-231.
- Brooke, A.P. (1990). Tent selection, roosting ecology and social organization of the tent-making bat, *Ectophylla alba*, in Costa Rica. *Journal of Zoology*. **221**: 1-19.
- Chaverri, G., Kunz, T.H. (2006). Roosting ecology of the tent-roosting bat *Artibeus watsoni* (Chiroptera: Phyllostomidae) in Southwestern Costa Rica. *Biotropica*. **38**: 77-84.
- Fenton, M.B., Vonhonn, M.J., Bouchard, S., Gill, A. (2000). Roosts used by *Sturnira lilium* (Chiroptera: Phyllostomidae) in Belize. *Biotropica*. **32**: 729-733.
- Forero, E., Gentry, A. (1989). Lista anotada de las plantas del departamento del Chocó, Colombia. Biblioteca José Jerónimo Triana. No. **10**: 1-142.
- Gardner, A. (2007a). Mammals of South America, Volume 1: Marsupials, Xenarthrans, Shrews, and Bats. University of Chicago Press, Illinois. p. 187-484.
- Gardner, A. (1977). Feeding habits. p. 293-350. En: Baker RJ, Jones JK, Carter, DC. Biology of bats of the New World Family Phyllostomidae. Part II. Special Publications, Museum Texas Tech University. **13**: 1-364.
- Gentry, A. (1993). A field guide to the families and genera of woody plants of northwest South America (Colombia, Ecuador, Perú), with supplementary notes on herbaceous taxa. Conservation International, Washington. p. 920.
- Guisande, C. (2015). StatR. Disponible en: <http://www.ipez.es/RWizard>
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T, Ryan, P.D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*. **4** (1): 9. Disponible en: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Handley, C.O. Jr. (1988). Specimen preparation. p. 437-457. En: Ecological and behavioral methods for the study of bats. TH Kunz, editor. Smithsonian Institution Scholarly Press, Washington DC.
- Hooper, S.R., Solari, S., Larsen, P.A., Bradley, R.D., Baker, R.J. (2008). Phylogenetics of the fruit-eating bats (Phyllostomidae: Artibeina) inferred from mitochondrial DNA sequences. *Occasional Papers, Museum of Texas Tech University*. **277**: 1-15
- Kunz, T.H. (1982). Roosting ecology of bats. En: Ecology of bats. TH Kunz, editor. Plenum Press, New York. **425**: 1-55.
- Kunz T.H., McCracken, G.F. (1996). Tents and harem: Apparent defense of foliage roosts by tent-making bats. *Journal of Tropical Ecology*. **12**: 121-137.
- Kunz, T.H., Lumsden L.F. (2003). Ecology of cavity and foliage roosting bats. En: Bat ecology. TH Kunz y MB Fenton, editores. The University of Chicago Press, Chicago. p. 3-89.
- Mahecha, G., Rodríguez, R., Acero, L. (1984). Estudio dendrológico de Colombia. IGAC, Bogotá. p. 282.
- Mahecha, G. (1997). Fundamentos y metodologías para la identificación de plantas. Proyecto Biopacífico, Ministerio del Medio Ambiente, GEF-PNUD, Lerner Ltda., Bogotá. p 285.
- Rodríguez-Rocha, M., C. Gómez, H. Mantilla-Meluk. (2012). Murciélagos con evidencia de comportamiento migratorio en Colombia, uso de agroecosistemas y notas sobre su

- conservación. Pp. 97-128. En: Agroecosistemas beneficiosos para las especies migratorias de Colombia. Gómez, C. y J. M. Díaz (Eds). Informe final del Convenio 044 del 2012 entre SELVA: Investigación para la Conservación en el Neotrópico y la UPRA (Unidad de Planificación de Tierras Rurales, Adecuación de Tierras y Usos Agropecuarios) del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá, Colombia.
- Medellín, R.A., Equihua, M. Amin, M.A.** (2000). Bat diversity and abundance as indicators of disturbance in Neotropical rainforests. *Conservation Biology*. **14**: 1666-1675.
- Poveda, I.C., Rojas, C. Rudas A., Rangel, J.O.** (2004). El Chocó biogeográfico: ambiente físico. En: Rangel-Ch JO. Editor. Colombia Diversidad Biótica IV: El Chocó biogeográfico/ Costa Pacífica. Bogotá DC: Universidad Nacional de Colombia. p. 1-22.
- Ramírez, G. & Ledezma, E.** (2007). Efectos de las actividades socio-económicas (minería y explotación maderera) sobre los bosques del departamento del Chocó. *Biodiversidad, Revista Institucional Tecnológica del Chocó*. **26**: 58-65.
- Rangel, O.J.** (2004). Colombia diversidad biótica IV: El Chocó Biogeográfico/Costa Pacífica. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. Ed. UNAL, p. 998
- Solari, S., Muñoz, Y., Rodríguez, J. V.** (2013). Riqueza, endemismo y conservación de los mamíferos de Colombia. *Mastozool Neotrop.* **20** (2): 301-65.
- Rodríguez, B., Medellín, R.A., Timm, R.M.** (2007). Murciélagos neotropicales que acampan en hojas/Neotropical tent-roosting bats. Costa Rica. Instituto Nacional de Biodiversidad, INBio. p. 19 -169.
- Rodríguez, B., Wilson, D. E.** (1999). Lista y distribución de la especies de murciélagos de Costa Rica. *Occasional Papers Conservation. Biological, Conservation International*. **9**: 1-34.
- Rodríguez, B., Medellín, R.** (2007). Murciélagos neotropicales que acampan en hojas/Neotropical tent-roosting bats. Instituto Nacional de Biodiversidad. Santo Domingo de Heredia, Costa Rica. p 19-178
- Simmons, N.B. & Voss, R.S.** (2009). Collection, preparation, and fixation of specimens and tissues. En: *Ecological and behavioral methods for the study of bats*, 2nd Edition. T. H. Kunz y S. Parsons. Editores. Johns Hopkins University Press. Baltimore. p. 901.
- Stoner, K.** (2000). Leaf selection by the tent-making bat *Artibeus watsoni* in *Asterogyne martiana* palms in southwestern Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*. **16**: 151-157.
- Tirira, D.** 2007. Guía de campo de los mamíferos del Ecuador. *Mastozoología Neotropical*. **14**: 299-302.
- Torres, J.W. & López, R.** (2010). Microclimatic conditions, roosting habits, and associated species to refuges of *Natalus stramineus* in México. *Acta Zoológica Mexicana*. **26**: 191-213.

Diversidad y composición de licofitas y polypodiopsidas del páramo de Anaime, Cajamarca, Tolima, Colombia

Lina Marcela Vargas Gaviria, Derly Astrid Buitrago, Héctor Eduardo Esquivel*

Grupo de Investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales – GIBDET,
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Resumen

Se hizo el estudio sobre la diversidad y la composición de licofitas y polypodiopsidas del páramo de Anaime, ubicado a 4°15' N y 75°33' O, en la cordillera Central de Colombia, en un área entre los 3.200 y los 3.900 m.s.n.m., en el municipio de Cajamarca. En cinco salidas de campo se hizo el levantamiento de 16 parcelas (12 x 4,5 m). El registro de las especies y los individuos se realizó considerando las coberturas vegetales y el hábito de crecimiento. El material vegetal se procesó en el Herbario de la Universidad del Tolima (TOLI). La determinación se hizo con el apoyo de claves taxonómicas, bases de datos, la colección del TOLI y del Herbario Nacional Colombiano. En el análisis de la diversidad de especies se aplicaron los índices de riqueza de Margalef, de dominancia de Simpson y de diversidad de Shannon-Weiner. En total se registraron 50 especies distribuidas en 14 familias y 25 géneros; la familia Lycopodiaceae fue la mejor representada con 14 especies. La parcela P16 registró el mayor valor de riqueza ($Mg=3,42$); según el índice de Shannon-Weiner, las parcelas P16 y P1 tuvieron la mayor diversidad ($H'=3,42$; $H'=2,95$), y según el índice de Simpson, las parcelas P9 y P14 registraron la mayor dominancia ($\lambda=0,86$). En el presente estudio se registró un incremento de 43 especies con respecto al trabajo realizado por Guerrero & Vargas (2008), así como 25 nuevos registros para el Tolima. También se divulgó en la comunidad el catálogo elaborado, el cual contribuirá a la conservación de este páramo. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Páramo; Anaime; Licofitas; Polypodiopsidas; Diversidad; Conservación.

Diversity and composition of lycophytes and polypodiopsida of the páramo de Anaime, Cajamarca, Tolima, Colombia

Abstract

We conducted a study on the diversity and composition of lycophytes and polypodiopsida of the páramo of Anaime, which is located between 4°15' N and 75°33' W on the Central mountain range of the Colombian Andes. The area under study is located between 3200 – 3900 meters above sea level in the municipality of Cajamarca. We set-up 16 plots (12m x 4.5m) in five field trips. We recorded species based on the vegetation cover and substrate classes, while the vegetal material was processed in the Universidad of Tolima Herbarium (TOLI). Species were determined using botanical keys, and the databases of TOLI and the National University Herbarium (COL). For the analysis of species diversity, we applied the Margalef index of richness, for the dominance, the Simpson index and for the diversity, the Shannon-Weiner index. We registered 50 species belonging to 14 families and 25 genus; the Lycopodiaceae family was the most representative with 14 species, and plot P16 had the highest value of species richness ($Mg=3.42$). According to the Shannon-Weiner index plots P16 and P1 had the highest diversity values ($H'=3,42$; $H'=2,95$), and according to Simpson's index plots P9 and P14 had the greatest dominance ($\lambda=0.86$). We registered an increase of 43 species compared to those registered by Guerrero & Vargas (2008), and 25 new records for Tolima. The communication of this study in the community also included the catalog we developed, which will contribute to the conservation of the páramo. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Páramo; Anaime; Lycophytes; Polypodiopsida; Diversity; Conservation.

Introducción

En las partes más altas de las montañas andinas, entre el límite superior de los bosques y el límite inferior de las zonas nivales, se encuentran los páramos, ecosistemas complejos y variados, endémicos de los Andes tropicales venezolanos, colombianos, ecuatorianos y peruanos (Ministerio del Medio Ambiente, 2002). Los páramos neotropicales se

ubican a una altitud que va de los 3.000 a los 5.000 m.s.n.m., y se caracterizan por una temperatura media anual entre los 4 y los 10 °C, así como por notables variaciones en la

*Correspondencia:

Héctor Eduardo Esquivel, hesquive@ut.edu.co

Recibido: 16 de diciembre de 2017

Aceptado: 7 de marzo de 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

temperatura diaria; presentan suelos ricos en materia orgánica, con alta capacidad de agua, pH ácido y bajo contenido de fósforo disponible (Guerrero & Vargas, 2003). En los ecosistemas de páramo es frecuente la presencia de licofitas y polypodiopsidas (equisetos y helechos), lo cual amerita el interés por conocer su composición y diversidad dada su importancia para los análisis de filogenia. Los páramos se han visto afectados por diversas actividades antrópicas como el pastoreo, la transformación del hábitat por los cultivos y de las condiciones ambientales debido al cambio climático provocado por el hombre (Van der Hammen, 1998), lo cual ha provocado la pérdida del hábitat de algunas especies de plantas y animales, y la desecación de pantanos y turberas (Rangel, 2000). En épocas de crisis como la actual, en la cual la biodiversidad está seriamente amenazada en Colombia, es esencial hacer inventarios que permitan su conocimiento, cuantificación y análisis, para así generar un programa de conservación y uso sostenible de los recursos.

Los análisis moleculares han demostrado que las pteridofitas son un grupo parafilético compuesto por dos grupos monofiléticos distintos, las licofitas (caracterizadas por poseer microfilos) y las monilofitas (actualmente llamadas polypodiopsidas, que incluyen las pteridofitas con megafilos y las que los perdieron). Los dos taxones son eslabones evolutivos intermedios entre las briofitas y las espermatofitas (Pryer, *et al.*, 2001). En el análisis del ADN y de los caracteres morfológicos se ha concluido que las divisiones Psilophyta, Equisetophyta y Pterophyta constituyen un único grupo monofilético y son los parientes más cercanos de las espermatofitas.

Recientemente, un grupo de 68 investigadores de diversos centros de investigación del mundo, encabezados por Eric Schuettpelz del Instituto Smithsonian y Harold Schneider del Museo de Historia Natural de Londres (2016), constituyeron el Grupo para la Filogenia de las Pteridofitas (*Pteridophyte Phylogeny Group*, PPG I), cuyo estudio, publicado en el 2016 en el *Journal of Systematics and Evolution*, modificó significativamente una parte de la nomenclatura que designaba algunas de las clases y subclases, y estableció el número de órdenes, familias, géneros y especies de cada grupo. En dicha publicación el grupo de investigadores presentó un cladograma de la clasificación de las licofitas y polypodiopsidas usando como primer criterio el monofilético para el reconocimiento de los taxones. Se reconocen en dicho estudio dos clases de pteridofitas: las lycopodiopsidas (licofitas) y las polypodiopsidas (helechos y afines), las cuales son linajes distintos dentro del árbol de las traqueofitas.

En las lycopodiopsidas se reconocen tres órdenes: las lycopodiales, las isoetales y las selaginélceas. Las primeras son de la familia Lycopodiaceae con 16 géneros y 388 especies, las segundas, de la familia Isoetaceae con un género y 250 especies, y las terceras, de la familia Sellaginellaceae con un género y 700 especies, para un total de 1.338 especies de licofitas. Las polypodiopsidas

(equisetos y helechos) comprenden 11 órdenes que parten de las equisetáceas y van hasta las polypodiales, con un total de 48 familias, 319 géneros y 1.578 especies. En síntesis, el PPG I incluyó 11.916 especies distribuidas en 51 familias y 337 géneros.

En el presente estudio se hizo la determinación taxonómica de las especies de licofitas y polypodiopsidas presentes en el páramo de Anaime mediante el uso de índices de diversidad y el análisis de sus hábitos y su hábitat.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el páramo de Anaime (también llamado páramo de los Valles) (Figura 1), el cual se encuentra ubicado en la cordillera Central de los Andes colombianos a una latitud de 4° 15' Norte y una longitud de 75° 30' Oeste, en el rango altitudinal entre los 3.200 y los 3.900 m.s.n.m., del municipio de Cajamarca fundamentalmente, aunque también se adentra parcialmente en los municipios de Roncesvalles, Rovira e Ibagué (departamento del Tolima). En este páramo se encuentra la Reserva Natural Semillas de Agua, con algo más de 1.000 hectáreas, la cual incluye 11 quebradas, dos lagunas y extensas zonas de turberas y pantanos. Es un área natural de importancia ambiental, social y económica para más de un millón de habitantes de los departamentos del Tolima y Quindío, y se la considera una estrella hidrográfica, ya que allí nacen los ríos Anaime, Chili, Manso, Coello y Tuamo, así como fuente de abastecimiento de agua para consumo humano y de animales, para actividades de recreación y para distritos de riego. El páramo de Anaime presenta una temperatura que oscila entre los 3 y los 6 °C, y una precipitación de 500 a 1.400 mm anuales. Se accede a él a través de la carretera Anaime-Santa Helena, luego de haber llegado al municipio de Cajamarca (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2009).

Muestreos. Se hicieron cinco salidas de campo, cada una con una duración de cuatro días. El área mínima de muestreo se estableció de acuerdo a la metodología de Rangel (1997) modificada por Marín (2013), la cual sugiere superficies de 50 m² para los diferentes hábitats de páramo (pastizal, matorral, frailejónal y turbera). En el área de estudio se levantaron dieciséis parcelas (Figura 1 y Tabla 1), cuatro por cada hábitat, con un área de 12 x 4,5 m, subdividida en cuatro carriles de 3 x 4,5 m para el conteo y la recolección de ejemplares. El rango de variación de las coordenadas en el área de estudio se estableció así: 4°16'0"-N, 4°15'0"-S, 75°35'0"-O y 75°33'0"-E, y las parcelas se ubicaron entre estos rangos.

Recolección de datos y análisis de la información. Se censaron todas las licofitas y polypodiopsidas en las dieciséis parcelas. La información de cada individuo se registró en planillas para su posterior análisis y para las determinaciones. Se calcularon los índices de diversidad alfa de Margalef, de diversidad de Shannon-Weiner y de dominancia de Simpson (Villareal, 2006). Los índices ecológicos se calcularon mediante los programas PAST (Hammer,

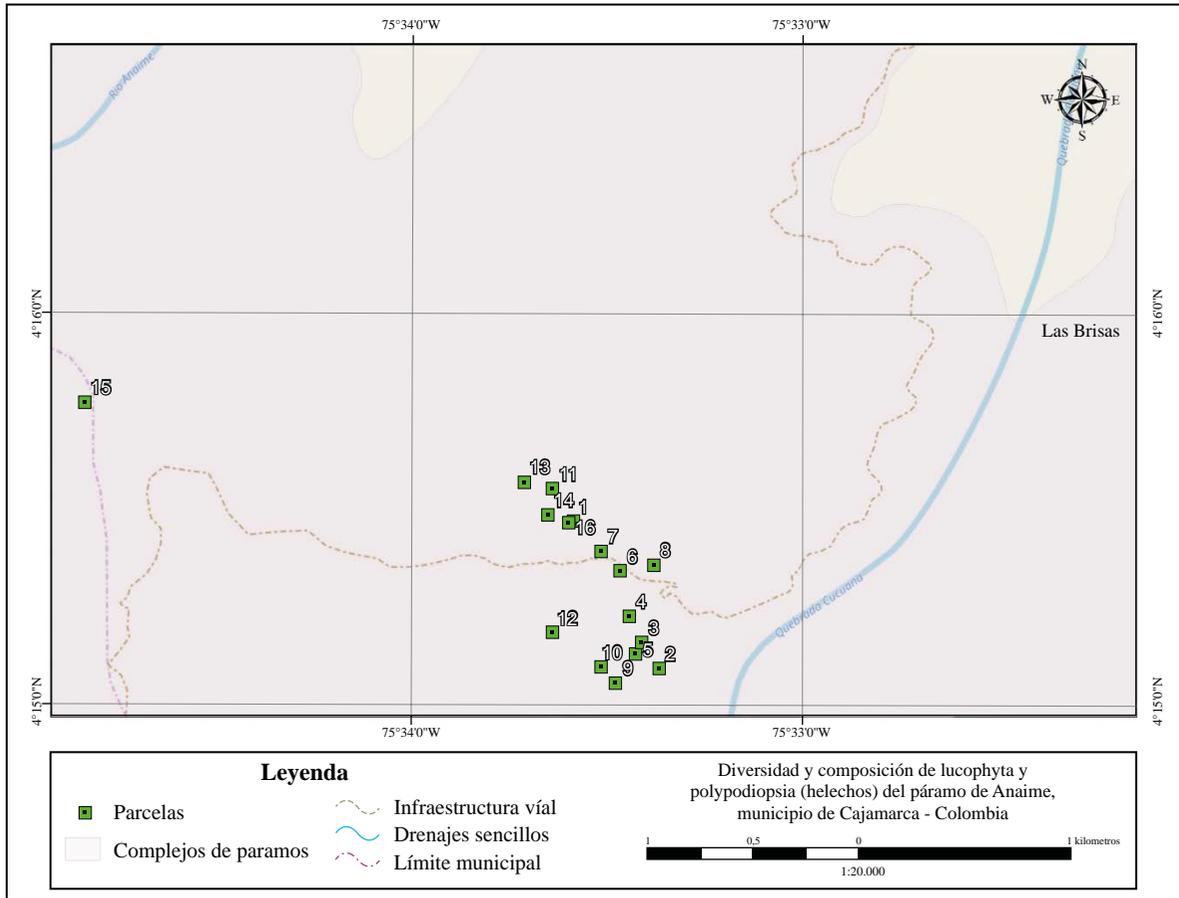


Figura 1. Mapa con la ubicación de las parcelas en el páramo de Anaimé

Tabla 1. Puntos muestreados en el páramo de Anaimé

N° Parcela	Cobertura vegetal	Sigla	Altura (m)	Coordenadas	
				N	W
1	Frailejonal	P1	3470	04°15'28,2"	75°33'35,1"
2	Pastizal	P2	3570	04°15'5,54"	75°33'21,78"
3	Pastizal	P3	3543	04°15'9,65"	75°33'24,33"
4	Matorral	P4	3532	04°15'13,61"	75°33'26,35"
5	Matorral	P5	3557	04°15'7,83"	75°33'25,27"
6	Pastizal	P6	3579	04°15'20,54"	75°33'27,73"
7	Turbera	P7	3600	04°15'23,56"	75°33'30,72"
8	Frailejonal	P8	3600	04°15'21,45"	75°33'22,56"
9	Pastizal	P9	3600	04°15'3,39"	75°33'28,4"
10	Turbera	P10	3600	04°15'5,78"	75°33'30,66"
11	Turbera	P11	3680	04°15'33,14"	75°33'38,2"
12	Matorral	P12	3604	04°15'11,16"	75°33'38,1"
13	Frailejonal	P13	3610	04°15'34,1"	75°33'42,5"
14	Frailejonal	P14	3582	04°15'29,1"	75°33'38,8"
15	Turbera	P15	3694	04°15'46,3"	75°34'50,1"
16	Matorral	P16	3572	04°15'28,04"	75°33'35,6"

2001) y EstimateS 9.1 (Colwell, 2013). Los ejemplares recolectados fueron prensados y rociados con alcohol al 96 % para su preservación, y posteriormente se trasladaron al Herbario de la Universidad del Tolima (TOLI).

Montaje y determinación de los ejemplares. En el TOLI se procesaron las muestras para su posterior determinación con el apoyo de claves (Murillo, M.T., Murillo, J. & León, 2008), colecciones en línea (Herbario Virtual UNAL), bases de datos, la colección general del TOLI y el Herbario de la Universidad Nacional (COL); por último, los ejemplares se depositaron en la colección del TOLI.

Con el fin de disponer de un documento que facilitara la divulgación de los resultados en la comunidad de la cuenca del río Anaimé, se elaboró un catálogo ilustrado con las especies registradas en el estudio.

Resultados

Se censaron 4.210 individuos en las 16 parcelas, con sus diferentes hábitats (pastizal, matorral, frailejónal y turbera); se registraron 50 especies pertenecientes a 25 géneros y 14 familias, 36 de las cuales correspondían a polypodiopsidas y 14 a licofitas. Las familias con el mayor número de géneros fueron la Polypodiaceae (6) y la Dryopteridaceae (4), y aquellas con el mayor número de especies fueron la Lycopodiaceae (14), la Dryopteridaceae (13), la Polypodiaceae (8) y la Pteridaceae (3) (Tabla 2).

Los ejemplares de licofitas y helechos correspondían a los siguientes hábitos: terrestre (64 %), epífita (19 %) y rupícola (17 %) (Figura 2). *Elaphoglossum engelii* (H.Karst.) Chris, *Melpomene flabelliformis* (Poir.) A.R. Sm. & R.C. Moran y *Melpomene moniliformis* (Lag. ex Sw.) Proctor, se recolectaron en los tres tipos de hábito; *Blechnum cordatum* (Desv.) Hieron., *Elaphoglossum minutum* (Pohl ex Fée) T. Chris y *Equisetum bogotense* Kunth correspondieron a los tipos rupícola y terrestre, y *Plagiogyria pectinata* (Liebm.) Lellinger, al epífita y al terrestre.

Las especies que se destacaron por su mayor número de individuos fueron las siguientes: *Lycopodium clavatum* L. (544) (Figura 3), *Plagiogyria pectinata* (Liebm.)Lellinger (481), *Campyloneurum angustifolium* (Sw.) Fée (435), *Histiopteris incisa* (Thunb.) J. Sm. (394), *Diphasiastrum thyoides*. (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Holub (296), *Lycopodium clavatum subsp. contiguum* (Klotzsch) B. Øllg. (175) y *Dryopteris wallichiana* (Spreng.) Alston & Bonner (168) (Tabla 3). Más de la mitad de las especies, se registraron únicamente en una o dos de las parcelas y solo 6,25 % de ellas se hallaron en 15 de las 16 parcelas establecidas. La especie de mayor frecuencia relativa fue *Lycopodium clavatum*, seguida por *Histiopteris incisa*, *Lycopodium clavatum subsp. contiguum*, *Hymenophyllum myriocarpum* Hook y *Elaphoglossum lingua* (C.Presl) Brack. Por su bajo nivel de abundancia se destacaron las especies *Jamesonia alstonii* A.F.Tryon (Figura 4) y *Blechnum loxense* (Kunth) Hieron (Figura 5); entre las del género *Huperzia* la especie con menor abundancia fue *Huperzia cruenta* (Spring) Rothm (Figura 6) (Tabla 3).

Tabla 2. Familias con mayor número de especies y géneros en el páramo de Anaimé

Familia	Nº de especies	Nº de géneros
Dryopteridaceae	13	4
Polypodiaceae	8	6
Lycopodiaceae	14	3
Pteridaceae	3	2
Asplenidaceae	2	1
Blechnaceae	2	1
Dennstaediaceae	2	1
Athyriaceae	1	1
Cyatheaceae	1	1
Equisetaceae	1	1
Hymenophyllaceae	1	1
Lindsaeaceae	1	1
Plagiogyriaceae	1	1
Thelypteridaceae	1	1

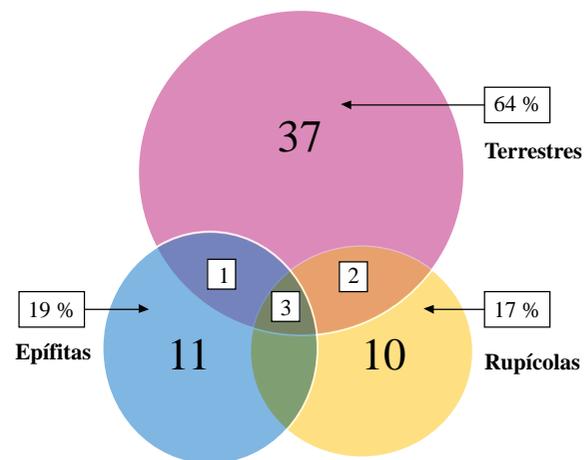


Figura 2. Distribución de las especies según el hábito de crecimiento

Según los valores del índice de Margalef, se consideró que el área estudiada presenta una riqueza media de especies de licofitas y polypodiopsidas. La parcela P16 registró el mayor valor de riqueza de especies (Mg=3,42), seguida por la parcela P14 (Mg=3,02), en tanto que los menores valores se encontraron en las parcelas P10 y P6, con 0,50 y 1,39, respectivamente. Los valores de diversidad más altos según el índice de Shannon-Weiner correspondieron a las parcelas P14 y P16 (H'=2,34 y H'=2,30, respectivamente), seguidas de las parcelas P9 y P1 (H'=2,24 y H'= 2,17, respectivamente), en tanto que el más bajo se registró en la parcela P10 (H'=1,09). Según los valores obtenidos en el índice de Simpson, las parcelas P9 y P14 presentaron mayor dominancia (λ=0,86), seguidas de las parcelas P2 y P5 (λ=0,85); la menor dominancia correspondió a la P6 (λ=0,53) (Tabla 4).

Otro producto de este trabajo de investigación es el “Catálogo Ilustrado de Lycophytas y Polypodiopsidas” del páramo de Anaimé, en el cual se incluyeron las 50 especies descritas brevemente, su estado de conservación y su distribución.

Discusión

El número de especies registrado para el páramo de Anaimé constituye una muestra representativa de la flora de helechos y licofitas de la región paramuna en el departamento del Tolima. Los registros específicos consignados en los estudios realizados en el páramo del Ruiz (Salamanca, 2003), en la cuenca del río Combeima, en el sector del páramo del Nevado del Tolima (Esquivel & Nieto, 2003) y en el páramo de Anaimé (Guerrero & Vargas, 2003), fueron menores a los de este, independientemente de los diferentes métodos de muestreo.

En la lista de licofitas y helechos documentada por Guerrero & Vargas (2003) para el páramo de Anaimé se registraron ocho familias, diez géneros y 17 especies, de las cuales seis especies coincidieron con el presente estudio: *Blechnum loxense*, *Equisetum bogotense*, *Elaphoglossum lingua*, *Huperzia tetragona* (Hook. & Grev.) Trevis., *Lycopodium clavatum* y *Jamesonia alstonii*. Además, se encontró que la riqueza de taxones fue considerablemente mayor a la registrada por la Reserva Natural Semillas de Agua; 44 de las especies identificadas representan nuevos registros para el páramo de Anaimé y 25 son nuevos registros para el departamento del Tolima. Cabe resaltar que son especies cuyo nicho es de alta montaña. En el estudio de Guerrero & Vargas (2003) se citan dos especies de isoetes (*Isoetes killipii* Morton e *Isoetes palmeri* H.P. Fuchs) que no fue posible registrar en el presente estudio, a pesar de la búsqueda exhaustiva que se hizo a lo largo de las zonas de turbera.

Al confrontar estos resultados con los del estudio de Esquivel & Nieto (2003), adelantado en un área de la misma cordillera, se observó que las especies *Huperzia tetragona*,

Huperzia brevifolia (Grev. & Hook.) Holub, *Lycopodium clavatum*, *Blechnum loxense*, *Elaphoglossum lindenii* (Bory de Fée) Christ, *Adiantum raddianum* C. Presl. y *Jamesonia imbricata* (Sw.) Hook. & Grev., se registraron en los dos estudios. Hay coincidencia en el registro de nueve familias, 16 géneros y 20 especies entre el estudio en el páramo de Anaimé y el estudio de la cuenca del río Chinchiná-Caldas (Sanín, et al., 2008), ubicada entre los 1.000 y los 5.000 m de altitud sobre la vertiente occidental de la cordillera Central, en el cual se registraron 155 especies, 59 géneros y 20 familias. Esta notable diferencia en especies, géneros y familias probablemente obedece a dos razones: la primera, que el rango de estudio en la cuenca del río Chinchiná fue mucho más amplio, en tanto que en Anaimé solo se evaluó el páramo, y la segunda, que la vertiente occidental de la cordillera Central tiene una mayor precipitación, ya que el régimen pluviométrico óptimo oscila entre 3.000 y 3.500 mm, y en la vertiente oriental es de 2.000 a 2.500 mm como consecuencia de los flujos provenientes del Pacífico (Van der Hammer, Pérez, & Pinto, 1983).

El género *Elaphoglossum* presentó la mayor diversidad de especies (9) en el páramo de Anaimé, mientras que en el Inventario de Pteridophytas de Costa Rica, Kluge & Kessler (2005) registraron a lo largo del transecto altitudinal en el Parque Nacional Braulio Carrillo, en la Estación Biológica La Selva y en el Cerro de la Muerte, 97 especies en el rango altitudinal de los 3.100 a los 3.400 m, siendo *Elaphoglossum* el género con mayor diversidad de especies. En el estudio de Carvajal & Krömer (2015) en el centro de Veracruz (México), se registran 33 especies de la familia Polypodiaceae, en un rango de 20 a 3.500 m, en tanto que en el presente estudio esta familia registró ocho especies correspondientes a seis géneros. Los autores del estudio en México destacan que entre los 1.500 y los 2.500 m los bosques son maduros y contienen la mayor diversidad de especies, pero por su ubicación en el páramo, en este trabajo la diversidad fue menor, aunque los dos estudios coinciden en la mayor diversidad de especies por familia y por género. Cabrera & Ramírez (2014) justifican una mayor diversidad de licofitas y helechos en la cordillera Central por su alto contenido de materia orgánica y por tener un mejor estado de conservación que la cordillera Oriental, ya que en esta se presentan algunas zonas con varios relictos rodeadas por pastos limpios que alteran la continuidad y conservación de los páramos.

Rodas, Jiménez & López (2005) analizaron en zonas boscosas del Corredor Ecológico Metropolitano, ubicado en tierras altas volcánicas del valle de Guatemala, la composición de helechos y licofitas de tres remanentes boscosos mediante la recolección de 65 especímenes de 21 especies, que no coinciden con ninguna de las especies encontradas en el páramo de Anaimé.

Caviedes (1999) señala que los valores del índice de Shannon-Weiner cercanos a tres (3) o más describen comunidades muy heterogéneas; en este estudio los valores



Figura 3. *Lycopodium clavatum* L.

Tabla 3. Abundancia y frecuencia de las 50 especies registradas en el páramo de Anaimé

Especies	Abundancia absoluta	Abundancia relativa	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa
<i>Asplenium monanthes</i> Murray	6	0,14	2	0,99
* <i>Asplenium sessilifolium</i> Desv.	26	0,61	3	1,48
<i>Blechnum cordatum</i> (Desv.) Hieron.	26	0,61	3	1,48
<i>Blechnum loxense</i> (Kunth) Hieron	3	0,07	1	0,49
<i>Cyathea</i> sp.	65	1,54	6	2,97
<i>Histiopteris incisa</i> (Thunb.) J. Sm.	394	9,35	11	5,44
* <i>Sphenomeris spatulata</i> (Maxon) K.U.Kramer	6	0,14	2	0,99
* <i>Elaphoglossum andreanum</i> Christ	21	0,49	2	0,99
* <i>Elaphoglossum atrorubens</i> Mickel	26	0,61	3	1,48
* <i>Elaphoglossum cuspidatum</i> (Willd.) T.Moore	26	0,61	3	1,48
<i>Elaphoglossum engelii</i> (H.Karst.) Christ	65	1,54	2	0,99
* <i>Elaphoglossum latifolium</i> (Sw.) J.Sm	13	0,30	1	0,49
* <i>Elaphoglossum lindenii</i> (Bory ex Fée) Christ	52	1,23	4	1,98
<i>Elaphoglossum lingua</i> (C.Presl) Brack	125	2,96	9	4,45
* <i>Elaphoglossum minutum</i> (Pohl ex Fée) Christ	21	0,49	2	0,99
* <i>Elaphoglossum piloselloides</i> (L.) Keyserl.	22	0,52	2	0,99
* <i>Polystichum orbiculatum</i> (Desv.) J.Rémy in Gay	26	0,61	3	1,48
* <i>Polystichum muricatum</i> (L.) Fée	8	0,19	1	0,49
* <i>Ctenitis ampla</i> (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Ching	65	1,54	1	0,49
* <i>Dryopteris wallichiana</i> (Spreng.) Alston & Bonner	168	3,99	4	1,98
<i>Equisetum bogotense</i> Kunth	79	1,87	7	3,46
* <i>Hymenophyllum myriocarpum</i> Hook	90	2,13	10	4,95
* <i>Huperzia attenuata</i> (Spring) Trevis.	64	1,52	7	3,46
<i>Huperzia brevifolia</i> (Grev. & Hook.) Holub.	51	1,21	4	1,98
<i>Huperzia capellae</i> (Herter) Holub.	74	1,75	6	2,97
* <i>Huperzia cruenta</i> (Spring) Rothm.	8	0,19	1	0,49
<i>Huperzia hohenackeri</i> (Herter) Holub	14	0,33	3	1,48
<i>Huperzia reflexa</i> (Lam.) Rothm.	106	2,51	4	1,98
* <i>Huperzia rufescens</i> (Hook.) Trevis.	25	0,59	5	2,47
* <i>Huperzia schlimii</i> (Herter) B.Øllg.	22	0,52	2	0,99
<i>Huperzia</i> sp	57	1,35	2	0,99
<i>Huperzia tetragona</i> (Hook. & Grev.) Trevis.	50	1,18	2	0,99
<i>Lycopodium clavatum</i> L.	544	12,92	15	7,42
<i>Lycopodium clavatum</i> subsp. <i>contiguum</i> (Klotzsch) B.Øllg.	175	4,15	10	4,95
<i>Lycopodium</i> sp.	27	0,64	5	2,47
<i>Diphasiastrum thyoides</i> . (Humb. & Bonpl. ex Willd.) Holub	296	7,03	6	2,97
<i>Plagiogyria semicordata</i> (C. Presl) Christ	481	11,42	7	3,46
<i>Campyloneurum angustifolium</i> (Sw.) Fée	435	10,33	5	2,47
* <i>Pecluma camptophyllaria</i> (Fée) M.G.Price	27	0,64	5	2,47
* <i>Melpomene flabelliformis</i> (Poir.) A.R. Sm. & R.C. Moran	26	0,61	4	1,98
<i>Melpomene moniliformis</i> (Lag. ex Sw.) A.R. Sm. & R.C. Moran	35	0,83	1	0,49
* <i>Microgramma percussa</i> (Cav.) de la Sota	93	2,20	2	0,99
<i>Polypodium monosorum</i> C.Presl	80	1,90	2	0,99
* <i>Terpsichore lanigera</i> (Desv.) A. R. Sm.	36	0,85	8	3,96
* <i>Terpsichore leucosticta</i> (J. Sm.) A.R. Sm.	60	1,42	1	0,49
<i>Adiantum raddianum</i> C. Presl.	29	0,68	1	0,49
* <i>Jamesonia alstonii</i> A.F.Tryon	1	0,02	1	0,49
<i>Jamesonia imbricata</i> (Sw.) Hook. & Grev.	14	0,33	2	0,99
* <i>Thelypteris rudis</i> (Kunze) Proctor	31	0,73	3	1,48
<i>Athyrium dombeyi</i> Desv.	16	0,38	6	2,97
Total	4.210	100	202	100

*Nuevos registros de especies para el Tolima



Figura 4. *Jamesonia alstonii* A.F.Tryon



Figura 5. *Blechnum loxense* (Kunth) Hieron

estuvieron por debajo de tres (3), lo cual evidencia que las zonas muestreadas tienen tendencia a la homogeneidad. Las parcelas P14 y P16 mostraron la mayor tendencia a la heterogeneidad, por tener valores más altos (2,34 y 2,30, respectivamente), en tanto que la mayor homogeneidad se presentó en la parcela P10, correspondiente a una turbera. Asimismo, se presentan especies dominantes que reducen la diversidad, como se evidenció en el índice de Simpson, en el cual todos los valores fueron menores de 0,9, registrándose el mayor valor en la parcela P9 (0,86), correspondiente a un hábitat de pastizal, lo cual indica que los sitios muestreados albergan una baja diversidad de especies; sin embargo, para este tipo de zonas los valores arrojados por el índice de Margalef corresponden a una riqueza media de especies, probablemente porque estas áreas están dentro del 9 % de las coberturas originales que han sido intervenidas (Cabrerá & Ramírez, 2014).

Los índices para las especies de licofitas y polypodiopsidas del páramo de Anaimé presentan ciertas particularidades: la parcela P16 fue la de mayor riqueza y diversidad de especies según el índice de Margalef y Shannon-Weiner, probablemente debido a la influencia de la presencia de arbustos, especialmente de las familias Asteraceae (*Diplostephium* sp., *Ageratina tinifolia* (Kunth) R.M.King & H.Rob., *Baccharis rupicola* Kunth y *Pentacalia vaccinioides* (Kunth) Cuatrec.), Melastomataceae (*Brachyotum ledifolium* (Desr.) Triana, *Miconia chlorocarpa* Cogn y *Miconia salicifolia* (Bonpl. ex Naudin) Naudin) y Ericaceae (*Gaultheria myrsinoides* Kunth, *Gaultheria sclerophylla* Cuatrec. y *Plutarchia monantha* A.C. Sm). Las especies arbustivas antes citadas para esas tres familias hacen parte de una cobertura de matorral, lo cual pudo haber favorecido el desarrollo de diversas licofitas y polypodiopsidas, y marcaron la diferencia con respecto a las demás parcelas ($Mg=3,42$); a la parcela P16 siguió la parcela 14, correspondiente a un frailejón ($Mg=3,02$), donde además de *Espeletia hartwegiana* Sch.



Figura 6. *Huperzia cruenta* (Spring) Rothm

Tabla 4. Índices de diversidad alfa

Número de parcelas	Índice de Margalef	Índice de Simpson	Índice de Shannon – Wiener
1	2,95	0,83	2,17
2	2,31	0,85	2,14
3	1,96	0,71	1,67
4	2,63	0,83	2,15
5	1,59	0,85	2,06
6	1,39	0,53	1,22
7	1,44	0,76	1,51
8	2,59	0,75	1,98
9	2,26	0,86	2,24
10	0,50	0,66	1,09
11	2,17	0,73	1,67
12	1,54	0,83	1,94
13	2,26	0,80	1,89
14	3,02	0,86	2,34
15	2,17	0,79	1,93
16	3,42	0,84	2,30

Bip., se registró una gran influencia de los pastos del género *Calamagrostis* y diversas especies de *Huperzia*, licopodios y helechos con dominancia de *Jamesonia imbricata*, mientras que la turbera registró el menor valor de riqueza (0,50) en la parcela P10, debido a que se trata de un área pantanosa desprovista de frailejones y matorral. En su investigación sobre la diversidad de hepáticas y musgos en turberas del Nevado del Tolima, **Cataño, Uribe & Campos** (2014) referenciaron este hábitat dominado por hepáticas y musgos. Los valores de los índices para las parcelas P6 y P10 fueron los más bajos; posiblemente por estar ubicadas en zonas de pastizal y turbera.

Según los tipos de hábitos analizados, el terrestre fue el que predominó, seguido por el epífita y el rupícola; las especies comunes a los tres hábitos fueron *Elaphoglossum engelii*, *Melpomene flabelliformis* y *Melpomene moniliformis*, las cuales poseen una distribución cosmopolita, situación que puede estar influenciada por el requerimiento de cada una de las especies para su desarrollo, como la intensidad de la luz, la temperatura, la humedad, la cobertura del suelo, la disponibilidad de nutrientes, y las alteraciones naturales y antropogénicas de las diferentes especies (**De La Sota**, 1973).

Conclusiones

En el estudio se encontró que el páramo de Anaime presentó una diversidad taxonómica de 14 familias, 25 géneros y 50 especies, datos que constituyen un aporte al conocimiento de la diversidad de licofitas y polypodiopsidas en el departamento del Tolima y en Colombia, máxime si se tiene en

cuenta que las cordilleras Central y Occidental han sido las menos exploradas en el país en cuanto a estos grupos se refiere (**Murillo, et al.**, 2008).

Al comparar los resultados de este estudio con lo hasta ahora publicado para el páramo de Anaime (**Guerrero & Vargas**, 2003), se registró un incremento de 44 especies pertenecientes al grupo de licofitas y polypodiopsidas y de 25 nuevos registros para el Tolima. Las licofitas y las polypodiopsidas en el páramo de Anaime están representadas principalmente por especies de las familias Dryopteridaceae y Lycopodiaceae. En cuanto a la preferencia de hábito, 64 % de ellas son terrestres, 19 %, epífitas y 18 %, rupícolas.

En los muestreos del presente estudio no fue posible encontrar ejemplares de *Isoetes killipii* e *Isoetes palmeri*, de la familia Isoetaceae, registradas por **Guerrero & Vargas** (2003), posiblemente debido al grado de intervención de la ganadería.

Recomendaciones

Es necesaria una mayor vigilancia de las autoridades ambientales y municipales para impedir que el páramo siga siendo afectado por actividades antrópicas como la ganadería y la minería. Asimismo, debe difundirse mediante conferencias en las instituciones educativas, las juntas comunales y entre la comunidad de la región del cañón de Anaime la información de los estudios que se han realizado para sensibilizar a los pobladores sobre la necesidad de la conservación del páramo y los bosques aledaños, puesto que es la fábrica de agua de toda esta región. También se recomienda difundir la información contenida en el catálogo ilustrado de licofitas y polypodiopsidas del páramo de Anaime para hacer conciencia en la comunidad sobre la importancia de estas especies y la necesidad de conservar el páramo. Debe reconocerse que la reserva Semillas de Agua en este páramo ha contribuido a mitigar la intervención antrópica al controlar actividades como la agricultura, la ganadería y la minería.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Oficina de Investigaciones de la Universidad del Tolima por su apoyo económico para financiar el trabajo de campo, a la Reserva Natural Semillas de Agua por la acogida y acompañamiento en el área de estudio, al TOLI por facilitar el secado, montaje y determinación del material recolectado, al botánico José Carmelo Murillo Aldana del COL por su apoyo en la determinación de algunos especímenes, y al Laboratorio de Sistema de Información Geográfica de la Universidad del Tolima por la elaboración del mapa de ubicación de las parcelas.

Contribución de los autores

Lina Marcela Vargas Gaviria participó en las jornadas de campo, colaboró en la determinación del material vegetal, en la redacción del “Catálogo Ilustrado de Lycophytas y Monilophytras del Páramo de Anaime” y en la elaboración

del artículo. Derly Astrid Buitrago participó en el trabajo de campo, colaboró en la determinación del material vegetal y en la redacción del Catálogo. Héctor Eduardo Esquivel participó en las jornadas de campo, coordinó todas las actividades del trabajo en campo y en el Herbario de la Universidad del Tolima y participó activamente en la elaboración del artículo.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Cabrera, M., Ramírez, W.** (2014). Restauración ecológica de los páramos Colombia. Transformación y herramientas para su conservación. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá. p. 293.
- Carvajal, C., Krömer, T.** (2015). Riqueza y distribución de helechos y licófitos en el gradiente altitudinal del cofre de perote, centro de Veracruz, México. *Botanical Sciences*. **93** (3): 601-614.
- Caviedes, B. M.** (1999). Manual de métodos y procedimientos estadísticos. Bogotá. Universidad Jorge Tadeo Lozano. p. 67.
- Colwell, R. K.** (2013). Estimate S, Version 9.1: Statistical Estimation of Species Richness and Shared Species from Samples (Software and User's Guide).
- Corporación Autónoma Regional del Tolima, CORTOLIMA.** (2009). Estudio de estado actual y plan de manejo de los páramos del departamento del Tolima. Tolima. Ibagué: Cortolima. Fecha de consulta: 1 de mayo de 2016. Disponible en: http://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/centro_documentos/estudios/estudio_del_estado_actual_de_los_paramos_en_el_epto.pdf
- De La Sota, E. R.** (1973). La distribución geográfica de las pteridofitas en el cono sur de América meridional. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*. **15** (1): 23-34.
- Esquivel, H., Nieto, A.** (2003). Diversidad Florística de la Cuenca Alta del Río Combeima. Ibagué: Universidad del Tolima. Ibagué. p. 190.
- Guerrero, E., Vargas, W.** (2003). Plantas del Páramo de Anaimé. Cordillera Central, Andes Colombianos. Corporación Semillas de Agua. Cajamarca. p. 129.
- Hammer, O., Harper, D., Ryan, P.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package Education and Data Analysis. *Palaeontología Electrónica*. **4** (1): 9.
- Instituto Alexander von Humboldt.** (2007). Atlas de los páramos de Colombia. p. 210.
- Pryer, K., Schneider, H., Smith, A., Cranfill, R., Wolf, P., Hunt, J., Sipes, S.** (2001). Horsetails and ferns are a monophyletic group and the closest living relatives to seed plants. *Nature*. **409**: 618-622.
- Kluge, J., Kessler, M.** (2005). Inventory of pteridophytes along an elevational transect in Braulio Carrillo National Park, La Selva Biological Station and Cerro de la Muerte, Costa Rica. *Universität Göttingen Albrecht-von-Haller Institute für Pflanzenwissenschaften. Brenesia*. **63-64**: 11-34.
- Marín, C.** (2013). Propuesta metodológica para caracterizar las coberturas vegetales en los páramos de Santurbán y Rabanal. Instituto von Humboldt. Bogotá: Proyecto Páramos y Sistemas de Vida. Documento interno.
- Melo, O., Vargas, R.** (2003). Evaluación Ecológica y Silvicultural de Ecosistemas Boscosos. Universidad del Tolima, CRQ, CARDER, CORPOCALDAS, CORTOLIMA. 235. p. 239.
- Ministerio del Medio Ambiente.** (2002). Programa para el Manejo Sostenible y Restauración de Ecosistemas de la Alta Montaña colombiana. Bogotá D.C. **1**: 5.
- Murillo, M.T., Murillo, J., León, A.** (2008). Los Pteridófitos de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales-Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia. Biblioteca José Jerónimo Triana. **18**: 533.
- Ramírez, B.R., Pinto, D.J.** (2007). Catálogo de helechos y plantas afines del departamento del Cauca. Popayán, Universidad del Cauca. p. 216.
- Rangel, O.** (2000). La región Paramuna y Franja Aledaña en Colombia. Bogotá, Unibiblos. Colombia Diversidad Biótica III. La región de vida Paramuna. **1**: 23.
- Rangel, J. O., Velásquez, A.** (1997). Métodos de estudio de la vegetación. Bogotá, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Colombia Diversidad Biótica II: p. 59-82.
- Rodas, L., Jiménez, J., López, P.** (2015). Análisis de la composición de helechos (Monilophyta) y Licofitas de tres remanentes boscosos del Corredor Ecológico Metropolitano (CEM). Centro de Estudios Conservacionistas, Universidad de San Carlos de Guatemala. p. 26-34.
- Salamanca, S., Cleef, A. M., Rangel, J. O.** (2003). The páramo vegetation of the volcanic Ruiz-Tolima massif. *Berlín, Estudios en Ecosistemas Tropicandinos*. **5**: 82.
- Sanín, D., Álvarez, L.M., Mancera, J.C., Castaño, N., González, G.** (2008). Monilofitos y licofitos de la cuenca del río Chinchiná, clave para géneros y catálogo de las especies. *Caldas, Rev. Acad. Colomb. Cienc.* **32** (124): 331-352.
- Sistema de Información Biogeográfico.** (2016). Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia. Fecha de consulta: 20 de enero de 2017. Disponible en: <http://www.sibcolombia.net/web/sib/cifras>
- Smith, A. R., Pryer, K. M., Schuettpelz, E., Korall, P., Schneider, H., Wolf, P.** (2006). A classification for extant ferns. *Taxon*. **55** (3): 705-731.
- Van Der Hammen, T.** (1998). Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá. Bogotá. CAR. p. 142.
- Schuettpelz, E., Schneider, H., Smith A.R., Hovenkamp, P., Prado, J., Germinal Rouhan, G., Xin-Mao Zhou, X.M.** (2016). A community-derived classification for extant lycophytes and ferns. *Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. Journal of Systematics and Evolution*. **54** (6): 563-603.
- Van der Hammer, T., Pérez, A., Pinto, P.** (1983). La cordillera Central Colombiana transecto parque los Nevados. *J. Cramer*, **1**: 38.
- Villarreal, H., Álvarez, M., Córdoba, S., Escobar, F., Fagua, G., Gast, F., Mendoza, H., Ospina, M., Umaña, A.M.** (2006). Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Bogotá, Programa de Inventarios de Biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. **2**: 236.

Una nueva especie de *Miconia* (Melastomataceae) de hojas rojizas de los andes de Colombia

Humberto Mendoza-Cifuentes^{1,*}, Juan Mauricio Posada-Herrera²

¹Instituto Alexander von Humboldt, Herbario FMB, Claustro de San Agustín, Villa de Leyva, Colombia

²Herbario Universidad del Valle CUVC, Cali, Colombia

Resumen

Se describe e ilustra *Miconia brigittei* (Melastomataceae), una nueva especie endémica de los andes de Colombia. Esta especie se asocia con *Miconia* sección *Amblyarrhena* y se caracteriza por el color rojizo de las hojas en los ejemplares de herbario, hojas 5 plinervias, domacios pubescentes en la base de las venas secundarias por el envés, pétalos reflexos, conectivo de la antera minutamente prolongado en la base dorsal, y ovario 3-locular. Crece a lo largo de la Cordillera Occidental y centro-norte de la Cordillera Central, entre los 1330 y 2020 m de elevación, en zonas de bosque Subandino y Andino. Por su rango de distribución es categorizada como vulnerable. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Sección *Amblyarrhena*; Bosques Andinos; Bosque Subandino; Flora de Colombia.

A new species of *Miconia* (Melastomataceae) of reddish leaves from the Andes of Colombia

Abstract

Miconia brigittei (Melastomataceae), a new species endemic to the Andes of Colombia, is described and illustrated. This species is placed in *Miconia* section *Amblyarrhena* and is characterized by the reddish color of the leaves in dried specimens, 5-plinervate leaves, tuff domatia at the base of the secondary veins in the abaxial leaf surface, reflexed petals, connective of the anther minutely prolonged in the dorsal base, and 3-locular ovary. It grows along the Western Cordillera and north-central Cordillera Central, between 1330 and 2020 m elevation, in areas of Sub Andean and Andean Forest. Considering the distribution range, it is categorized as vulnerable. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Amblyarrhena section; Andean forest; Flora of Colombia; Subandean forest.

Introducción

Miconia Ruiz & Pav. (1794: 60), con cerca de 1100 especies, es el género de plantas leñosas de las angiospermas más diverso con distribución restringida al neotrópico (Goldenberg, *et al.*, 2008, 2013; Michelangeli, 2016). Colombia es el país con mayor número de especies del género, ya que alberga el 36% de sus taxones, con alrededor de 380 especies (Almeda, *et al.*, 2016). En especial la región andina colombiana es ampliamente diversa en este género con alrededor de 270 especies (Almeda, *et al.*, 2016).

Los herbarios de Colombia, la mayoría de ellos asociados a la región andina, cuentan con abundantes colecciones del género *Miconia* indeterminadas, algunas de las cuales representan nuevas especies o registros para el país, por lo que el número nacional de especies de Melastomataceae constantemente se incrementa.

La presente novedad taxonómica es producto de la revisión de colecciones de herbarios regionales, como es el herbario FMB, pero también de recolecciones directa de campo. La reciente expedición biológica a la Cordillera Central del departamento de Antioquia, en el marco del proyecto

Colombia BIO financiado por Colciencias y desarrollado por el Instituto Alexander von Humboldt, permitió recolectar ejemplares de este nuevo taxón, lo que ayudó a constatar su novedad. En este artículo se describe y nombra esta especie en reconocimiento a la dirección del Instituto Alexander von Humboldt por apoyar la realización de inventarios biológicos y el trabajo de curatoría básica en algunos de los herbarios nacionales.

Materiales y métodos

A partir de revisiones de colecciones del herbario FMB y COL, se identificaron ejemplares asociados con este nuevo taxón. Se revisó literatura pertinente al género *Miconia* en Colombia, Ecuador y Perú, la base de datos del herbario COL, el catálogo de Melastomataceae de Colombia (Almeda, *et al.*, 2016) y la flora de Mesoamericana (Almeda, 2009).

*Correspondencia:

Humberto Mendoza-Cifuentes, hmendoza@humboldt.org.co

Recibido: 13 de enero de 2018

Aceptado: 31 de marzo de 2018

Editor: Elizabeth Castañeda

Complementariamente, se consultaron las imágenes tipo de la totalidad de las especies de *Miconia* de Colombia en la base de datos de Global Plants JSTOR (<http://plants.jstor.org/search?plant>).

Posteriormente, se procedió a realizar la descripción, ilustración del nuevo taxón y la identificación de las especies más afines dentro del género *Miconia*. Para la descripción se realizaron medidas de las partes vegetativas y de la inflorescencia en material de herbario y utilizando un calibrador digital de 0,01 mm de precisión marca Mitutoyo (Serie 500). Las medidas de las partes florales se basaron en flores secas rehidratadas procedentes de los ejemplares tipo. Se realizaron medidas de las partes florales y tricomas en un microscopio Leica S8AP0. Los tipos de tricomas se identifican con base en el atlas de tricomas de Melastomataceae de **Wurdack** (1986). Finalmente, se evaluó el estado de conservación del nuevo taxón con base en los criterios de amenaza de la **IUCN** (2012, 2014).

Resultados

Miconia brigittei Humberto Mend. & Posada-Herrera, sp. nov. (Figuras 1, 2).

Miconia brigittei is recognized by leaves drying red in herbarium specimens, 5-plinervate, leaves, the presence of tuff domatia at the base of the secondary veins on the abaxial leaf surface, reflexed petals, simple connective minute prolonged at the base, anther with an apical pore, and 3-locular ovary.

TIPO: Colombia. **Nariño.** Municipio de Ricaurte, Reserva Natural La Planada, parcela permanente de 25 ha. 1°9'5.3"N – 77°59'44.8"W, 1850 m, 7-XI-2003, fl. *I. Gil-Ch.730* (Holotipo: FMB).

Arbustos o árboles pequeños de 2,5 a 8,0 m de altura. **Ramas** subcuadrangulares, acanaladas; entrenudos de 3,0–5,6 cm de largo. Entrenudos y peciolas glabros o con ralos **tricomas** dendríticos cortos, de 0,3–0,5 mm de largo, caducos; ejes de la inflorescencia con cubierta densa de tricomas similares a los de ramas, de 0,07–0,12 de largo; envés glabro o con ralos tricomas ramificados cortos y caducos sobre las venas primarias, en las axilas de las venas secundarias en la base de la lámina presenta domacios conformados por tricomas filamentosos ligeramente rugosos, de 1,1–1,5 mm de largo. **Hojas** isofilas; **peciolos** 1,5–4,5 cm de largo, acanalados. **Lámina foliar** de 11,5–20 × 4,2–10,2 cm, elíptica, obovada-elíptica u ovada; base obtusa a redondeada; ápice acuminado, acumen de 0,6–1,8 cm de largo; margen entera; haz glabra; envés glabro o con ralos tricomas ramificados cortos. **Nervadura** con dos pares de venas secundarias acompañando a la vena media, plinervias, el par superior plinervio a 0,2–1,7 cm; con 35–46 pares de venas terciaria aledañas a la vena media. **Inflorescencia** paniculada, terminal, de 8–20 cm de largo, con 80 hasta 150 flores; ejes cuadrangulares; eje central con 4–8 nudos de ramificación; pedúnculo de 2,7–5,0 cm de largo, algunas veces ausente; primer internodo de 2–5 cm de largo;

paraclados basales de 3,5–12,0 cm de largo, con 2–3 niveles de ramificación; ápices trifloros; brácteas en el primer nudo semejante a hojas pequeñas, con lámina elíptica u obovado-elíptica y de 6,0–13,0 × 2,3–5,0 cm; bracteolas filiformes u oblongas, de 0,8–1,4 mm de largo, caducas desde botones florales. **Flores** 5-meras, diplostemonas, pediceladas; pedicelo 0,6–1,0 mm log. **Hipanto** campanulado, talamo de 0,78–0,81 mm de largo; externamente con cubierta de tricomas ramificados cortos como en la inflorescencia o con tricomas adpresos; tricomas de 0,06 mm de largo. **Cáliz** lobulado, externamente con indumento similar al hipantovario; internamente con tricomas amorfos adpresos; tubo del cáliz, de 0,34–0,36 mm de largo; lóbulos anchamente redondeados, de margen membranosas y fimbriada, de 0,2–0,3 × 0,8 mm; diente dorsal diminuto, de 0,2 mm de largo, con tricomas ramificados cortos. **Corola** con pétalos reflexos en flores abiertas; pétalos oblongos, de 1,8–2,0 × 0,7–0,9 mm, glabros, blancos, apicalmente con bordes enrollados que dan la apariencia de un ápice agudo. **Estambres** isomorfos; filamentos aplanados basalmente, 1,4–1,6 mm de largo y 0,3–0,4 mm ancho en la base, glabros; anteras amarillas, oblongas, 0,8–1,0 × 0,37–0,50 mm y 0,3–0,4 mm grosor, con un poro apical de 0,15–0,18 mm de diámetro; conectivo prolongado levemente en la base dorsal, 0,12–0,14 × 0,14–0,16, minutamente bilobado. **Ovario** 3-locular, completamente fusionado al hipanto, 0,97–1,10 × 0,95–1,00 mm, externamente con cubierta similar al hipanto; ápice redondeado, 0,12–0,15 mm de largo, con ralos tricomas rugosos alrededor del estilo de 0,06 mm de largo. **Estilo** columnar, de 4,1–4,5 mm de largo y 0,25–0,27 mm de diámetro en la base, engrosado hacia el ápice 0,35 mm de diámetro; **estigma** puntiforme. **Frutos** ovoides con el cáliz relictual, de 4,7–4,9 × 3,3–3,5 mm. **Semillas** oblongas u ovoides, 0,60–0,81 × 0,24–0,4 mm; testa levemente reticulada, color crema.

Etimología. El epíteto específico es en honor a Brigitte Batiste, directora del Instituto de investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, en agradecimiento al apoyo a la realización de inventarios de biodiversidad en el marco del proyecto Colombia BIO.

Distribución y hábitat. A lo largo de la Cordillera Occidental, flanco occidental y centro-norte de la Cordillera Central, flanco oriental, entre los 1330 y 2020 m de elevación, en zonas de Bosque Subandino y Andino. Recolectada siempre en zonas de bosques (Figura 3).

Fenología. Recolectada con flores en enero, julio, septiembre, octubre y diciembre. Recolectada con frutos en enero, abril, julio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

Estado de conservación. Las localidades de procedencia corresponden a zonas de bosque Subandino y Andino, los cuales han sido intervenidos fuertemente. También es una especie que requiere buenas condiciones de conservación del bosque. Según lineamientos de la IUCN (2014), cumple los criterios B1b(iii), por lo que se categoriza en “Vulnerable” (VU).

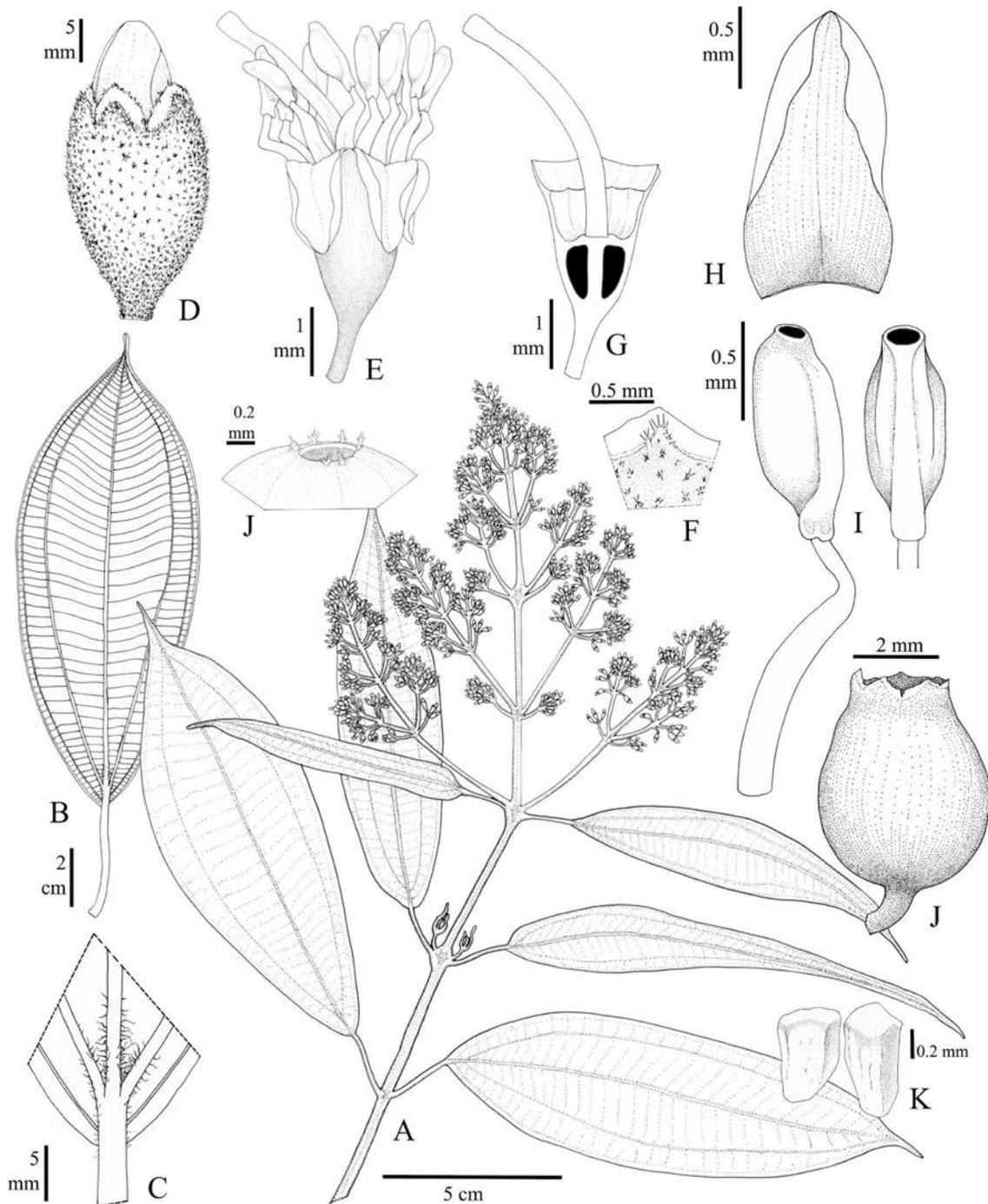


Figura 1. *Miconia brigittae*. **A.** Rama florífera; **B.** Hoja; **C.** Detalle del domacio pubescente por el envés foliar; **D.** Botón floral; **E.** Flor en vista lateral; **F.** Detalle del diente dorsal del cáliz; **G.** Corte longitudinal del ovario e hipanto-cáliz, Estambres sinfiándericos en vista lateral; **H.** Pétalo; **I.** Estambres (izq) y vista dorsal de la antera (der); **J.** Fruto; **K.** Semillas. Fotos basadas en: **A – M. Velayos 7035** (FMB), **B, C – J. Bittner 2751** (FMB), **D, E, F, G, H, I – I. Gil-Ch. 730** (FMB), **J, K – H. Mendoza 19559** (FMB). Ilustración Angélica Ramírez Mendoza.

Paratipos. Colombia. **Antioquia.** Carmen de Viboral, vereda El Porvenir, camino a lo largo del filo de la montaña que conduce entre las fincas La Ilusión y La Troja, 5°53'28.3"N, 75°10'27.5"W, 1330 m, 03-XII-2016, fl, fr, *H. Mendoza et al. 19554* (FMB, HUA). **Cauca.** El Tambo, Parque Nacional Natural Munchique, vereda La Romelia,

camino de Nueva Granada, 1950 m, 28-VII-1993, fl, *M. Velayos 7035*, *G. Lozano 6714* (FMB, COL). **Nariño.** Municipio de Ricaurte, Reserva Natural La Planada, parcela permanente de 25 ha. 1°9'5.3"N – 77°59'44.8"W, 1850 m, 7-XI-2003, fr, *I. Gil-Ch. 691, 711* (FMB!); 10-I-1998, fl, fr, *H. Mendoza 8662* (FMB!); 5-IX-1999, fr, *H. Mendoza 8631*,



Figura 2. Tricomas en *Miconia brigittei*. **A.** Domacio pubescente del envés foliar; **B.** Tricomas del domacio del envés foliar; **C.** Tricomas del hipanto; **D.** Tricomas del envés foliar. Fotos basadas en: A - *M. Velayos 7035* (FMB), B, C - *H. Mendoza 19554* (FMB); D - *H. Mendoza 15333* (FMB).

8642 (FMB!); 1800-1900 m, 9-IV-2005, fr, *M. Cabrera 69* (FMB!); Reserva Natural La Planada, 1900 m, 22-IX-1995, fr, *H. Mendoza 1437* (FMB!); 30-VII-1995, fl, *H. Mendoza 882* (FMB!). Reserva Natural La Planada, sendero natural, 1°9'37"N, 77°59'13"W, 1850 m, 28-I-1997, fl, *J. Bittner 2751* (FMB!). **Valle del Cauca.** La Cumbre, Corregimiento de Bitaco, vereda Chicoral, 3°33'56"N, 76°35'3"W, 2020 m, 23-VII-2003, st, *H. Mendoza 15333* (FMB).

Discusión

Esta especie se reconoce por el secado rojizo de las hojas en los ejemplares de herbario, nervadura 5-plinervia, domacios pubescentes (tuff domatia) en la base de las venas secundarias por el envés, pétalos reflexos, conectivo minutamente prolongado en la base dorsal, y ovario 3-locular. Por la forma de los estambres cortos y oblongos con un pequeño poro apical, el cáliz lobulado y el tipo de inflorescencia, esta especie se asocia con *Miconia* sección *Amblyarrhena* (Naudin) Triana ex Hook. *f* siguiendo el sistema de Cogniaux (1891). *Miconia* sección *Amblyarrhena* se encuentra ampliamente diversificado en los Andes, es un grupo parafilético de especies (Goldenberg *et al.* 2008) y no se conocen buenas descripciones de muchas de sus especies, aspectos que no permiten, con certeza, establecer las especies más cercanas filogenéticamente a este nuevo taxón.

Entre las especies de *Miconia* de Colombia con hojas 5-plinervias, las más parecidas vegetativamente son *M. tenuis* Triana y *M. centrodesmoides* Wurdack, las cuales carecen de domacios pubescentes por el envés y el secado de los ejemplares no es rojizo.

Vegetativamente también es semejante a especies de hojas 3-5-plinervias de Ecuador y Perú como son *M. barbeyana* Cogn. (sin domacios pubescente, los pétalos son granulados y los estambre levemente dimorfos), *M. cajanumana* Wurdack (con domacios pubescentes pero con indumento de ramas e inflorescencia distinto, ápice de las hojas no acuminado, flores sésiles y más grandes, filamentos glandular pubérulos y anteras subuladas), *M. conformis* Wurdack (sin domacios, estambres dimorfos y anteras filiformes), *M. laxa* Wurdack (no tiene domacios pubescentes, las hojas son más pequeñas y no secan oscuro, hipanto glabro, pétalos suborbiculares), *M. lívida* Triana (sin domacios, hojas corto pecioladas, inflorescencias pauciflora, y flores mucho más grandes con largos estigmas), *M. ombrophila* Wurdack (no tiene domacios pubescente, el estigma es expandido, y el estilo y estambres tienen tricomas glandulares), y *M. pausana* Wurdack (sin domacios, indumento muy diferente, pétalos redondeados, estigma expandido). *M. cookii* Gleason y *M. terera* Naudin del Perú,

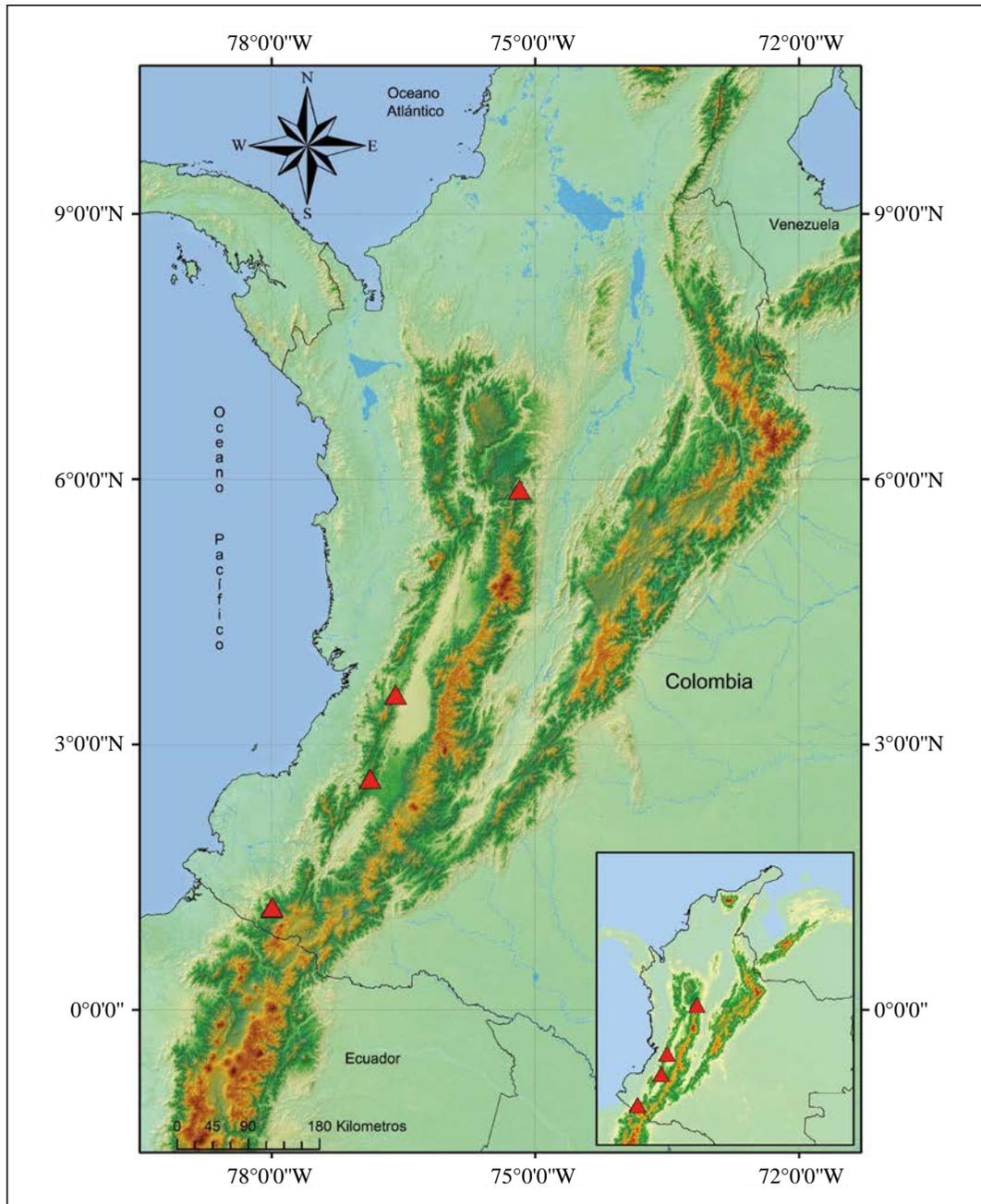


Figura 3. Distribución geográfica de *Miconia brigittei* (triángulos rojos).

también son parecidas vegetativamente, pero difieren por la ausencia de domacios pubescentes en el envés foliar y por ser plantas completamente glabras.

Agradecimientos

Expresamos sinceros agradecimientos al Instituto Alexander von Humboldt y especialmente a los coordinadores del proyecto Colombia BIO: Hernando García, Carlos Lasso, Mailyn González y Javier Barrigas. Extendemos nuestros agradecimientos a la comunidad de la vereda El Porvenir en Antioquia quien nos apoyó durante la expedición de Colombia

BIO. A Andrés Rymel Acosta por la elaboración de los mapas de distribución. A COLCIENCIAS, financiadora del Convenio Especial Colombia-BIO COLCIENCIAS-IAVH FP44842-109-2016 (IAVH 16-062) y a Fabián Michelangeli por sus sugerencias durante la revisión de este manuscrito.

Contribución de los autores

Humberto Mendoza-Cifuentes, compilación de información, colecciones, escritura general del artículo. Mauricio Posada, información general, discusión y escritura general del artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Almeda, F.** (2009). Melastomataceae. In G. Davidse, M. Sousa S, S. Knapp, F. Chiang [eds.], Flora mesoamericana, vol. 4 (1): 164-338. Universidad Nacional Autónoma de México, México City.
- Almeda, F., Alvear, M., Mendoza-Cifuentes, H., Penneys, D. S., Michelangeli, F.** (2016). Melastomataceae. En: R. Bernal, S. R. Gradstein, M. Celis (Eds.). Catálogo de plantas y líquenes de Colombia (pp. 1585-1664). Bogotá. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Cogniaux, A.** (1891). Melastomataceae. Pages 1-1256 in A de Candolle, C de Candolle, eds. Monographie Phanerogamarum. Vol 7. Masson, Paris.
- Goldenberg, R., Penneys, D. S., Almeda, F., Judd, W. S., Michelangeli, F. A.** (2008). Phylogeny of *Miconia* (Melastomataceae): patterns of stamen diversification in a megadiverse neotropical genus. International Journal of Plant Sciences, **169**: 963-979.
- Goldenberg, R., Almeda, F., Caddah, M. K., Martins, A. B., Meirelles, J., Michelangeli, F. A., Weiss, M.** (2013). Nomenclator botanicus for the neotropical genus *Miconia* (Melastomataceae: Miconieae). Phytotaxa, **106**: 1-171.
- Michelangeli, F. A., Almeda, F., Alvear, M., Bécquer, E. R., Burke, J., Caddah, M. K., Goldenberg, R., Ionta, G. M., Judd, W. S., Majure, L. C., Meirelles, J., Nicolas A. N., Ocampo, G., Penneys, D. S., Dan Skean Jr., J., Ulloa Ulloa, C.** (2016). (2462) Proposal to conserve *Miconia*, nom. cons. against the additional names *Maieta* and *Tococa* (Melastomataceae: Miconieae). TAXON, **65** (4): 892-893.
- IUCN.** (2012). Iucn red list categories and criteria: Version 3.1. Second edition. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK.
- IUCN Standards and Petitions Subcommittee.** (2014). Guidelines for using the IUCN red list categories and criteria. Version 11. Prepared by the standards and petitions subcommittee. Downloadable from <http://www.Iucnredlist.Org/documents/redlistguidelines.Pdf>. IUCNCogniux (1891)
- Wurdack, J. J.** (1986). Atlas of hairs for Neotropical Melastomataceae. Smithsonian Contributions to Botany, **63**: 1-80.

Cananguchales y manglares: humedales forestales de las zonas bajas tropicales, tan semejantes como contrastantes

Ligia Estela Urrego G.

Departamento de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 23 de noviembre de 2017

Resumen

A pesar de la marcada diferencia existente entre cananguchales y manglares, dada la influencia marina sobre éstos últimos, se identificaron semejanzas a partir del análisis de datos de vegetación, tomados en parcelas de 1000 m², y de análisis de correspondencia canónica. Factores ambientales restrictivos tales como, el drenaje, la inundación, y la profundidad del horizonte orgánico, influyeron en la estructura y diversidad de la vegetación en ambos bosques. La diversidad se incrementó con la disminución progresiva de las condiciones de estrés asociada a estos factores, a lo largo del gradiente ambiental, desde suelos arcillosos muy mal drenados, en basines y depresiones mal drenados, hasta diques y partes altas y bien drenadas del plano de la inundación, donde colonizan especies de los bosques vecinos. Los cambios climáticos post-glaciales establecidos con base en el análisis palinológico de columnas de sedimentos, evidenciaron la colonización progresiva de las especies dominantes, pero las condiciones del máximo térmico Holocénico posibilitaron el establecimiento y expansión de cananguchales y, con la estabilización de los niveles del mar, de los manglares 4000 años AP. Análisis de imágenes satelitales, observaciones fenológicas y series de tiempo de variables climáticas mostraron que *Rhizophora mangle* y *Mauritia flexuosa* han respondido positivamente a las sequías de corta duración asociadas al ENSO (El Niño *Southern Oscillation*). Eventos, como el mar de leva en los manglares, han incidido en las tasas de mortalidad, reclutamiento y sobrevivencia de la regeneración natural. Los mayores cambios de la vegetación en las últimas décadas se asociaron principalmente con perturbación de origen antrópico. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Regeneración natural; Fenología; Polen; Amazonia; Caribe; Eventos extremos.

***Mauritia*-dominated forests and mangroves: Tropical swamp forests, as similar as contrasting**

Abstract

Despite the marked difference between *Mauritia*-dominated forests and mangroves, given the marine influence on the latter, similarities were identified from the analysis of vegetation data, taken in plots of 1000 m², and canonical correspondence analysis. Restrictive environmental factors, such as drainage, flooding, and the depth of the organic horizon, influenced the structure and diversity of vegetation in both forests. Diversity increased with the progressive reduction of the stress conditions associated with these factors, along the environmental gradient, from very poorly drained clayish soils, in basins and depressions, to dikes and well drained highest sites of the floodplains, where colonization of species from neighbouring forests take place. The post-glacial climatic changes detected on palynological analysis of sediment cores, evidenced the progressive colonization of the dominant species, but the conditions of the Holocene thermal maximum allowed the establishment and expansion of *Mauritia*-dominated forests and, with the stabilization of the sea-level, of the mangroves around 4000 years AP. Analysis of satellite images, phenological observations and time series of climatic variables showed that *Rhizophora mangle* and *Mauritia flexuosa* have responded positively to short-term droughts associated with ENSO (El Niño Southern Oscillation). Events, such as storm surges in mangroves, have influenced the mortality, recruitment and survival rates of natural regeneration. The major vegetation changes in the last decades are mainly associated with anthropogenic disturbances. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Natural regeneration; Phenology; Pollen; Amazon; Caribbean; Extreme events.

Correspondencia:

Ligia Estela Urrego G., leurrego@unal.edu.co, **Recibido:** 11 de diciembre de 2017, **Aceptado:** 31 de marzo de 2018, **Editor:** Jaime Cantera

Introducción

Los bosques inundables o humedales forestales cubren extensas áreas en las llanuras aluviales de los grandes ríos en Colombia y el neotrópico. El término incluye gran variedad de ecosistemas con diferente nivel y duración de la inundación, estacional o permanente, y comprende también bosques bajo la influencia de las mareas, como los manglares. Las características químicas del agua que las inunda, afectan de manera significativa la disponibilidad de nutrientes en los suelos. Además, la dinámica fluvial que desencadena diferentes procesos geomorfológicos y sedimentológicos que dan origen a un amplio espectro de geoformas y tipos de suelo, determinan en gran medida la estructura y composición florística de la vegetación, dando lugar a una amplia gama de tipos de bosque.

A los humedales forestales se les confiere gran importancia no solo por considerarse entre los mayores sumideros de CO₂, alcanzando entre 830 y 1218 Mg C/ha (Donato, *et al.* 2012), sino también porque albergan una alta diversidad de fauna de vertebrados e invertebrados al suministrarles refugio y alimento, y generan gran cantidad de servicios ecosistémicos clave tales como la regulación de los ciclos, hidrológico, de nutrientes y, especialmente, de gases de efecto invernadero como el CO₂ y el metano. Además, estos ecosistemas ofrecen gran cantidad de productos maderables y no maderables para las comunidades humanas asentadas a su alrededor, y por esta razón se encuentran altamente amenazados e inclusive algunos, en vía de desaparición.

En Colombia, se denominan canaguchales, a los bosques dominados por la palma *M. flexuosa* que crecen en las zonas mal drenadas de los planos de inundación y las terrazas bajas en la Amazonía, y se denominan morichales, a los ecosistemas también dominados por esta especie en las llanuras inundables de la Orinoquia. A pesar de la alta dominancia de *M. flexuosa* y tener un origen geológico similar, hace millones de años, estos ecosistemas evolucionaron de manera diferente y hoy son claramente distinguibles en sus características ambientales, estructurales y florísticas (Urrego, *et al.*, 2013). Los canaguchales forman parte tanto de los bosques de *várzea*, inundados por aguas blancas de origen andino y de los de *igapó*, inundados por aguas negras o claras de origen amazónico (Prance, 1979, Wittman, *et al.*, 2004).

Por otro lado, los manglares son bosques que crecen en el ecotono océano-continente, se presentan en las franjas tropicales y subtropicales en todo el mundo, y su composición florística, así como su estructura, están determinadas por la interacción de variables complejas como el ciclo y amplitud de las mareas, la posición geomorfológica, la precipitación y la dinámica de ríos que, a su vez, determinan la salinidad del sustrato y la ocurrencia de ciertas especies (Krauss, *et al.*, 2008). En Colombia, el régimen de precipitación y la dinámica de las mareas tan contrastantes entre las costas Caribe y Pacífica, se refleja en las diferencias estructurales y florísticas de los manglares de ambas costas, con mejor desarrollo estructural y diversidad en la segunda que en la primera.

Dada la enorme distancia que presentan actualmente manglares y canaguchales en nuestro territorio, una comparación entre ellos no tendría sentido. Sin embargo, en la Amazonia brasilera, hacia la desembocadura de los grandes ríos en el Atlántico, ambos ecosistemas están distribuidos a lo largo del gradiente de inundación y de la influencia de las mareas, mientras que los canaguchales aparecen paulatinamente a medida que desaparecen la influencia mareal y los manglares (Pires y Prance, 1985).

Como se describe a continuación, estos bosques guardan similitud en cuanto a los factores ambientales que determinan su estructura y su riqueza de especies, asociados éstos a la dinámica fluvial y marina, a los patrones de inundación, así como a las adaptaciones morfológicas y fisiológicas de las especies a ambientes inundados y suelos anóxicos, tales como los neumatóforos y raíces fúlcreas presentes en algunas especies dominantes en ambos ecosistemas. Se analizarán posteriormente las respuestas de la vegetación a cambios ambientales y climáticos desde su establecimiento en el Holoceno hasta el presente.

Métodos

La relación entre los canaguchales y las características ambientales, se hizo con base en datos tomados en 10 parcelas de 1000 m² distribuidas en la cuenca media del río Caquetá (Urrego, 1997) y, una parcela de una hectárea en la cuenca del río Calderón (Urrego, *et al.*, 2013) en el trapecio Amazónico (Anexo 1), la que fue subdividida en 10 subparcelas de 1000 m². En cada una de ellas se midieron e identificaron todos los árboles y palmas con diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor o igual a 10 cm. En estas parcelas se midieron mensualmente el nivel de inundación o nivel freático, con una vara marcada (cm), y el drenaje según la clasificación de FAO (1977). En cada una de las parcelas se tomaron muestras al azar de los 25 cm superficiales del suelo a las que, posteriormente, se les hicieron análisis químicos estándar que incluyeron: capacidad de intercambio catiónico, pH, porcentaje de materia orgánica y concentración de nutrientes mayores (Al, Ca, Mg, Na, K y P), así como análisis granulométricos (contenidos de arcilla, arena y limo). Estos análisis se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

En los manglares se establecieron parcelas de 500 m² así: 86 parcelas en la isla de San Andrés (Urrego, *et al.*, 2009a), 87 en el Golfo de Urabá (Urrego, *et al.*, 2014), 12 en la bahía de Cispatá (Agudelo, *et al.*, 2015) y 26 en La Guajira (Molina, 2009, Bernal, *et al.*, 2016). En ellas, se hicieron las mismas mediciones que en los canaguchales. El número mínimo de parcelas sujetas a muestreo se estableció con base en un pre-muestreo de 5 parcelas por cada tipo de bosque, las que abarcaron la mayor variabilidad ambiental posible y contemplaron un error estadístico máximo de 15% (Lema, 2003). En todos los sitios, los tipos de manglares se establecieron con base en la clasificación fisiográfica de Lugo y Snedaker (1974).

En ambos casos la agrupación de las especies, su relación con las variables ambientales, y la asignación de los tipos de bosque se hizo con base en Análisis de Correspondencia Canónica utilizando el software CANOCO 4.5 (Ter Braak y Smilauer, 2002). En ellos se incluyeron matrices de datos florísticos y estructurales de todos los árboles con $DAP \geq 10$ cm, y ambientales tomados en cada una de las parcelas muestreadas. En el caso de los cananguchales, la dominancia se midió con el índice de Simpson y la equidad con el índice de Shannon-Wiener (Krebs, 1998); este último índice se calculó al usar los datos de abundancia proporcional de especies, incluyendo y excluyendo *M. flexuosa*, con el fin de observar la influencia de esta especie dominante en la diversidad.

Para los análisis de la regeneración natural se establecieron 4 sub-parcelas cuadradas de 1 m² en cada una de las parcelas de 0,1 ha, antes descritas. En ellas, se marcaron todas las plántulas con altura inferior a 1 m y se evaluaron semestralmente, las tasas de mortalidad, reclutamiento y supervivencia, durante año y medio en los manglares de la Bahía El Uno y la desembocadura del río Turbo, en el Golfo de Urabá (Hoyos, et al., 2013) y dos años en los cananguchales del plano de inundación del río Calderón en el trapezio amazónico (Galeano, et al., 2015). Adicionalmente, en cada medición y sub-parcela se midieron el drenaje, la tasa de sedimentación y nivel de inundación. Las relaciones entre los parámetros de la regeneración natural medidos y las variables ambientales se realizaron por medio de un análisis de redundancia con el software CANOCO 4.5 (Ter Braak y Smilauer, 2002).

La influencia de eventos climáticos extremos sobre los ecosistemas se llevó a cabo a través del análisis de la relación de éstos con la fenología reproductiva para los cananguchales (Urrego, et al., 2016) y con un índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés) para los manglares (Galeano, et al. 2017). El registro de la fenología reproductiva de

M. flexuosa se realizó mensualmente entre diciembre de 2010 y noviembre de 2012 en 154 palmas adultas marcadas en la parcela de 1 ha localizada en el plano de inundación del río Calderón en el trapezio amazónico. Junto a cada palma se midió mensualmente el nivel de inundación, usando una vara marcada (cm). A través de un análisis de redundancia realizado con CANOCO 4.5 (Ter Braak y Smilauer, 2002), se estableció la relación de las fenofases con estos niveles y con los valores diarios de las temperaturas máximas y mínimas y la nubosidad, y con la precipitación mensual medidas en estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Vázquez Cobo de Leticia (Amazonas), y suministrados por el IDEAM (2010- 2012). Las diferencias Interanuales en variables climáticas y la producción de frutos se estableció utilizando un ANOVA de un factor y pruebas de rango múltiple (MRT) en STATGRAPHICS (Centurión XV, Versión 15.1.02).

En los manglares de las Islas del Rosario, se realizó un análisis de imágenes satelitales entre 2002 y 2014, usando

el NDVI y un análisis de series de tiempo de velocidad del viento, precipitación diaria, altura y período pico del oleaje, así como temperaturas máxima y mínima (Galeano, et al., 2017). Se identificaron los valores extremos (ecológicos y estadísticos) de estas variables y se correlacionaron con los valores de NDVI tanto de los manglares como de las coberturas vegetales vecinas (playas y el bosque seco).

Los cambios de la vegetación a largo plazo se identificaron con base en análisis palinológicos de columnas de sedimentos, extraídas con una sonda rusa modificada tipo Macaulay (Traverse, 1988), de cananguchales, manglares y lagunas cercanas a éstos. La profundidad de cada una de ellas se limitó a los horizontes orgánicos y arcillo-limosos. De cada sección, en el laboratorio, se obtuvieron muestras de un volumen constante, cada 5 cm. La extracción del polen de cada muestra se hizo utilizando las técnicas estándar de laboratorio (Faegri e Iversen, 1989). Para todas las secciones se construyeron modelos de edad con base en dataciones con isótopos de ¹⁴C y ²¹⁰Pb,

Resultados y discusión

La composición florística y estructural de los bosques asociada con la variabilidad ambiental a escala regional. En el medio Caquetá se identificaron seis tipos de cananguchales (Urrego, 1997) que difirieron en la posición geomorfológica dentro de la llanura aluvial, el drenaje, el espesor del horizonte orgánico en el suelo, y el porcentaje de materia orgánica y de intercambio catiónico en los suelos. El drenaje es función de la textura del suelo y expresa el número de meses durante los cuales el suelo permanece inundado, lo que, a su vez, rige la acumulación de materia orgánica y el pH del suelo. Se registraron dos tipos con drenaje moderado y cuatro en suelos mal drenados. Los primeros se desarrollaron principalmente en el plano aluvial con inundación estacional por ríos de agua blanca (Caquetá), con mayor diversidad de especies (entre 284 y 347 especies/ha) y árboles más altos (16-18 m en promedio y los dominantes entre 25 y 30 m). Los segundos se ubicaron en los sitios mal drenados en complejos de barras de cauce y terrazas bajas, y mostraron un gradiente de drenaje y de influencia de la inundación por ríos de agua negra de origen amazónico. A medida que el drenaje empeoró, se incrementó la profundidad promedio de la capa orgánica (de 5 a 58 cm), y la influencia de la inundación por aguas negras, y disminuyeron la disponibilidad de nutrientes, la altura del dosel (11-15 m en promedio y los árboles dominantes, especialmente palmas, entre 22 y 30 m), y la riqueza de especies arbóreas (entre 82 y 214 especies especies/ha en promedio). La dominancia de *M. flexuosa* disminuyó a medida que mejoró el drenaje y aumentó la riqueza de otras especies arbóreas (Urrego, 1997).

Los cananguchales de la terraza baja mal drenada del río Calderón, en el trapezio Amazónico (Urrego, et al., 2013a), mostraron relaciones similares con las variables ambientales (Figura 1); mayor diversidad y desarrollo en altura de

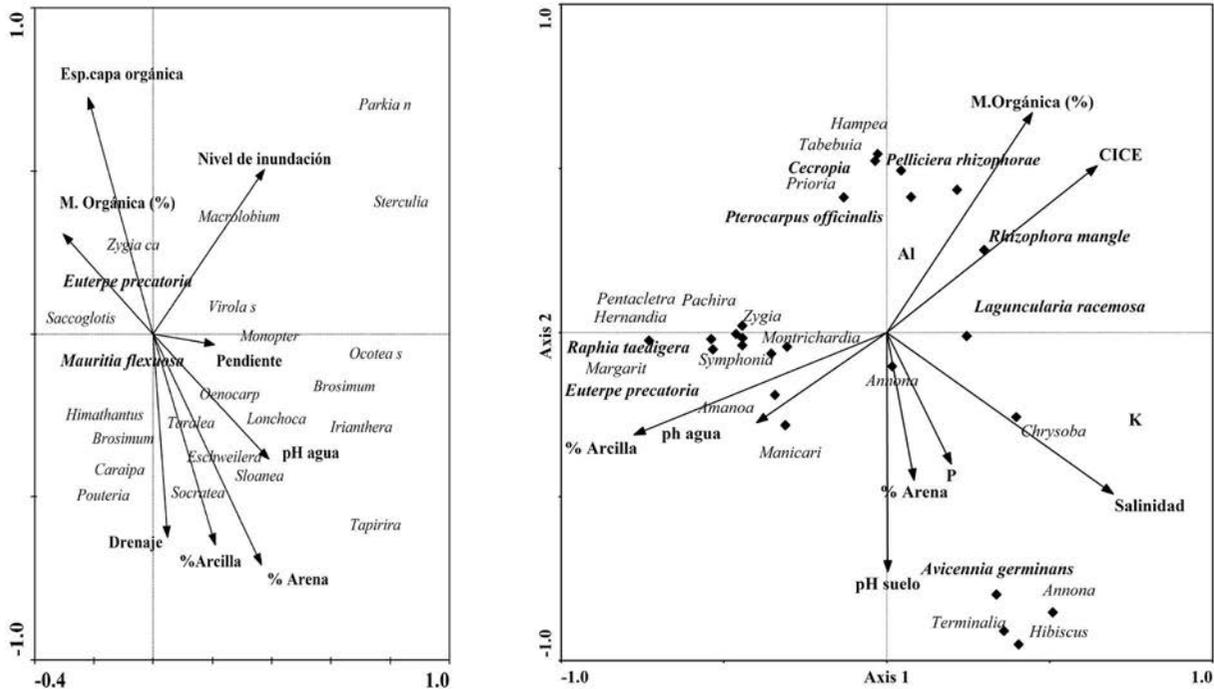


Figura 1. Biplots: resultado de los análisis de correspondencia canónica (CCA) entre el área basal por especie y variables ambientales medidas en cananguchales del trapecio Amazónico (izquierda) y bosques aluviales y manglares del Golfo de Urabá (derecha). Se observa mayor dominancia de las especies típicas de cananguchales asociadas con mayor inundación, a la profundidad de la capa orgánica (izquierda), y en los manglares se asocian a estas mismas variables, y a la salinidad (derecha).

los árboles en sitios mejor drenados, con menor acumulación de materia orgánica y pH más bajos en los suelos. Cuando los anteriores se compararon con los de la terraza baja mal drenada del río Caquetá, que alberga bosques semejantes, se encontró que los primeros son más diversos que los segundos, pero que en los últimos, cuando se excluyó *M. flexuosa* de los cálculos, la equidad fue mayor, lo que evidencia que en la cuenca media del río Caquetá muchas otras especies arbóreas pueden presentar alta dominancia. El área basal de *M. flexuosa* respecto a las demás especies, fue mayor en los cananguchales del río Calderón, mientras que el área basal de las otras especies arbóreas fue mayor en el medio Caquetá. La riqueza de especies en los cananguchales del río Calderón fue más del doble de la registrada en el medio Caquetá. Estas diferencias se relacionan con el drenaje, el nivel de inundación, y las propiedades físico-químicas de los suelos, así como con la presencia de especies de los bosques vecinos bien drenados, y la distancia hasta estos bosques. Por ejemplo, los cananguchales de la terraza baja mal drenada del medio Caquetá se acercaron a los bosques que crecen sobre arenas blancas (varillales) que son muy pobres en nutrientes, diversidad y desarrollo estructural. Por el contrario, los cananguchales del río Calderón se encuentran cerca de la transición con los bosques de tierra firme, lo que facilita la colonización de especies menos tolerantes a la inundación, lo que aumenta así la diversidad, como se ha registrado en otras partes de la Amazonia (Wittmann, et al., 2006).

En los manglares analizados en la Isla de San Andrés (Urrego, et al., 2009a), el Golfo de Urabá (Urrego, et al., 2014, Mira, et al., 2017), la bahía de Cispatá (Agudelo, et al., 2015) y La Guajira (Molina, 2009, Bernal, et al., 2016), se identificaron diferentes tipos de bosques cuya estructura y composición florística, más simplificada en términos de riqueza de especies en comparación con la de los cananguchales, se relacionaron con el drenaje y la textura de los suelos, el nivel de inundación, el contenido de materia orgánica en el suelo, la profundidad del horizonte orgánico y, especialmente, con la salinidad, como lo indicaron los análisis de correspondencia canónica. En general, el nivel de inundación fue muy variable (entre 11 y 70 cm), y se relacionó positivamente con el espesor de la capa orgánica (entre 5 y 25 cm). En todos los sitios se registraron al menos tres tipos de manglar (*sensu*. Lugo y Snedaker, 1974), manglares de borde ubicados a lo largo de la línea de costa con influencia directa de las mareas y dominados por mangle rojo, *R. mangle*, en el cual predominan suelos orgánicos con presencia de sedimentos finos (limos y arcillas), mayor nivel de inundación y espesor del horizonte orgánico, así como salinidad baja a intermedia. Un segundo tipo, denominado manglar de cuenca o de interior, alejado de la línea de costa, con alta salinidad y predominancia de suelos minerales arenosos o arcillo limosos, dominados por mangle negro, *Avicennia germinans* (L.). Sin embargo, en la isla de San Andrés estos últimos se registraron también cercanos a la línea de costa. Un tercer tipo de bosque denominado

manglar mixto, que presentó salinidad intermedia, menor porcentaje de materia orgánica en los suelos que los anteriores, y en el que, además de estas especies, se presentan el mangle blanco, *Laguncularia racemosa* (L.) y el helecho *Acrostichum aureum* L. Ambas especies indicadoras de mayor disponibilidad de luz, asociada a bosques con un dosel más abierto y, relacionado en la mayoría de los casos, con la perturbación antrópica o natural. La disponibilidad de nutrientes - especialmente cationes (Mg, Ca, Na y K) - se incrementó con el aumento de la influencia marina, como la que se presentó en los manglares de borde de la isla de San Andrés, en el extremo nororiental del Golfo de Urabá y en la bahía de Cispatá.

En la estructura, se observó un descenso en la altura promedio (H) de los árboles y del área basal con el incremento en la salinidad y en la estacionalidad de la precipitación. Los manglares de la isla de San Andrés registraron mayor altura (entre 14 y 16 m en los menos salinos, y entre 8 y 10 m en los de mayor salinidad), y la Bahía de Cispatá, mientras que el menor desarrollo se ha observado en los manglares de La Guajira (3 a 7 m en promedio entre los menos y los más salinos, respectivamente) donde la estación seca es más amplia e intensa. Se debe anotar que en los sitios con mayor nivel de inundación, el valor máximo registrado, en promedio, alrededor de 40 cm en la estación lluviosa y, un mínimo de 10 cm en la estación seca, lo cual limita el desarrollo de la vegetación (Molina, 2009). Los manglares localizados en el Golfo de Urabá (Figura 1), a pesar de presentar la menor salinidad de todos los manglares estudiados, asociada con la fuerte influencia de los ríos que desembocan en el Golfo; éstos presentaron árboles de menor altura promedio, circunstancia asociada probablemente con la fuerte explotación a la que están sometidos como se ha registrado en varias investigaciones (Blanco, et al., 2012, Urrego, et al., 2014), y se refleja en la escasa presencia de árboles grandes en la mayoría de los bosques muestreados y en la cercanía de éstos a los centros poblados.

Al igual que en los cananguchales (Figura 1), en los manglares se presentó colonización de especies de los bosques vecinos, a medida que se mejoraron las condiciones de drenaje y de inundación, y que disminuyera la salinidad. En los manglares del Golfo de Urabá (Urrego, et al., 2014) se registraron especies del bosque aluvial inundado (e.g. *Raphia taedigera* (Mart.) Mart., *Cecropia peltata* L., *Pachira aquatica* Aubl., *Pterocarpus officinalis* Jacq. y *Euterpe precatoria* Mart.) y del bosque seco tropical, en los manglares de San Andrés (e.g. *Annona glabra* L., *Ficus trigonata* L., *Phyllanthus acidus* (L.), *Bursera simaruba* (L.) Sarg.) , lo que muestra la fuerte influencia de la vegetación regional, además de las condiciones ambientales, sobre la composición florística de los humedales forestales (Urrego et al., 2009a), tal como se registró en los cananguchales. Sin embargo, el porcentaje de la varianza en la composición de especies no explicado por las variables ambientales medidas, que según los análisis de correspondencia canónica oscila

entre 2 y 35%, obedece tanto a la interacción con factores bióticos, como a la interacción entre las especies de plantas y de éstas con la fauna. En segundo lugar, los límites entre estos humedales y los de tierra firme no son discretos, las especies no se encuentran restringidas a bandas estrechas y en la medida en que las condiciones restrictivas disminuyen gradualmente, especialmente la inundación (incluida la de las mareas) y mejora el drenaje, aparecen las especies menos adaptadas a tales restricciones, lo que demuestra la plasticidad de muchas de las que están presentes en los ecotonos. Aunque estos bosques son comparables a los de otras partes del mundo, siempre habrá diferencias en la composición florística de cada uno de estos humedales forestales, derivadas ellas de la fuerte influencia de las especies provenientes de los bien drenados bosques vecinos (Ellison, 2002, Wittmann, et al., 2006) (Figura 1).

Manglares, cananguchales y los cambios ambientales/ climáticos en el mediano y largo plazo. Los primeros registros de polen fósil obtenidos de columnas de sedimentos, de *Rhizophora* en el Mioceno (Hoorn, 1994) en el norte de Suramérica, señalan que los sedimentos de manglar se depositaron en un ambiente fluvial de origen amazónico en épocas de alto nivel del mar, en las que la cordillera de los Andes aun en formación, permitía lazos con los océanos, y en las que el Golfo de Maracaibo, los Llanos Orientales y la Amazonia estaban todavía conectados. Estas condiciones y posibilitaron la alternancia de periodos dominados por *Rhizophora* con los dominados por *Mauritia* (Hoorn, 1994, Urrego, et al., 2013a) resaltando la prevalencia de la influencia marina en la dominancia de uno u otro taxón y su distribución a lo largo de un gradiente de inundación.

Según análisis palinológicos, la historia holocénica de manglares y cananguchales, está muy relacionada con el incremento en temperaturas, precipitación y niveles del mar (Hodell, et al., 1991, Haug, et al., 2001) que reemplazaron las condiciones frías, de aridez, y bajo nivel del mar que prevalecieron al culminar la última glaciación, 18.000 años Antes del Presente (AP), cuando se registraron parches aislados de ambos humedales (Woodroffe y Grindrod, 1991, Urrego, 1997). Alrededor de 11.000 años de AP, los incrementos en temperatura y precipitación, como resultado de la migración de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) (Haug, et al., 2001), elevaron los niveles de los ríos y de inundación, que combinados con el descenso en el nivel de mar, permitieron la colonización temprana de manglares, como se registró en la cuenca de Panamá (González, et al., 2006), y se inició el proceso de sucesión aluvial en la Amazonía (Urrego, 1997, Van der Hammen, et al., 1992).

En los cananguchales del medio Caquetá (Urrego, 1997), el descenso de la inundación, y la dinámica de erosión-deposición del río Caquetá, dieron lugar a la formación de extensas playas arenosas, inicialmente colonizadas por herbáceas (Cyperaceas, Poaceas y Asteraceas), que contribuyeron al desarrollo de suelos y del bosque pionero de *Cecropia*. Posteriormente, el descenso regional de la precipitación y

los niveles de los ríos asociados a un periodo seco entre 7000 y 8000 años AP, dieron lugar a la formación de diques cubiertos por bosques de *várzea* estacional (dominados por *Ficus insípida* Willd. y *Cedrela ododrata* L.). No obstante, las oscilaciones en la precipitación y altas temperaturas asociadas al Máximo Térmico Holocénico (MTH), dieron paso a la formación de playas, que precedieron al complejo de barras del río (diques) y aislamiento de *basines* y depresiones en los que se establecieron los actuales cananguchales, con acumulación de material orgánico y arcillas, que se consolidaron alrededor de 4000 años AP (Figura 2), época en la cual disminuyó la precipitación en la Amazonía occidental y en la cuenca del bajo Magdalena-Cauca-San Jorge, probablemente asociados al “mega ENSO” (Van der Hammen y Cleef, 1992, Van der Hammen, *et al.*, 1992). Este patrón de formación de playas, diques y depresiones ocupadas por cananguchales, se repitió en varios sitios de la llanura aluvial, regidos por migraciones del lecho del río, inundaciones estacionales, alternancia de periodos secos (2700-2000, 1600, 700 años AP) y procesos de sedimentación, especialmente los que se asociaron a la Anomalía Climática Medieval (ACM) y a la Pequeña Edad de Hielo (PEH), desde 700 años Después de Cristo (DC), cuando se registró incremento en la acumulación de materia orgánica en los perfiles de suelos de los cananguchales, y descensos en la sedimentación y los niveles de inundación que continuaron hacia el presente.

Los procesos geomorfológicos asociados a la dinámica fluvial, las fluctuaciones en la precipitación y los niveles de inundación, asociados por igual con el “mega ENSO” (Van der Hammen y Cleef, 1992), fueron la causa más determinante en la formación y cambios en la composición florística en los humedales forestales de zonas bajas tanto de la Amazonía como del Pacífico colombiano (Berrío, *et al.*, 2000, Vélez, *et al.*, 2001, Urrego y Del Valle, 2002, Urrego, *et al.*, 2006), los cuales describen un patrón de zonación

desde el cauce de los ríos, bordeados de playas, hacia tierra adentro, con bosques diversos en las partes mejor drenadas y rodales de palmas más homogéneos en *basines* y partes bajas, mal drenadas, detectable en los análisis palinológicos.

En los manglares del Caribe, las condiciones post-glaciales no fueron tan distintas. Además de altas precipitaciones y temperaturas, se registraron altos niveles del mar. Al comienzo del Holoceno, la transgresión marina seguida por la disminución relativamente rápida de los niveles del mar, dio lugar a la formación de lagunas, estuarios, pantanos y humedales costeros (Raasveldt y Tomic, 1958, Urrego, *et al.*, 2013), aptos para la colonización de manglares, especialmente durante el MTH entre 10.500 y 5400 años AP (Haug, *et al.*, 2001), en el que se presentaron altas descargas de los ríos. Previamente a la expansión de los manglares, predominaron sedimentos marinos alóctonos y niveles oscilantes del mar (Carillo-Bastos, *et al.*, 2010, Cohen, *et al.*, 2016), representados por la secuencia de herbáceas típicas de marismas (Amaranthaceae - Chenopodiaceae, Cyperaceae y Poaceae), como se registró en la laguna Navío Quebrado (Figura 2) en la Guajira (Urrego, *et al.*, 2013), entre 6280 y 3240 años AP, con escasa presencia de manglares dominancia de marismas como en las costas de Guyana y Venezuela alrededor de 7000 años AP (Van der Hammen, 1988, Rull, *et al.*, 1999).

Sin embargo, los patrones de precipitación no fueron homogéneos durante el MTH. La ocurrencia de periodos secos relacionados con mayor variabilidad del “Mega” ENSO (Haug, *et al.*, 2001), entre 8300 y 7800 años AP y alrededor de 5000 años AP (Mayewski, *et al.*, 2004; Haug, *et al.*, 2001) causaron la disminución de los niveles de los lagos en el Caribe, especialmente entre 6000-5000 años AP, que combinados con la disminución en las tasas de incremento del nivel del mar, facilitaron la expansión de los manglares alrededor de 6000 AP, en la laguna Navío Quebrado y en estuarios, lagos, deltas e islas del Caribe (Urrego, *et*

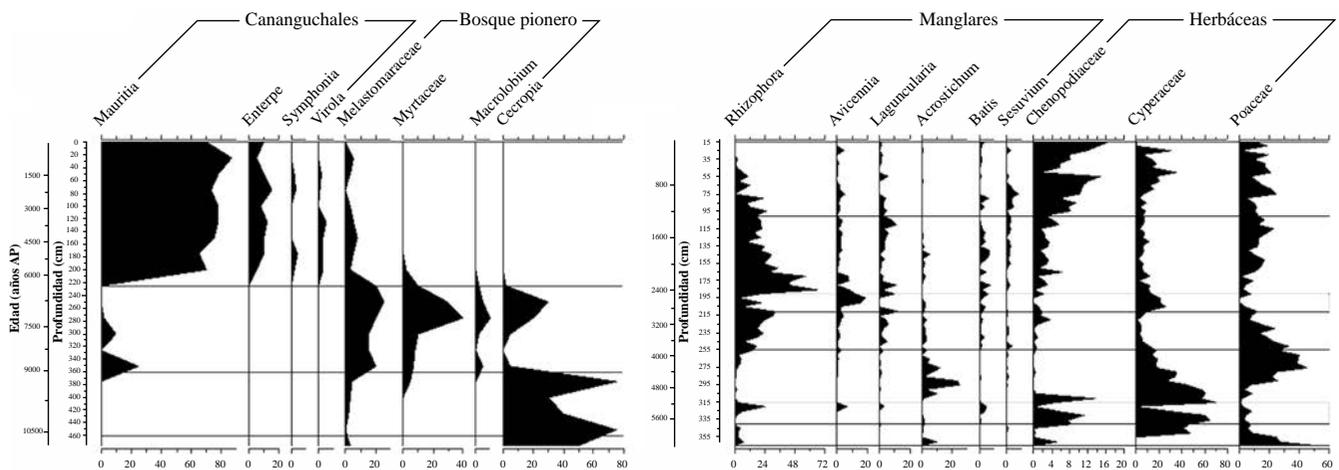


Figura 2. Diagrama de porcentajes del polen de las especies dominantes en columnas de sedimentos de cananguchales del Medio Caquetá (izquierda) y de la laguna Navío Quebrado (La Guajira). Se registran los cambios de la vegetación desde el holoceno medio cuando se establecieron ambos ecosistemas asociados a las fluctuaciones climáticas del máximo térmico holocénico.

al., 2013 y referencias incluidas en éste). No obstante, se registró asincronía en la colonización de manglares con otros sitios del Caribe, derivada de la geomorfología local. En La Guajira el establecimiento pleno de los manglares en ambientes protegidos del impacto directo del oleaje, tuvo lugar entre 3840 y 1270 años AP, asociado a la estabilización de los niveles del Mar Caribe alrededor de 3000 años AP (Rull, 1999). No obstante, un periodo muy seco (Haug, et al., 2001) con disminución en la descarga de los ríos entre 2850 y 2450 años AP, causó una disminución de los manglares y el reemplazo de la dominancia de *R. mangle* por *A. germinans*, más tolerante a alta salinidad y menor inundación. Aunque los manglares se recuperaron con el incremento en la precipitación, la disminución de la insolación veraniega del hemisferio norte (Hoddell, et al., 1991) a partir de 2000 años AP, causó una disminución regional en la precipitación del Caribe, con aumentos en la salinidad, que redujeron los manglares, proceso que se acentuó con el incremento en la temperatura asociada a la ACM y con la intervención humana, reflejada en la dominancia de *L. racemosa* en los registros palinológicos (Urrego, et al., 2013).

Las secuencias palinológicas de los últimos 500 años en el Caribe (Figura 3) muestran cambios importantes en los manglares y la vegetación costera, que se asocian a la variabilidad geomorfológica, climática y de influencia antrópica. Entre 450 y 150 años AP, durante la PEH, el desplazamiento hacia el sur de ZCIT (Haug, et al., 2001) originó sequías, hipersalinización y deterioro de las condiciones para los manglares, y expansión de las herbáceas (Urrego, et al., 2013). No obstante, en San Andrés (González, et al.,

2010) en las últimas décadas de la PEH se registró recuperación de los manglares asociada a condiciones más húmedas, requeridas para compensar el incremento en el nivel del mar.

Durante el Antropoceno (últimos 150 años), se ha registrado una tasa acelerada de incremento en el nivel del mar, que ha generado respuestas opuestas en el Caribe Colombiano (Urrego, et al., 2018). Los manglares se expandieron tanto en sitios con alto aporte de sedimentos (Figura 3) como en los deltas de los ríos Ranchería (Urrego, et al., 2013), Sinú (Castaño, et al., 2010), Atrato y Turbo (Suárez, et al., 2015), en los cuales la disipación de la energía del oleaje y la deposición de sedimentos gruesos compensaron el incremento en el nivel del mar, y mantuvieron el sustrato para el establecimiento de los manglares, como en otros sitios del Caribe (Parkinson, et al., 1994). En islas oceánicas, como San Andrés (González, et al., 2010), donde no hay aportes permanentes de agua dulce, el incremento en los manglares se asocia a la acreción de turba subterránea por incremento en la masa de raíces (Mackee, et al., 2007). Sin embargo, en sitios con impacto directo del oleaje sin aportes aluviales permanentes, se ha registrado fuerte erosión costera (Rangel y Anfuso, 2009) con pérdidas significativas de manglares como en Bahía Portete (Molina, 2009, Bernal, et al., 2016) y la laguna de Camarones (Urrego, et al., 2013), en la Guajira, y las bahías no protegidas del Golfo de Urabá (Suárez, et al., 2015).

La tasa de incremento actual en el nivel del mar en el Caribe colombiano (0,36 -0,56 cm/año, Torres, et al., 2006) está dentro los límites de la máxima tolerable para los

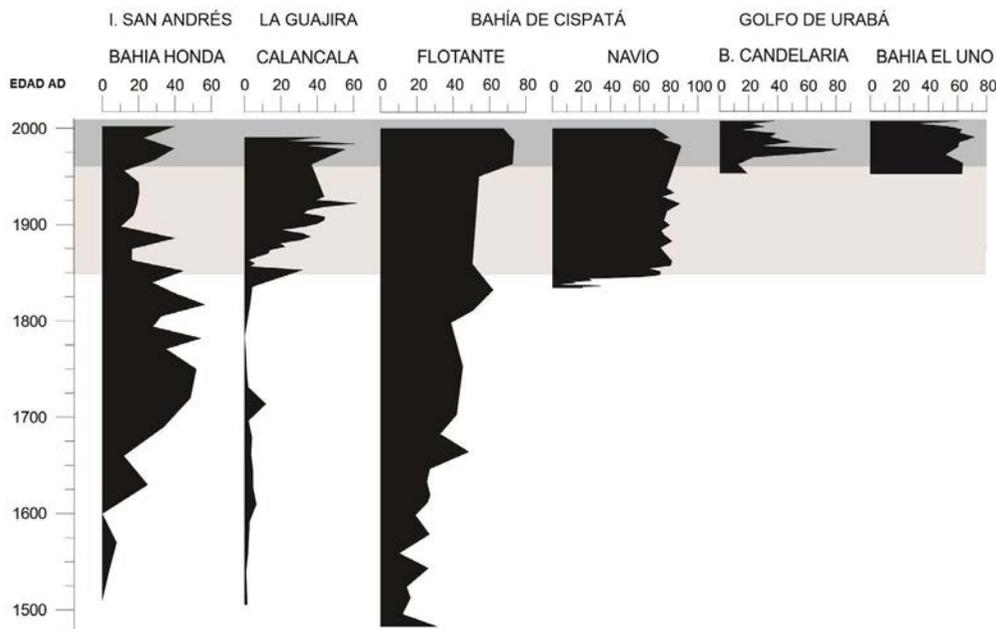


Figura 3. Diagramas de porcentajes del polen de manglares correspondientes al último milenio en lagunas y manglares del Caribe colombiano. Nótese el aumento de manglares en los últimos 150 años en sitios cercanos a los deltas y a la desembocadura de los ríos. Nótese, igualmente, la disminución en sitios donde se registra erosión costera y perturbación antrópica.

manglares (0,09 -0,12 cm/año, **Ellison y Stoddart**, 1991), lo cual resalta la importancia de los aportes de sedimentos y agua dulce, y la geomorfología local en la conservación de los manglares ante el actual de Cambio Climático. Los manglares podrán colonizar tierra adentro, siempre y cuando cuenten con suficiente espacio de acomodación y existan los aportes de sedimentos y agua dulce necesarios. Un ejemplo claro se registró en las últimas décadas en el Golfo de Urabá (**Suárez, et al.**, 2015), en el cual se observó la relación entre la dinámica fluvio-marina y la expansión y contracción de los manglares. En el costado occidental del Golfo, altamente influenciado por el río Atrato, se depositaron nuevas áreas a lo largo de los brazos del río Atrato en zonas protegidas del viento y el oleaje, que fueron colonizadas por manglares (22%) de *R. mangle*, entre 1975 y 2009. En las zonas menos protegidas, en los extremos sur y norte del Golfo, se presentaron pérdidas de manglares asociadas a mayor energía y altura del oleaje en estas áreas, más acentuado en el costado oriental donde los manglares reciben mayor impacto del oleaje de fondo, olas de mayor altura, pero menor impacto de vientos fuertes, y mayor carga de sedimentos provenientes de la deriva litoral. También allí se registró incremento de áreas desnudas (500%) entre 1980 y 2009, y desplazamiento tierra adentro de la línea de costa (**Suárez, et al.**, 2015).

Los análisis anteriores muestran que la permanencia de ambos ecosistemas está determinada por un equilibrio entre los niveles de inundación y el aporte de sedimentos que pueda mantener el sustrato para la vegetación. Estos registros

no solo reflejan la respuesta a los cambios climáticos sino también la influencia de la dinámica fluvio-marina en la geomorfología y los suelos.

El polen como herramienta de análisis de los cambios ambientales en los manglares. La validación de la palinología como herramienta de análisis en la reconstrucción de los cambios de los manglares a largo plazo, se realizó con base en análisis de polen en muestras de sedimentos superficiales, y su relación con la vegetación en pie. El primero, se realizó en el complejo lagunar de Cispatá cercano al delta del río Sinú (**Urrego, et al.**, 2009b) en el que se tomaron muestras de fondo de lagunas y sedimentos superficiales en manglares, y el segundo, de sedimentos superficiales de manglares de San Andrés. Se encontró una fuerte asociación de los porcentajes de polen de manglar con la composición y entornos geomorfológicos del manglar (**Urrego, et al.**, 2009b). Los porcentajes más altos de *Rhizophora* (> 60%) se registraron en la zona litoral de Cispatá, donde se encuentran los manglares más viejos con árboles más grandes, y en San Andrés (Figura 4), donde se asociaron con altos niveles de inundación, distancias más cortas a la línea de costa (**Urrego, et al.**, 2010) y crecimiento de los manglares *in situ* (**Woodroffe, et al.**, 1985, **Elenga, et al.**, 2000). Porcentajes entre 35 y 50% de polen de *Rhizophora* se registraron en manglares intervenidos o en estuarios, y valores < 25% caracterizaron manglares localizados en la transición hacia tierra firme (**Van Campo y Bengo**, 2004, **Engelhart, et al.**, 2007, **Urrego, et al.**, 2009a).

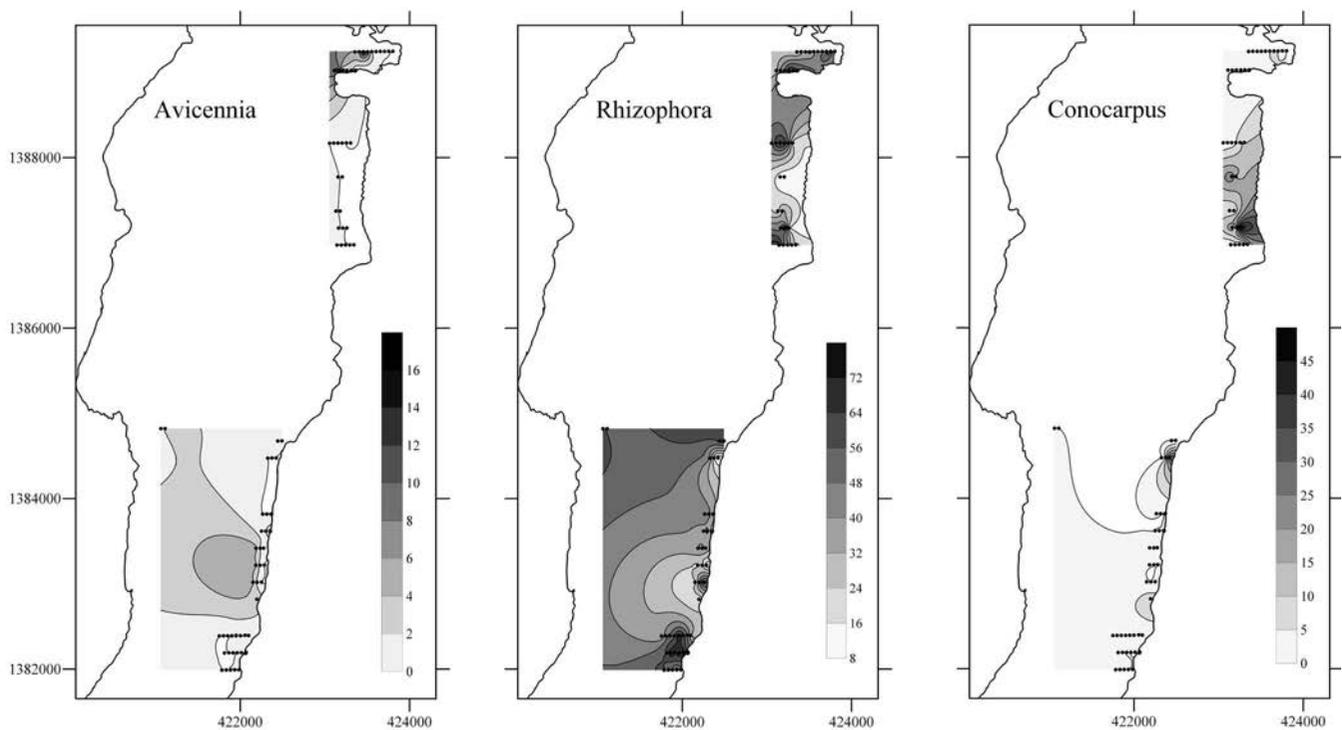


Figura 4. Distribución espacial del polen de tres especies de manglares, contenido en sedimentos superficiales de los manglares de San Andrés. Los mayores porcentajes se presentan en sitios donde la especie está creciendo *in situ*.

En contraste, el polen de *Avicennia*, aunque generalmente está poco representado en los registros, típicamente refleja ambientes más salinos (Urrego, et al., 2009b, 2010) y alejados de la línea de costa. Altas proporciones de polen de *Laguncularia* y del helecho *A. aureum* indican manglares intervenidos con doseles abiertos o en recuperación después de una perturbación, con salinidad moderada (Tomlinson, 1999, Medina, et al., 1990). El polen de *Conocarpus erectus* (L.) indica entornos supra-mareales y próximos a tierra firme con influencia estacional de las mareas, menor inundación y valores altos de pH del suelo (Tomlinson, 1999, Urrego, et al., 2010).

La presencia de polen de especies herbáceas, helechos y vegetación de marismas, indica procesos de colonización en playas, formación de deltas y lagunas, y diferente nivel salinidad (González y Dupont, 2009) o inundación y, según la secuencia en la que se presentan, cambios acelerados en los niveles del mar (e.g. Amaranthaceae, Cyperaceae, Poaceae y Asteraceae). Son igualmente diagnósticas de sucesión temprana después de una perturbación o de eventos transgresivos marinos o aporte de material alóctono (González y Dupont, 2009, Urrego, et al., 2009b, González, et al., 2010). Por ejemplo, en la Isla Gorgona dos especies herbáceas caracterizaron la dinámica fluvio-marina de una playa. En un sector con mayor pendiente y elevación, y con tendencia a la acreción de arenas, dominó *Rhynchospora polystachys* (Turrill) H. Pfeiff. (Cyperaceae). En cambio, en sectores con forma convexa, menor elevación y tendencia a la erosión, domina *Sphagneticola trilobata* (L.) Pruski (Asteraceae) (Bernal, et al., 2016).

Respuesta de las especies dominantes de los humedales forestales a eventos climáticos extremos. Según el IPCC (2013), el actual cambio global representa una de las mayores amenazas para los ecosistemas naturales, si se consideran no solo los cambios en la variabilidad estacional de la precipitación y los niveles de inundación, sino también aquellos asociados a eventos extremos asociados al ENSO, representados por mayor la intensidad de las sequías, y vientos en algunas épocas y de mayor precipitación y nivel del mar, en otros. Estos cambios pueden afectar no solo los ciclos reproductivos de las especies y la productividad de los ecosistemas, sino también la dinámica de la materia orgánica en los suelos y los patrones de la regeneración natural, como se muestra a continuación y en el numeral 5.

El análisis de la fenología reproductiva de *M. flexuosa* entre diciembre de 2010 y noviembre de 2012 en el plano de inundación del río Calderón, en el trapecio amazónico (considerado un bosque de *igapó*), mostró sincronía anual en la floración y en la fructificación, y a través de un análisis de redundancia, una clara estacionalidad y estrecha relación con variables climáticas (Urrego, et al., 2016). El mayor índice de actividad de la floración se presentó con valores máximos de temperatura, mínimos de precipitación mensual y de niveles de inundación registrados de agosto a noviembre de 2011 y de 2012, siendo significativamente más

acentuados en 2011 (Figura 5). Por el contrario, la formación de frutos fue significativamente mayor en 2012 y se asoció con los mayores valores de precipitación mensual y niveles de inundación. Aunque de julio de 2010 a mayo de 2011 una de las más fuertes anomalías de La Niña afectó el neotrópico (IDEAM, 2011), la cual usualmente causa incrementos en la precipitación y disminución en la temperatura (Poveda y Mesa, 1997), en la Amazonia colombiana se presentó el déficit más extremo de precipitación desde 1998, asociado al gradiente norte-sur del Atlántico tropical en la temperatura superficial del mar (Marengo, et al., 2011, 2013, Espinoza, et al., 2011, Xu, et al., 2011). En cambio, de julio a diciembre de 2011 la precipitación regional presentó un incremento significativo comparado con el mismo periodo de 2010. El déficit de precipitación, al igual que en otras especies amazónicas (Haugaasen y Peres, 2005, Sakai, et al., 2006), causó la iniciación temprana de la floración y los valores más altos del índice de actividad de esta fenofase, y una baja y temprana producción de frutos posterior a esta floración. Mientras que en el 2012 la producción de

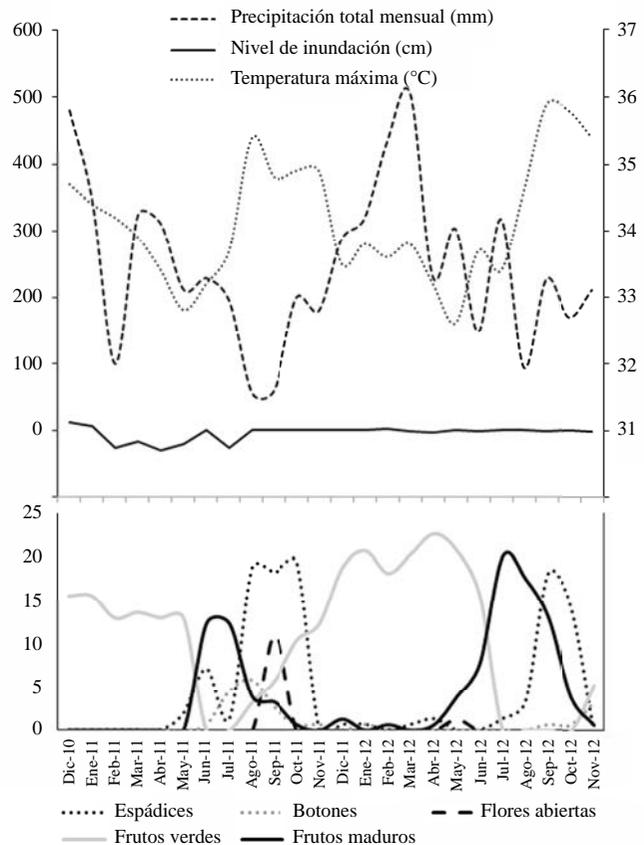


Figura 5. Variación en el índice de actividad de la floración y la fructificación de *M. flexuosa* en cananguchales del trapecio amazónico, entre diciembre de 2010 y noviembre de 2012, y su relación con la precipitación mensual y las temperaturas máximas. La mayor floración se presentó en asocio con la mayor sequía y la temperatura máxima, y la mayor fructificación con los valores más altos de precipitación.

frutos fue significativamente más alta, asociadas a mayores valores de precipitación mensual y niveles de inundación (Figura 5). Sin embargo, la producción de frutos no solo mostró diferencias temporales importantes sino también regionales, cuando se compararon con datos preliminares de canaguales de *várzea* del medio Caquetá (Urrego, 1987), cuya producción fue mayor.

De estos resultados se infiere que el incremento en las temperaturas (0,6-2°C) y la disminución de la precipitación (20-30%) proyectados para el 2100 (IPCC, 2013) para la Amazonia Central, podrían afectar la respuesta fenológica de *M. flexuosa*, que es una especie hiper-dominante (Ter Steege, et al., 2013) y clave para la supervivencia de muchas especies animales en la Amazonia. Un déficit de precipitación podría causar disminución en la producción de frutos y afectar el establecimiento y supervivencia de las plántulas, y además promover la colonización de especies de tierra firme.

En los manglares en las Islas del Rosario, el análisis del NDVI y las series de tiempo de las variables climáticas (Galeano, et al., 2017), mostró que mientras los valores de NDVI y la extensión de las playas disminuyeron con el aumento en la frecuencia e intensidad de los vientos, los manglares se beneficiaron con el incremento en la frecuencia de eventos de sequía de corta duración, aunque el NDVI disminuyó cuando las sequías se hicieron más prolongadas. Los eventos extremos de sequía presentaron tendencia al aumento en duración desde 2009 y el análisis de series de tiempo mostró que, aunque su frecuencia en el Caribe es cíclica, la duración se incrementó en años donde la frecuencia de la sequía fue baja.

Los eventos extremos de sequía, se asociaron con las anomalías del ENSO y la oscilación decadal del Pacífico (PDO, por sus siglas en inglés), que tuvieron efectos más drásticos sobre la vegetación de playa y el bosque seco como lo mostraron los mínimos valores del NDVI registrados para el 2010 (Figura 6). Por el contrario, los manglares mostraron mayor resiliencia a tales sequías y fuertes vientos debido a su localización a lo largo de las bahías protegidas y alrededor de las lagunas internas dados los valores comparativamente más altos del índice (Figura 6). Esta respuesta de los manglares se relaciona con la disminución del nivel freático en los suelos, y el subsecuente aumento de la oxigenación, la disponibilidad de nutrientes y el uso más eficiente del agua para la fotosíntesis (Lovelock, et al., 2009), como se registra en otros bosques inundables (Wittmann, et al., 2004; Galeano, et al., 2015).

A pesar de la capacidad de los manglares de disipar la energía del oleaje y la velocidad del viento (Alongi, 2008, Zhang, et al., 2012, Aung, et al., 2013, Vanegas, et al. en prensa), eventos como huracanes y tormentas tropicales pueden afectar fuertemente su composición florística y su estructura, según la respuesta diferencial de las especies a estos eventos y las condiciones al momento del evento, tal como se registró en Bahía Portete (Guajira). Aunque

R. mangle presenta mayor mortalidad de árboles adultos (Imbert, et al., 1996), es más resiliente al presentar pocos años después del evento, alto reclutamiento de plántulas (Baldwin, et al., 1992). Mientras *A. germinans* y *L. racemosa* son más resistentes debido a su capacidad de rebrote, explicando así cambios en la composición florística de los manglares de borde, especialmente de borde, después del paso de los huracanes Cesar (1996) y Lenny (1999) que, aunque no impactaron directamente la costa, causaron incrementos en la precipitación y las mareas de tormenta y disminución en las extensiones de los manglares (Bernal, et al., 2016) como en otros sitios del Caribe (Tanner, et al., 1991). De la misma manera, en la Isla de San Andrés se encontraron evidencias en los sedimentos y el polen de un fuerte huracán que en 1605 causó erosión y el reemplazo de los manglares por vegetación abierta (González, et al., 2010) y su recuperación después de medio siglo (Figura 3).

Patrones de regeneración natural asociados a la variación ambiental de menor escala

Las mediciones en la regeneración natural de *M. flexuosa* (Galeano, et al., 2015) mostraron una variación espacio-temporal característica. Además de la variabilidad geomorfológica a pequeña escala y mostraron diferencias en la textura del suelo, el espesor de la capa orgánica, el drenaje y el nivel de inundación, así como en el área basal de las palmas adultas cercanas, y la distancia al bosque de tierra firme. Como en otras poblaciones gregarias, la distribución espacial de las plántulas está estrechamente relacionada con la heterogeneidad espacial de los suelos y la estructura del dosel (Svenning, 1999). Las plántulas de *M. flexuosa* dominaron los sitios con mayor inundación y peor drenaje, mientras que en los sitios mejor drenados crecieron herbáceas como *Calathea striata* Huber y *Adiantum latifolium* Lam. y abundante regeneración de plántulas de *Lepidocaryum tenue* Mart., palma típica del sotobosque del bosque de tierra firme.

En los tres periodos de medición se presentaron diferencias significativas entre la mortalidad, el reclutamiento y la supervivencia de las plántulas y en todos los casos la mortalidad fue mayor que la supervivencia, asociada negativamente con el área basal y la altura de los árboles de otras especies. Mientras que el reclutamiento de *M. flexuosa* se relacionó positivamente con los niveles de inundación y el pH del agua, pero negativamente con las mejores condiciones de drenaje y la altura de *M. flexuosa* en el dosel. La supervivencia de las plántulas fue menor en las zonas mejor drenadas.

Aunque la tasa de sedimentación anual medida no presentó relaciones claras con la dinámica de la regeneración natural, la tendencia entre 1960 y 1990 de las tasas de sedimentación en esta zona analizada por secciones de sedimentos, utilizando ^{210}Pb , fue decreciente en los sitios mal drenados y creciente hacia los sitios con buen drenaje. Sin embargo, desde 1990, estas tendencias se invirtieron mostrando mayor incremento en la sedimentación en las

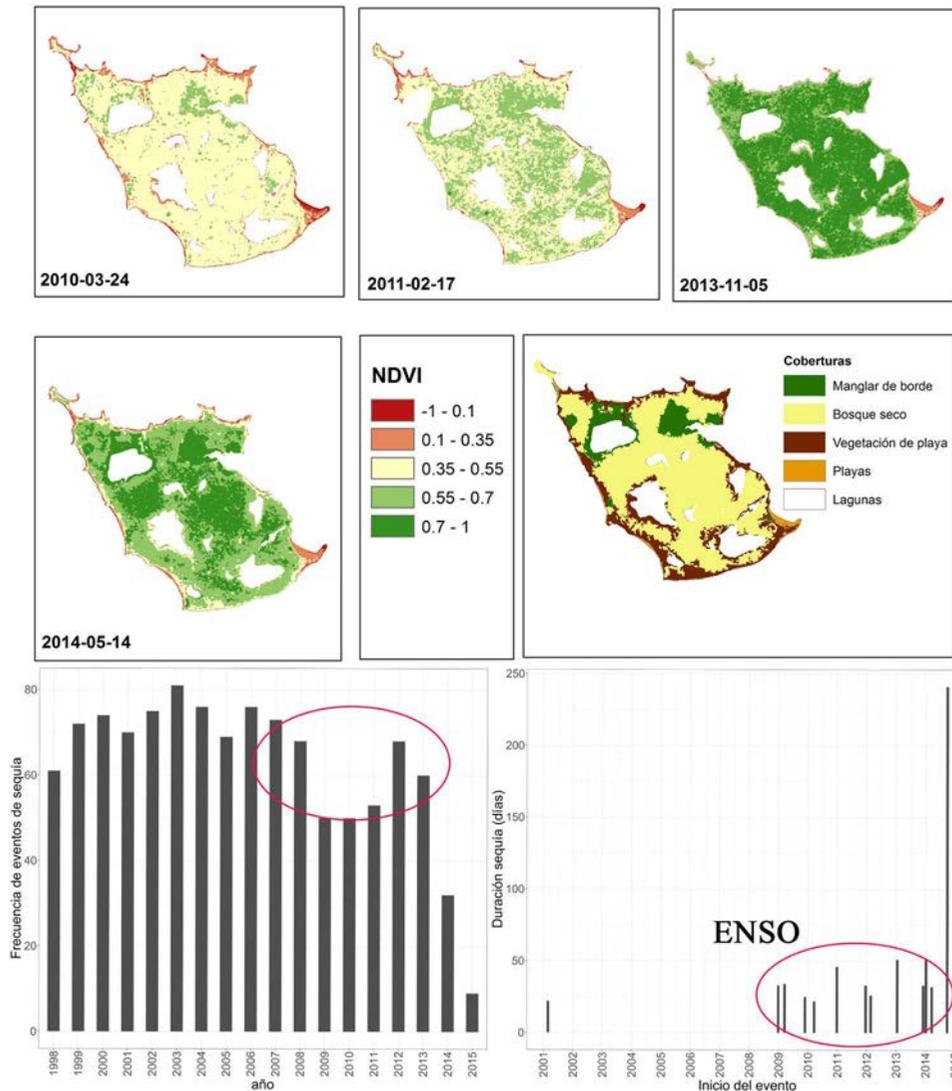


Figura 6. Cambios en el índice de diferencia de vegetación normalizado (NDVI) entre 2010 y 2014. En la fuerte sequía de 2010 asociada al ENSO, los manglares mantuvieron altos valores del índice, mientras en las otras coberturas estos índices disminuyeron significativamente.

zonas mal drenadas, lo que podría afectar los patrones de la regeneración de *M. flexuosa* en el futuro cercano, teniendo en cuenta que no se encontraron plántulas de esta especie en los sitios mejor drenados.

Estos cambios en la sedimentación, están estrechamente relacionados con los cambios en los patrones estacionales de la precipitación y los aportes de los sedimentos aluviales, especialmente en lo que se refiere a su incremento en las épocas de mayores niveles de inundación y desborde de los cauces de los ríos sobre los bosques. De hecho, las mayores tasas de mortalidad de *M. flexuosa* se presentaron hacia el final del 2010 cuando predominaron las condiciones de El Niño y no se presentó inundación en sitios con drenaje moderado, mientras que el mayor reclutamiento se presentó a comienzos del 2012 cuando prevalecieron las condiciones de La Niña y se inundaron, inclusive, los sitios bien drenados, posterior a un periodo de abundante fructificación de la palma. Según

el IPCC (2013) el Cambio Climático actual en la Amazonia está causando incrementos en la precipitación (y en las tasas de sedimentación, especialmente en zonas mal drenadas) y en la intensidad del ENSO, lo cual podría causar cambios en la geomorfología, la composición florística y la estructura de los bosques inundados (Whitmann, et al., 2010, Teixeira, et al., 2011).

A pesar de que en los tres tipos de manglar del Golfo de Urabá (Hoyos, et al., 2013) se registraron diferencias en la composición florística, asociadas a las variables ambientales (Urrego, et al., 2014), *A. germinans* fue la especie dominante en la regeneración natural (Figura 7) de todos los manglares. Mientras en los manglares de borde *R. mangle* fue la segunda especie en importancia, en los de cuenca y ribereños o mixtos, el segundo lugar lo ocupó *L. racemosa*, en proporciones similares a las de *R. mangle*. Según las mediciones de realizadas semestralmente

entre agosto de 2009 y julio de 2010, *R. mangle* presentó la mayor supervivencia, *L. racemosa* la mayor mortalidad y *A. germinans* el mayor reclutamiento. Las altas tasas de sedimentación determinaron el reclutamiento de *A. germinans*, mientras la cantidad de luz que alcanza el sotobosque fue clave para la supervivencia de *R. mangle*. Como en otros manglares, en la época lluviosa se presenta un descenso en la supervivencia de las plántulas y en la época seca se favorece el balance entre el reclutamiento y la mortalidad. Estos manglares reciben una alta carga de sedimentos producto del impacto de la desviación del lecho principal del río Turbo en 1954, lo que afectó la dinámica fluvio-marina, al generar grandes aportes de sedimentos sobre los bosques, así como cambios en la textura, el drenaje y la materia orgánica en los suelos. De hecho, la mortalidad se relacionó inversamente con la distancia al río Turbo. Incremento en la carga de sedimentos depositados llevo al aumento de la mortalidad de plántulas en los manglares de las islas del Rosario (Galeano, et al., 2017).

La alta dominancia de *A. germinans* en la regeneración es reflejo, en primer lugar, de su dominancia en el dosel, la cual es generada por las altas tasas de aprovechamiento de los árboles de *R. mangle* (Blanco, et al., 2012), lo que - a su vez - incrementa la cantidad de luz disponible para la regeneración. En segundo lugar, las altas tasas de acumulación de sedimentos, han llevado a elevar el nivel del sustrato, a disminuir los niveles de inundación y a incrementar la salinidad en el suelo por la alta evaporación, por ser *A. germinans* la más tolerante a tales condiciones (Hogarth, 2007).

En la segunda medición, se registró un cambio importante en la mortalidad y supervivencia de las plántulas de las tres especies asociado al mar de leva registrado en enero de 2009 (Lacambra, et al., 2003), el que incrementó los niveles de inundación, la velocidad del viento, la altura y la energía del oleaje en la costa Caribe, lo cual se consideró un factor importante en la mortalidad de las plántulas (Reyes de la Cruz, et al., 2002). No obstante, la mayor supervivencia tanto a la alta sedimentación, como a los altos niveles de inundación registrados durante el mar de leva, la presentaron las plántulas de *R. mangle*. El mayor tamaño de los propágulos de esta especie le permite adaptarse mejor a suelos inestables y altos niveles de inundación, y representa una ventaja competitiva respecto a las otras dos especies de manglar (McKee, 1995, Reyes de la Cruz, et al., 2002).

La dinámica de la regeneración en ambos ecosistemas se vio influenciada por los eventos climáticos extremos asociados al ENSO en ambas anomalías, lo cual plantea un desafío para la supervivencia de las especies ante la intensificación del fenómeno, proyectada por el IPCC (2013), la cual se puede acentuar con la intensificación de las actividades antrópicas.

Impacto Antrópico

En los últimos siglos, los cambios en los humedales forestales y particularmente en los manglares, no se pueden desligar de los impactos de la actividad antrópica, si se tiene en cuenta que ambos ecosistemas han sido subestimados, a pesar de los servicios ecosistémicos que ofrecen. En el caso de los manglares, éstos fueron reemplazados por el auge de

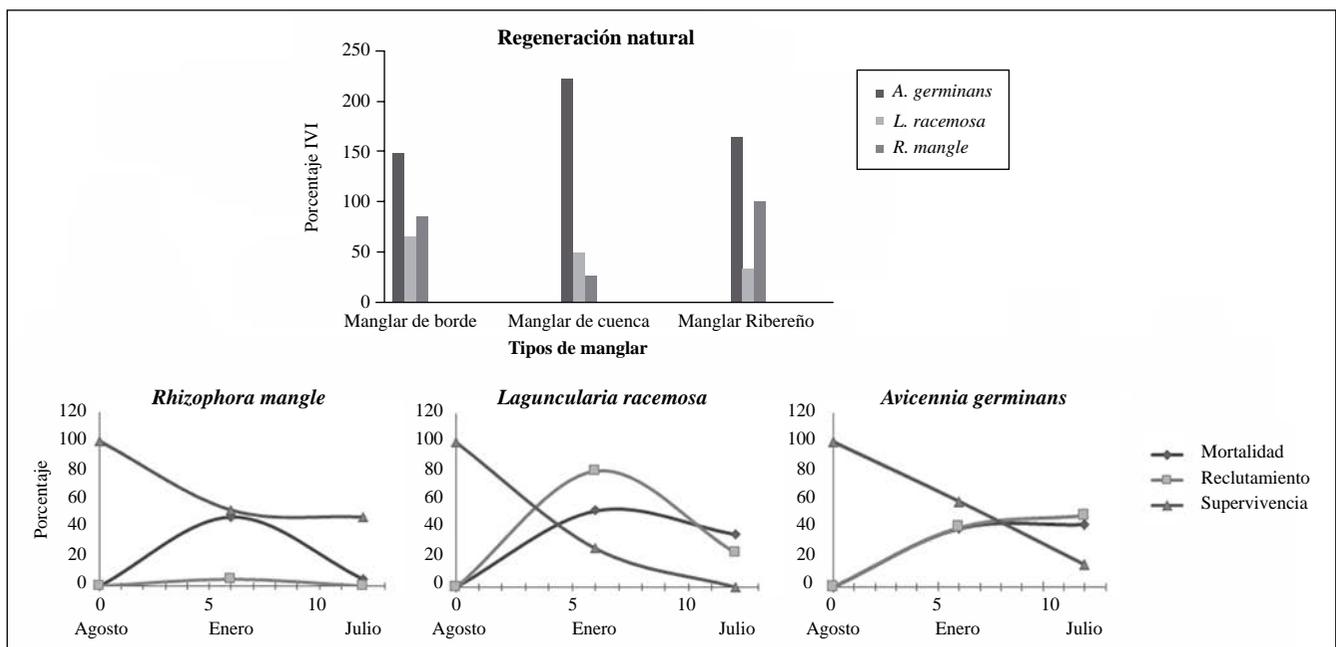


Figura 7. Índice de valor de importancia de las tres principales especies de manglares (superior) después de tres periodos semestrales de evaluación en los que predominó *A. germinans* en los tres tipos de manglares. Dinámica de la regeneración natural de estas especies en el manglar de borde (inferior). *R. mangle* presentó la mayor supervivencia, *L. racemosa* la mayor mortalidad y *A. germinans* el mayor reclutamiento.

las plantaciones de palma de coco alrededor de 1850, en San Andrés (**González, et al.**, 2010), en Isla del Rosario (datos no publicados) y en Cispatá alrededor de 1850 AD; algunos fueron reemplazados por cultivos de arroz (**Castaño, et al.**, 2010). En algunos sitios los manglares han sido aprovechados para la extracción de madera para construcción de viviendas y barcos, especialmente *R. mangle* por la alta durabilidad y resistencia de la madera, y reemplazados por pastizales para ganadería (**Urrego, et al.**, 2018) y zonas urbanizadas (**Suárez, et al.**, 2015). Igualmente, la construcción de carreteras, represas y estolones alteran la dinámica fluvio-marina, como, o la desviación de ríos y caños que dejan los bosques sin el insumo de agua dulce (e.g río Turbo, río Sinú, río Patía), con las consecuentes y graves repercusiones ecológicas. La cercanía a centros poblados en el Golfo de Urabá, el desarrollo estructural de los árboles de manglar refleja la influencia antrópica al disminuir la abundancia de plántulas y plantones de *R. mangle* con la cercanía a los centros poblados, y aumentar las de *A. germinans*, especie más tolerante a la salinidad y la sedimentación.

Conclusiones

A pesar de la marcada la influencia marina sobre los manglares, éstos guardan similitudes con los cananguchales. Su dominancia sobre los bosques vecinos obedece al deterioro del drenaje, al aumento de la inundación y al espesor del horizonte orgánico en los suelos. En ambos se incrementó la diversidad con la disminución progresiva de las condiciones de estrés a lo largo del gradiente ambiental, lo que facilita la colonización de especies de los bosques vecinos. Los cambios climáticos post-glaciales que determinaron la colonización de las especies dominantes (*M. flexuosa* y *R. mangle*), y los niveles de precipitación, inundación y temperatura del máximo térmico Holocénico posibilitaron el establecimiento y expansión de cananguchales y, con la estabilización de los niveles del mar, la de los manglares alrededor de 4000 AP. Los cambios climáticos registrados desde entonces causaron contracción o expansión de estos bosques. El actual cambio climático, especialmente las sequías asociadas al ENSO, han influido en la productividad y los patrones reproductivos de ambas especies dominantes, las cuales respondieron positivamente a eventos de sequía de corta duración. Igualmente, los incrementos en la sedimentación y la inundación, así y como los eventos del mar de leva en los manglares, han incidido en las tasas de mortalidad, reclutamiento y supervivencia de la regeneración natural en ambos ecosistemas. Las mayores pérdidas de manglares en las últimas décadas se asocian al Cambio Climático, especialmente a la erosión costera generada por el incremento en el nivel del mar y las actividades antrópicas. Las ganancias se asocian con la mayor inundación y deposición de sedimentos aluviales.

Agradecimientos

A los estudiantes de *Ingeniería Forestal* y de la Maestría en *Bosques y Conservación Ambiental* de la Universidad

Nacional de Colombia, Sede Medellín, quienes han compartido conmigo la pasión por los bosques inundables y la realización de estas investigaciones. Especialmente a Catalina González, Andrea Galeano, Juan David Mira y Marco Antonio Prado, por la lectura crítica y constructiva de este manuscrito. A mis maestros Thomas van der Hammen, Jorge I. Del Valle y Álvaro Lema, por ser siempre una fuente de inspiración. Y sobre todo a las comunidades que habitan en los manglares y los cananguchales por su generosidad al compartirlos conmigo, y facilitar el trabajo de campo. A la Universidad Nacional de Colombia, Colciencias y la Fundación TROPENBOS por el apoyo financiero.

Conflicto de interés

Declaro que no existe conflicto de interés que pueda influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación del artículo. No se presentan conflictos con la Universidad Nacional de Colombia como empleador y co-financiador de las investigaciones, toda vez que se han acogido las normas relacionadas con la propiedad intelectual y patrimonial de la información.

Referencias

- Agudelo, C.M., Bolívar, J., Polanía, J., Urrego, L.E., Yepes, A., Sierra, A.** (2015). Estructura y composición florística de los manglares de la bahía de Cispatá, Caribe colombiano. *Rev Biol Trop.* **63**: 1137-1147.
- Alongi D.M.** (2008). Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuar Coast Shelf Sci.* **76**: 1-13.
- Aung, T.T., Mochida, Y., Than, M.M.** (2013). Prediction of recovery pathways of cyclone-disturbed mangroves in the megadelta of Myanmar. *For Ecol Manage.* **293**: 103-113.
- Baldwin, A.H., Platt, W.J., Gathen, K.L., Lessmann, J.M., Rauch, T.J.** (1992). Hurricane Damage and Regeneration in Fringe Mangrove Forests of Southeast Florida. *J Coast Res.* **21**: 169-183.
- Bernal, G., Urrego, L.E., Gómez, A., Betancur, S., Osorio, A.** (2014). Evolución geomorfológica y vegetación costera de playa Palmeras, Parque Nacional Natural Isla Gorgona, Pacífico Colombiano. *Lat Am J Aquat Res.* **42**: 622-638.
- Bernal, G., Osorio, A.F., Urrego, L., Peláez, D., Molina, E., Zea, S., Montoya, R.D., Villegas, N.** (2016). Occurrence of extreme oceanic events and their impact on the ecosystems. *J Mar Syst.* **164**: 85-100.
- Berrío, J.C., Behling, H. and Hooghiemstra, H.** (2000). Tropical rain-forest history from the Colombian Pacific area: a 4200-year pollen record from Laguna Jotaordó. *Holocene.* **10**: 749-756.
- Blanco, J.F., Estrada, E.A., Ortiz, L., Urrego, L.E.** (2012). Ecosystem-wide impacts of deforestation in mangroves: the Urabá Gulf (Colombian Caribbean) case study. *Int. Scholar. Res. Netw. ISRN Ecol.*, <http://dx.doi.org/10.5402/2012/958709>
- Carrillo-Bastos, A., Islebe, G.A., Torrescano-Valle, N., González, N.E.** (2010). Holocene vegetation and climate history of central Quintana Roo, Yucatán Peninsula, Mexico. *Rev Palaeobot Palynol.* **160**: 189-196.

- Castaño, A.R., Urrego, L.E., Bernal G.R.** (2010). Dinámica del manglar en el complejo lagunar de Cispatá (Caribe colombiano) en los últimos 900 años. *Rev Biol Trop.* **58**: 1347-1366.
- Cohen, M.C.L., Lara, R.L., Cuevas, E., Oliveras, E.M, Da Silveira-Sternberg, L.** (2016). Effects of sea-level rise and climatic changes on mangroves from southwestern littoral of Puerto Rico during the middle and late Holocene. *Catena Suppl.* **143**: 187-200.
- Donato, D.C., Kauffman, J.B., Mackenzie, R.A., Ainsworth, A., Pfeeger, A.Z.** (2012). Whole-island carbon stocks in the tropical Pacific: Implications for mangrove conservation and upland restoration. *J Environ Manage.* **97**: 89-96.
- Engelhart, S.E., Horton, B.P., Roberts, D.H., Bryant, C.L., Corbett, D.R.** (2007). Mangrove pollen of Indonesia and its suitability as sea level indicator. *Mar Geol.* **242**: 65-81.
- Elena, H., Namur, C., de Vincens, A., Roux, M., Schwartz, D.** (2000). Use of plots to define pollen vegetation relationships in densely forested ecosystems of tropical Africa. *Rev Palaeobot Palynol.* **112**: 79-96.
- Ellison, A.** (2002). Macroecology of mangroves: large-scale patterns and processes in tropical coastal forests. *Trees.* **16**: 181-194.
- Ellison, J.C., Stoddart, D.R.** (1991). Mangrove ecosystem collapse during predicted sea level rise: Holocene analogues and implications. *J Coast Res.* **7**: 151-165.
- Espinoza, J.C, Ronchail, J., Guyot, J.L., Junquas, C., Vauchel, P., Lavado, W., Pombosa R.** (2011). Climate variability and extreme drought in the upper solimoes river (Western Amazon Basin): understanding the exceptional 2010 drought. *Geophys Res Lett.* **38**: 1-6.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).** (1977). Guía para la descripción de perfiles de suelo. Roma-Italia. 70 pp.
- Galeano, A., Urrego, L.E, Sánchez, M., Peñuela, M.C.** (2015). Environmental drivers for regeneration of *Mauritia flexuosa* L.f. in Colombian Amazonian swamp forest. *Aquat Bot.* **123**: 47-53.
- Galeano, A., Urrego, L.E., Botero, V., Bernal, G.** (2017) Mangrove resilience to climate extreme events in a Colombian Caribbean island. *Wetl Ecol Manag.* **25**: 743-760.
- González, C., Urrego, L.E., and Martínez, J.I.** (2006). Late Quaternary Vegetation and climates change in the Panama Basin: Palynological evidence from marine cores ODP 677B and TRI 163-38. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* **234**: 62-80.
- González, C., Urrego, L.E., Martínez, J.I, Polanía, J., Yokoyama, Y.** (2010). Mangrove dynamics in the south-western Caribbean since the 'Little Ice Age': a history of human and natural disturbances. *Holocene.* **20**: 849-861.
- González, C., Dupont, L.** (2009). Tropical salt marsh succession as sea-level indicator during Heinrich events. *Quat Sci Rev.* **28**: 939-946.
- Haug, G.H., Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C., Röhl, U.** (2001). Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science.* **293**: 1304-1308.
- Haugaasen, T., Peres, C.A.** (2005). Tree phenology in adjacent Amazonian flooded and unflooded forests. *Biotropica.* **37**: 620-630.
- Hodell, D., Curtis, J., Jones, G., Higuera-Gundy, A., Brenner, M., Binford, M.W., Dorsey, K.** (1991). Reconstruction of Caribbean climate change over the past 10,500 years. *Nature.* **352**: 790-792.
- Hogarth, P.J.** (2007). *The Biology of Mangroves.* Oxford University Press, New York. 228pp.
- Hoorn, C.** (1994). Miocene palynostratigraphy and paleoenvironments of northwestern Amazonia: Evidence for marine incursions and the influence of Andean tectonics. Ph.D Thesis. University of Amsterdam. 156 pp.
- Hoyos, R., Urrego, L.E., Lema, A.** (2013). Respuesta de la regeneración natural a la variabilidad ambiental y climática intra-anual, en los manglares del delta del río Turbo y la bahía El Uno (Golfo de Urabá- Colombia). *Rev Biol Trop.* **3**: 1445-1461.
- Imbert, D., Labbe, P., Rousteau, A.** (1996). Hurricane damage and forest structure in Guadeloupe, French West Indies t. *Station. J Trop Ecol.* **12**: 663-680.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).** (2011). Análisis del impacto del Fenómeno "La Niña" 2010-2011 en la hidroclimatología del país. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/An%C3%99>
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).** (2010-2012). Datos sistema de información nacional ambiental. Leticia, Colombia. In:<http://institucional.ideam.gov.co/jsp/clima> 49.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).** (2013). Working Group I Contribution To The IPCC Fifth Assessment Report Climate Change 2013: The Physical Science Basis.
- Krebs, J.** (1998). *Ecological methodology.* Addison Wesley Longman. 629 pp.
- Lacambra, C.L., Lozano, C., Fontalvo, M.** (2003). Amenazas naturales y antrópicas en las zonas costeras colombianas. INVEMAR, Santa Marta (Mag.), Colombia.
- Lema, A.** (2003) Elementos Estadísticos de Dasometría y Medición Forestal. Silvano Ltda, Medellín.
- Lovelock, C.E., Ball, M.C., Martin, K.C., Feller, I.C.** (2009). Nutrient enrichment increases mortality of mangroves. *PLOS ONE.* **4**: 1-4.
- Lugo, A.E., Snedaker, S.C.** (1974). *The Ecology of Mangroves.* Annual. Review of Ecology and Systematics. **5**: 39-64.
- Marengo, J.A., Tomasella, J., Alves, L., Soares, W., Rodriguez, D.A.** (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon Region. *Geophys Res Lett.* **38**: 1-5.
- Marengo, J.A., Borma, L.S., Rodríguez, D.A., Pinho, P., Wagner, R., Soares, W.R., Alves, L.M.** (2013). Recent extremes of drought and flooding in Amazonia: vulnerabilities and human adaptation. *Am J Clim Change.* **2**: 87-96.
- Mayewski P.A., Rohling, E.E., Stager, C., Karlénw, C., Maasch, K.A., Meeker, L.D., Meyerson, E.A., Gasse, F., Van Kreveld, S., Holmgren, K., Leethrop, J., Rosqvist, G., Rack F., Staubwasser, M., Schneider, R.R., Steig E.J.** (2004). Holocene climate variability. *Quat Res.* **62**: 243-255.
- McKee, K.L.** (1995). Seedling Recruitment Patterns in a Belizean Mangrove Forest: Effects of Establishment Ability and Physico-Chemical Factors. *Oecologia.* **101**: 448-460.
- McKee, K.L., Cahoon, D.R., Feller, I.C.** (2007). Caribbean mangroves adjust to rising sea-level through biotic controls on change in soil elevation. *Glob Ecol Biogeogr.* **16**: 545-556.

- Medina, E., Cuevas, E., Popp, M., Lugo, A.E.** (1990). Soil salinity, sun exposure, and growth of *Acrostichum aureum*, the mangrove fern. *Bot Gaz.* **151**: 41-49.
- Mira, J.D., Betancur, S., Urrego, L.E.** (2017). Relación entre la infección por agallas, las variables estructurales y la anatomía de la madera de *Rhizophora mangle* L. en el Golfo de Urabá (Colombia). *Actu Biol.* **39**: 41-56
- Molina, E.** (2009). Efecto del cambio climático en ecosistemas de manglar de la Guajira, Caribe Colombiano. Tesis. Maestría en Bosques y Conservación Ambiental - Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
- Parkinson, R.W., DeLaune, R.D., White, J.R.** (1994). Holocene sea-level rise and the fate of mangrove forests within the wider Caribbean region. *J Coast Res.* **10**: 1077-1086.
- Pires, J. T., Prance, G.T.** (1985). The vegetation types of the Brazilian Amazon. Pp: 109-145. En: G. T. Prance y T. E. Lovejoy (Eds.) *Amazonia. Key Environment Series*, Pergamon Press, Oxford, England.
- Poveda, G., Mesa, O.J.** (1997) Metodologías de predicción de la hidrología colombiana considerando el evento de El Niño Oscilación del Sur (ENOS). *Atmósfera.* **17**: 26-39.
- Prance, G.T.** (1979). Notes on the vegetation of Amazonia III. The terminology of amazonian forest types subject to inundation. *Brittonia.* **31**: 26-38.
- Raasveldt, H.C., Tomic, A.** (1958). Lagunas colombianas. Contribución a la Geomorfología de la costa del mar Caribe con algunas observaciones sobre las Bocas de Ceniza. *Rev Acad Colomb Cienc Exactas Fis Nat.* **10**: 175-198.
- Rangel, N., Anfuso, G.** (2009). Assessment of coastal vulnerability in La Guajira Peninsula Colombian Caribbean Sea. *J Coast Res.* **56**: 792-796.
- Reyes de la Cruz, A., López-Ocaña, G., Hernández-Trejo, H.** (2002). Evaluación preliminar de los efectos de la Inundación y la herbivoría sobre plántulas de mangle. *Universidad y Ciencia.* **18**: 136-139.
- Rull, V., Vegas-Vilarrubia, T., Espinosa de Pernia, N.** (1999). Palynological record of an Early-Mid Holocene mangrove in Eastern Venezuela. Implications for Sea-level rise and disturbance history. *J Coast Res.* **15**: 496-504.
- Sakai, S., Harrison, R.D., Momose, K., Kuraji, K., Nagamasu, H., Yasunari, T., Chong, L., Nakashizuka, T.** (2006). Irregular droughts trigger mass flowering in aseasonal tropical forests in Asia. *Am J Bot.* **93**: 1134-1139.
- Suárez, J., Urrego, L.E., Osorio, O., Ruiz, H.Y.** (2015). Oceanic and climatic drivers of mangrove changes in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean. *Lat Am J Aquat Res.* **43**: 972-985.
- Svenning, J.C.** (1999). Microhabitat specialization in a species-rich palm community in Amazonian Ecuador. *J Ecol.* **87**: 55-65.
- Tanner, E.V.J., Kapos, V., Healey, J.R.** (1991). Hurricane effects on forest ecosystems in the Caribbean. *Biotropica.* **23**: 513-521.
- Teixeira, A.P., Assis, M.A., Luize, B.G.** (2011). Vegetation and environmental heterogeneity relationships in a Neotropical swamp forest in southeastern Brazil (Itirapina, SP). *Aquat. Bot.* **94**: 17-23.
- Ter Braak C.J., Smlauer P.** (2002) CANOCO reference manual and CanoDraw for windows user' guide: software for canonical community ordination (ver 4.5). Microcomputer Power, Ithaca.
- Ter Steege, H., Nigel C. A. Pitman, N.C.A., Sabatier, D., Baraloto, C., Salomão, R.P, Guevara, J.E., Phillips, O.L., Castilho, C.V., Magnusson, W.E., Molino, J.F, Monteagudo, A., Núñez-Vargas, P., Montero, J.C., Feldpausch, T.R., Honorio-Coronado, E.N., Killeen, T.J., Mostacedo, B., Vasquez, R., Assis, R.L., Terborgh, J., Wittmann, F., Andrade, A., Laurance, W.F., Laurance, S.G. W., Marimon, B.S., Marimon Jr., B., Guimaraes-Vieira, I.C., Amaral, I.L., Brienen, R., Castellanos, H., Cárdenas, D., Duivenvoorden, J.F, Mogollón, H.F., de Almeida-Matos, F.D., Dávila, N., García-Villacorta, R., Stevenson-Diaz, P.R., Costa, F., Emilio, T., Levis, C., Schiatti, J., Souza, P., Alonso, A., Dallmeier, F., Duque-Montoya, A.J., Fernandez-Piedade, M.T., Araujo-Murakami, A., Arroyo, L., Gribel, R., Fine, P.V.A., Peres, C.A., Toledo, M., Aymard, G.A., Baker, T.R., Cerón, C., Engel, J., Henkel, T.W., Maas, P., Petronelli, P., Stropp, J., Zartman, C.E., Daly, D., Neill, D., Silveira, M., Ríos-Paredes, M., Chave, J., de Andrade Lima Filho, D., Jørgensen, P.M., Fuentes, A., Schöngart, J., Cornejo-Valverde, F., Di Fiore, A., Jimenez, E.M., Peñuela-Mora, M.C., Phillips, J.F., Rivas, G., van Andel, T.R., von Hildebrand, P., Hoffman, B., Zent, E.L., Malhi, Y., Prieto, A., Rudas, A., Ruschell, A.R., Silva, N., Vos, V., Zent, S., Oliveira, A.A., Cano-Schutz, A., Gonzales, T., Nascimento, M.T., Ramirez-Angulo, H., Sierra, R., Tirado, M., Umaña-Medina, M.N., van der Heijden, G., Vela, C.I.A., Vilanova-Torre, E., Vriesendorp, C., Wang, O., Young, K.R., Baidar, C., Balslev, H., Ferreira, C., Mesones, I., Torres-Lezama, A., Urrego-Giraldo, L.E., Zagt, R., Alexiades, M.N., Hernandez, L., Huamantupa-Chuquimaco, I., Milliken, W., Palacios-Cuenca, W., Páulett, D., Valderrama-Sandoval, E., Valenzuela-Gamarra, L., Dexter, K.G., Feeley, K., Lopez-Gonzalez, G.** (2013). Hyperdominance in the Amazonian Tree Flora. *Science.* **342**: 325-334.
- Tomlinson, P.B.** (1999). *The Botany of Mangroves.* Cambridge University, Cambridge, United Kingdom.
- Traverse, A.** (1988). *Paleopalynology.* Unwin Hyman, Londres, Inglaterra
- Urrego, L.E.** (1987). Estudio preliminar de la fenología de la Canangucha (*Mauritia flexuosa* L.f.). *Colombia Amazónica* **2**: 57-81.
- Urrego, L.E.** (1997). Los bosques inundables en el Medio Caquetá: Caracterización y sucesión. Tesis de Ph.D. en Biología, Universidad de Amsterdam. Serie estudios en la Amazonia colombiana, Fundación Tropenbos Colombia Volumen XIV. 335 pp. ISBN 958-9365-04-3
- Urrego, L.E., Del Valle, J.I.** (2001). Relación fenología-clima de algunas especies de los humedales forestales (guandales) del pacífico sur colombiano. *Inter ciencia.* **26**: 150-157.
- Urrego, L.E & Del Valle, J I.** (2002). Reconstrucción de la sucesión en un bosque de Guandal, Pacífico Colombiano, durante el Holoceno reciente. *Caldasia.* **24**: 425-443.
- Urrego, L.E., Molina, L.A., Urrego, D.H., Ramírez, L.F.** (2006). Space time succession in the middle Atrato wetlands, Chocó Biogeographic region, Colombia. *Journal of Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* **234**: 45-61.
- Urrego, L.E., Bernal, G., Polanía, J.** (2009a). Pollen distribution on surface sediments of a Colombian Caribbean mangrove. *Rev Palaeobot Palynol.* **156**: 358-371.

- Urrego, L.E., Polanía, J., Buitrago, M.F., Cuartas, L.F., Lema, A.** (2009b). Mangrove zonation patterns in San Andres Island (Colombian Caribbean). *Bull Mar Sci.* **85**: 27-43.
- Urrego, L.E., González, C., Urán, G., Polanía, J.** (2010). Modern pollen rain in mangroves from San Andres Island, Colombian Caribbean. *Rev Palaeobot Palynol.* **162**: 168-182.
- Urrego, L. E., Galeano A., Sánchez, M., Peñuela, C.** (2013). Paleoeología, ecología y Etnobotánica de los canaguales de la Amazonía Colombiana. En: Lasso, C., Rial, A. y González-Boscán, V. (Eds.). VII. Morichales y canaguales de la Orinoquia y Amazonia (Colombia-Venezuela). Serie Editorial Recursos Hidrobiológicos y Pesqueros Continentales de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá D. C. Colombia.
- Urrego, L.E., Correa-Metrio, A. González, C., Castaño, A.R. Yokoyama, Y.** (2013). Contrasting responses of two Caribbean mangroves to sea-level rise in the Guajira Peninsula (Colombian Caribbean). *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* **370**: 92-102.
- Urrego, L.E., Molina, E.C., Suárez, J.A.** (2014). Environmental and anthropogenic influences on the distribution, structure, and floristic composition of mangrove forests of the Gulf of Urabá (Colombian Caribbean). *Aquat. Bot.* **114**: 42-49.
- Urrego, L.E., Galeano, A., Peñuela, M.C., Sánchez, M., Toro, E.** (2016). Climate-related phenology of *Mauritia flexuosa* in the Colombian Amazon. *Plant Ecol.* **17**: 1207-1218.
- Urrego, L.E., Correa-Metrio, A., González, C.** (2018). Colombian Caribbean mangrove dynamics: anthropogenic vs environmental drivers. *Bol.Soc.Geol Mex.* **70**: 133-145.
- Van Campo, E., Bengo, M.D.** (2004). Mangrove palynology in recent marine sediments off Cameroon. *Mar Geol.* **208**: 315-330.
- Van Der Hammen, T., Cleef, A.M.** (1992). Holocene changes of rainfall and river discharge in northern South America and the El Niño phenomenon. *Erdkunde.* **46**: 252-256.
- Van der Hammen, T.** (1988). South America. In: Huntley, B., Webb III, T. (Eds.), *Vegetation history*. Kluwer, Dordrecht, pp. 307-337.
- Van der Hammen, T., Urrego, L.E., Espejo, N., Duivenvoorden, J., Lips, J.M.** (1992). Late-glacial and Holocene sedimentation and fluctuations of river water level in the middle Caquetá River area (Colombian Amazonia). *J Quat Sci.* **7**: 57-67.
- Vanegas, C., Osorio, A., Urrego, L.E.** (en prensa). Wave dissipation across a *Rhizophora mangle* patch on a Colombian Caribbean Island: an experimental approach. Aceptado para publicación en *Ecological Engineering*.
- Vélez, M. L., Wille, M., Hooghiemstra, H., Metcalfe, S., Vanderberghe, J. and Van der Borg, K.** (2001). Late Holocene environmental history of southern Chocó region, Pacific Colombia; sediment, diatom and pollen analysis of core El Caimito. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol.* **173**: 197-214.
- Wittmann, F., Junk, W.J.** (2003). Sapling communities in Amazonian white-water forests. *J Biogeogr.* **30**: 1533-1544.
- Wittmann, F., Schöngart, J., Montero, J.C., Motzer, T., Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Queiroz, H.L., Worbes, M.** (2006). Tree species composition and diversity gradients in white-water forests across the Amazon Basin. *J Biogeogr.* **33**: 1334-1347.
- Wittmann, F., Schöngart, J., Junk, W.J.** (2010). Phytogeography, species diversity, community structure and dynamics of central Amazonian floodplain forests. In: Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Wittmann, F., Schöngart, J., Parolin, P. (Eds.). *Amazonian Floodplain Forest*. 61 pp.
- Woodroffe, C., Thom, B.G., Chappell, J.** (1985). Development of widespread mangrove swamps in mid-Holocene times in northern Australia. *Nature.* **317**: 711-713.
- Woodroffe, C.D., Grindrod, J.** (1991). Mangrove biogeography: the role of Quaternary environmental and sea-level change. *J Biogeogr.* **18**: 479-492.
- Xu, L., Samanta, A., Costa, M., Ganguly, S., Nemani, R., Myneni, R.** (2011) Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophys Res Lett.* **38**: 1-4.
- Zhang, K., Liu, H., Li, Y., Xu, H., Shen, J., Rhome, J., Smith, T.J.** (2012) The role of mangroves in attenuating storm surges. *Estuar Coast Shelf Sci.* **102-103**: 11-23.

Caracterización del conjugado no covalente de grafeno y ácido fólico mediante espectroscopia Raman y métodos computacionales

John J. Castillo^{1,3,*}, Angie E. Orduz¹, Ciro E. Rozo²

¹Grupo de Investigación en Bioquímica y Microbiología, GIBIM, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

²Grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible, Facultad de Química Ambiental, Universidad Santo Tomas, Floridablanca, Colombia

³Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark

Resumen

La preparación de compuestos híbridos de biomoléculas y estructuras de tamaño nanométrico es de especial interés para el desarrollo de aplicaciones en el campo de los biosensores y la entrega de fármacos, entre otros. En este estudio se llevó a cabo la preparación de un conjugado formado por grafeno y ácido fólico cuya caracterización se hizo mediante espectroscopia Raman y el método computacional de la teoría del funcional de la densidad (DFT). El conjugado no covalente se obtuvo mediante un método rápido y sencillo de tipo “one pot”. La espectroscopia Raman permitió evidenciar la funcionalización del grafeno con el ácido fólico mediante el análisis de las relaciones en la intensidad de las señales Raman correspondiente a las bandas G y D. El método DFT mostró que la unión de grafeno y ácido fólico ocurre por la acción de fuerzas de enlace de tipo no covalente, como las interacciones de tipo π - π , y de puentes de hidrógeno. La obtención de este tipo de conjugados permitiría explorar su aplicación en el diseño de biosensores que detecten células cancerígenas con sobreexpresión de receptores de folato, con el fin de facilitar un diagnóstico eficaz y oportuno del cáncer. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras claves: Grafeno; Espectroscopia Raman; Ácido fólico; Métodos computacionales.

Characterization of the non-covalent conjugate graphene-folic acid using Raman spectroscopy and computational methods

Abstract

Hybrid compounds formed by biomolecules and nanometric structures are attracting interest for the development of applications in the fields of biosensors and drug delivery. In this study we prepared a graphene-folic acid conjugate which we characterized by Raman spectroscopy and the density functional theory (DFT) computational method. The non-covalent conjugate was performed through a simple and fast one-pot method. The analysis of ratio intensity of D and G bands in the Raman spectroscopy evidenced graphene functionalization. The DFT method showed that the bond between graphene and folic acid occurs by non-covalent π - π and hydrogen bond interactions. Graphene and folic acid conjugates will allow the design of biosensors for the detection of cancer cells overexpressing folate receptors using analytic devices for a faster, more effective and timely diagnosis of cancer. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Graphene; Raman spectroscopy; Folic acid; Computational methods.

Introducción

En los últimos años ha habido un gran interés por la fabricación de nanocompuestos conjugados con biomoléculas para el diagnóstico y tratamiento de diversos tipos de enfermedades. La atención de la comunidad científica se centra en aquellos nanomateriales con propiedades fisicoquímicas y biológicas que los hacen aptos para las aplicaciones biomédicas. El éxito de la nanoestructuración mediante el uso de nanomateriales, como aquellos a base de carbono, se basa en las propiedades únicas del nanomaterial, como una óptima relación entre área y superficie, la elevada energía

superficial y la relación ente superficie y volumen, la estabilidad térmica, la fácil funcionalización y, lo más importante, la poca toxicidad a la hora de realizar experimentos que involucren su interacción con células y diferentes tipos de microorganismos.

El grafeno es una forma alotrópica de carbono compuesta exclusivamente por átomos de carbono con un patrón

*Correspondencia:

John J. Castillo, jcasleon@uis.edu.co

Recibido: 22 de septiembre de 2017

Aceptado: 06 de marzo de 2018

Editor: Édgar Páez Mozo

regular hexagonal, similar al del grafito, pero en una hoja de un átomo de espesor (Allen, *et al.*, 2010). Entre los métodos de obtención del grafeno se destacan la exfoliación con cinta adhesiva del grafito, la exfoliación con solvente, la deposición por vapor químico, la descarga de arco eléctrico y la limpieza por ultrasonido (Allen, *et al.*, 2010). Es un nanomaterial muy resistente, flexible y elástico y, además, posee excelentes propiedades de conducción térmica y eléctrica. En medicina se ha utilizado principalmente como óxido de grafeno para el diseño de dispositivos de transporte de fármacos hacia células cancerígenas (Hu, *et al.*, 2013).

Uno de los mayores desafíos con las nanoestructuras es la posibilidad de funcionalizarlas con biomoléculas para así ampliar el espectro de aplicaciones. Precisamente gracias a la estructura del grafeno ha sido posible utilizar su forma oxidada y reducida en la conjugación con proteínas, enzimas, ADN, virus, etc. (Balapanuru, *et al.*, 2010). La presencia de diferentes grupos funcionales en su estructura permite crear uniones covalentes con biomoléculas. Sin embargo, en ocasiones la creación de funcionalidades en el grafeno requiere métodos químicos agresivos que provocan daños en su estructura electrónica. Por otro lado, existe también la funcionalización no covalente, la cual se basa en interacciones del tipo van der Waals, las hidrofóbicas y las de tipo π - π . Una de las ventajas de esta modalidad de funcionalización es que la estructura aromática del grafeno se preserva, sin modificar su estructura electrónica (Bose, *et al.*, 2011). Entre las metodologías más utilizadas para la funcionalización no covalente están aquellas que hacen uso de surfactantes y algunas biomoléculas como el ADN, los carbohidratos, las proteínas, etc. (Kamińska, *et al.*, 2011). Algunas moléculas de la familia de los pirenos se han utilizado exitosamente para la funcionalización no covalente de nanotubos de carbono (NTC) en aplicaciones de biosensores, uniendo la parte planar o aromática de la molécula de pireno al NTC mediante interacciones de apilamiento (Choi, *et al.*, 2010).

El ácido fólico es una de las biomoléculas más utilizadas en aplicaciones biomédicas; además, es una molécula de vital importancia en la síntesis del ADN y un suplemento vitamínico que ayuda a las mujeres en embarazo a prevenir defectos congénitos en los recién nacidos (Castillo, *et al.*, 2015). Se ha utilizado como blanco estratégico en la detección, diagnóstico y tratamiento en enfermedades como el cáncer, ya que en los últimos años se ha establecido que reconoce ciertas células cancerígenas que presentan receptores de folatos, interacción que se caracteriza por una constante de disociación (Kd) de 1 nM. La interacción entre el ácido fólico y los receptores de folatos se ha aprovechado para preparar sistemas de entrega selectiva de fármacos en células cancerígenas utilizando grafeno o nanotubos de carbono (Castillo, *et al.*, 2013). Otra estrategia utiliza nanocompuestos funcionalizados con este ácido para preparar sistemas de detección rápida de células cancerígenas o parásitos involucrados en diferentes tipos de enfermedades, como es el caso de la leishmaniasis (Castillo, *et al.*, 2012).

Los conjugados formados por nanocompuestos y biomoléculas pueden caracterizarse para así evidenciar la unión del enlace formado. Ello puede hacerse con técnicas tradicionales, como la resonancia magnética nuclear (RMN), la espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) y la infrarroja (IR), pero debido a que se trata de nanoestructuras, su caracterización exige el uso de técnicas sofisticadas como el análisis termogravimétrico (ATG), la espectroscopia de difusión ordenada (DOSY 2D) por RMN en dos dimensiones (2D), la espectroscopia Raman, la microscopía electrónica de barrido (SEM), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) y la microscopía de fuerza atómica (AFM) (Castillo, *et al.*, 2012). La espectroscopia Raman (ER) es una técnica basada en el fenómeno de dispersión inelástica de luz monocromática en el rango visible, la cual permite el análisis de los modos de vibración y rotación de baja frecuencia de diferentes tipos de moléculas. Algunos estudios han hecho uso de la ER para evidenciar la funcionalización de nanocompuestos con diferentes tipos de biomoléculas. Por ejemplo, Castillo, *et al.* (2013) utilizaron la relación de intensidades de los picos Raman D y G de los NTC para monitorizar su funcionalización con ácido fólico. En otros trabajos esta misma relación se ha utilizado para evaluar la unión de diferentes proteínas a nanoestructuras formadas por átomos de carbono (Casiraghi, *et al.*, 2011). Asimismo, cabe mencionar la importancia que han cobrado en los últimos años los métodos computacionales para simular las interacciones entre nanoestructuras a base de carbono y diferentes tipos de biomoléculas. Por ejemplo, en el primero de estos estudios se simuló un conjugado formado por NTC y ácido fólico utilizando el método DFT y el funcional de correlación B3LYP con la función base [6-31G[d], y se concluyó que la unión ocurría a través de puentes de hidrógeno (Castillo, *et al.*, 2013).

A pesar de que se han publicado varios estudios sobre la caracterización de nanoestructuras de carbono funcionalizados con ácido fólico, no se encontraron publicaciones que reportaran la caracterización del conjugado de grafeno y ácido fólico mediante ER y métodos computacionales. En este trabajo se combinaron las excelentes propiedades fisicoquímicas y biológicas del conjugado de grafeno y ácido fólico formado mediante una interacción de tipo no covalente. En su caracterización se emplearon métodos espectroscópicos y computacionales que evidenciaron la unión del ácido fólico al grafeno. La obtención y posterior caracterización de este conjugado abren nuevas posibilidades para la fabricación de potenciales sistemas de detección y diagnóstico temprano y oportuno de enfermedades como el cáncer.

Materiales y métodos

Preparación del conjugado de grafeno y ácido fólico. En un recipiente de vidrio de 50 ml se colocaron cinco miligramos de grafeno y se adicionaron a una solución ligeramente básica (pH 9) de ácido fólico (5 ml). Para la preparación

de la solución de ácido fólico se pesaron 6,5 mg del ácido y se adicionaron 10 μ l de hidróxido de sodio (NaOH) 1 M para solubilizarlo, y se añadió agua destilada hasta obtener 25 ml de volumen. La mezcla de grafeno y ácido fólico se agitó durante 5 minutos y posteriormente fue sonicada durante 20 minutos. Durante la sonicación la solución se introdujo en un baño termostático (15 °C) para evitar el sobrecalentamiento generado por el sonicador y evitar que se afectara la estructura electrónica del grafeno. Luego de la sonicación, la solución se centrifugó a 2.800 rpm durante 20 minutos, y el sobrenadante se separó del sólido. Por último, la solución se sometió a diálisis tres veces con agua destilada para eliminar el exceso de ácido fólico, el cual no reaccionó. El esquema de la síntesis puede observarse en la Figura 1. Todos los reactivos (grado reactivo) se adquirieron comercialmente en Sigma-Aldrich®.

Caracterización del conjugado de grafeno y ácido fólico mediante espectroscopia Raman. Se depositó una solución de 5 μ l del conjugado de grafeno y ácido fólico sobre una superficie de silicio (SiO_2) y se dejó durante 15 minutos hasta su total evaporación. Posteriormente, se determinó el espectro Raman utilizando un microscopio Raman DXR™ Thermo Scientific™. El microscopio óptico se acopló a un espectrofotómetro con un ancho de banda espectral de 5 cm^{-1} y objetivo de 50x. La muestra se irradió con un láser de 785 nm a una potencia de 5 mW con un tiempo de acumulación de señales de 10 segundos. Los datos se procesaron con el programa Origin®, versión 8.1.

Métodos computacionales. La estructura del grafeno se optimizó empleando el método semiempírico PM6 (Stewart, *et al.*, 2007), y la del ácido fólico con la teoría de los funcionales de la densidad (DFT) (Becke, *et al.*, 1993),

y el funcional de intercambio y correlación B3LYP (Becke, *et al.*, 1996) con la función base 6-31g(d), y se volvió a calcular con el método semiempírico PM6 (Rassolov, *et al.*, 2001). La interacción del grafeno y el ácido fólico se llevó a cabo con el método semiempírico PM6 (Stewart, *et al.*, 2007); todos los cálculos se hicieron con el programa Gaussian 09 (Frisch, *et al.*, 2010).

Resultados y discusión

Caracterización del conjugado de grafeno y ácido fólico.

La espectroscopia Raman (ER) se ha empleado ampliamente para el estudio de los principales modos de vibración del grafeno (Stewart, *et al.*, 2007). La información obtenida de los espectros está básicamente relacionada con estados de agregación, de dispersión y con la funcionalización del grafeno (Dresselhaus, *et al.*, 2010). Por ejemplo, Ni, *et al.* (2008) utilizaron la ER para obtener información y estudiar la formación de capas en la síntesis del grafeno. En otro estudio, Wojtoniszak, *et al.* (2013) utilizaron la ER para estudiar la funcionalización de grafeno con azul de metileno. La ER del conjugado de grafeno y azul de metileno registró modos de vibración a 1.314 y 1.596 cm^{-1} provenientes de las bandas D y G, lo cual representa el grado de desorden luego de modificar su estructura y el nivel de distribución de las moléculas sobre la estructura del grafeno, respectivamente. En un reporte similar, Long, *et al.* (2012) monitorizaron la funcionalización no covalente de grafeno con aminas mediante ER, y evidenciaron su interacción mediante el desplazamiento de la banda de vibración G hacia energías menores y la disminución en la intensidad del modo de vibración 2D.

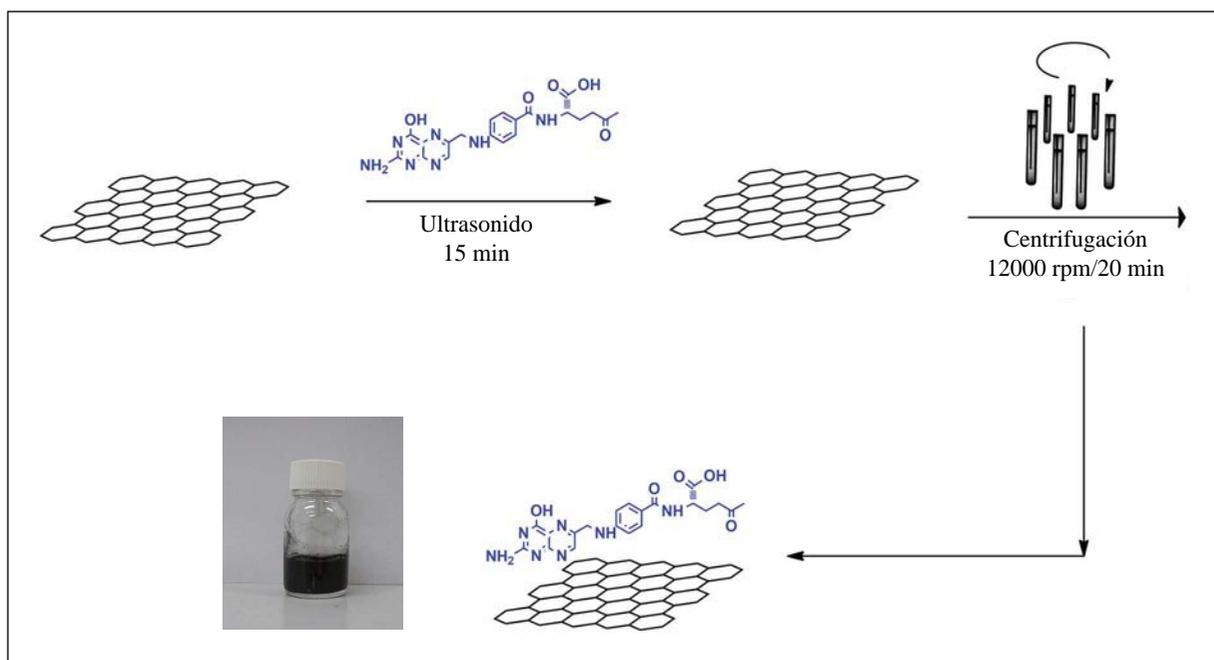


Figura 1. Esquema de la preparación del conjugado de grafeno y ácido fólico

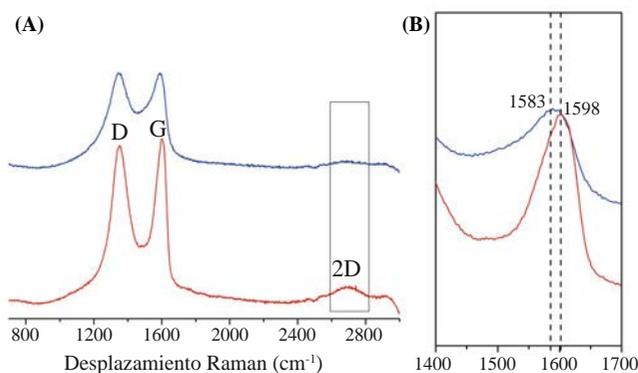


Figura 2. A. Comparación de los espectros Raman del grafeno libre (-) y del funcionalizado con ácido fólico (-). B. Detalle ampliado de la comparación del desplazamiento Raman de la banda G del grafeno libre (-) y el funcionalizado con ácido fólico (-).

En la Figura 2 se comparan los espectros R del grafeno libre y del funcionalizado con ácido fólico.

En la Figura 2A se puede apreciar claramente la presencia de dos bandas a 1.352 cm^{-1} (banda D) y a 1.598 cm^{-1} (banda G) para el caso del grafeno libre. Por otro lado, el espectro Raman del conjugado de grafeno y ácido fólico presenta las mismas bandas, pero a 1.346 cm^{-1} y 1.583 cm^{-1} para las bandas D y G, respectivamente. El espectro Raman del conjugado de grafeno y ácido fólico muestra un desplazamiento de las bandas hacia valores menores en los números de onda (cm^{-1}), con valores de $\Delta\nu_D$ y $\Delta\nu_G$ de 6 y 15 cm^{-1} , respectivamente. Probablemente la estructura del ácido fólico al interactuar con el grafeno provoca este desplazamiento en las bandas D y G, afectando de esta manera los modos de vibración del grafeno y evidenciando su funcionalización no covalente. Este mismo efecto fue observado por **Li, et al.** (2011) quienes funcionalizaron grafeno con ftalocianinas de galio.

Uno de los resultados más utilizados para evaluar la funcionalización de estructuras alotrópicas del carbono es el de la relación de intensidades de las bandas D y G, I_D/I_G (**Dresselhaus, et al.**, 2010). Esta relación permite monitorizar los procesos de funcionalización covalente por medio de la banda D resultante de la transformación de sitios sp^2 a sp^3 . En el caso de la funcionalización no covalente, la relación de intensidades I_D/I_G no es muy notoria y se caracteriza por presentar valores bajos (**Castillo, et al.**, 2013). Por otro lado, los valores de la banda G se utilizan para monitorizar el nivel de distribución de los sitios modificados. La funcionalización covalente de grafeno con ftalocianinas de galio (**Li, et al.**, 2011) mostró un valor de la relación de intensidades D y G de 0,88 para el grafeno libre y de 1,01 para el grafeno modificado con la ftalocianina. Por otro lado, en un estudio para la modificación no covalente de nanotubos de carbono con ácido fólico apenas se registró un aumento de 0,031 en la diferencia de la relación de intensidades de los nanotubos libres y los modificados con el ácido (**Castillo, et al.**, 2013). En la Tabla 1, se presentan los valores en las intensidades

de las bandas D y G del grafeno modificado y sin modificar, además de los valores de desplazamiento Raman (cm^{-1}) de las bandas D y G.

Como se puede apreciar, se registró un aumento en el valor de la relación de las intensidades del grafeno modificado comparada con el valor I_D/I_G del grafeno sin modificar, lo cual es otra evidencia de la funcionalización del grafeno con el ácido fólico. Este aumento en el valor de I_D/I_G indica un aumento en la cantidad de defectos sobre la superficie del grafeno, probablemente debido a la presencia del ácido fólico. La banda 2D es característica de las monocapas de grafeno; esta señal Raman representa un sobretono de la banda D y se utiliza para evaluar la funcionalización y el dopaje de grafeno u óxido de grafeno (**Dresselhaus, et al.**, 2010). La disminución en la intensidad de la banda 2D del conjugado de grafeno y ácido fólico es un indicio del aumento de defectos superficiales del grafeno, lo cual está relacionado, a su vez, con la funcionalización con ácido fólico. Estudios similares muestran, por ejemplo, que la disminución en la intensidad de la banda 2D está relacionada con la funcionalización de grafeno con ácido fólico y óxido de cinc (**Ni, et al.**, 2008).

Tabla 1. Valores de la relación de intensidades de las bandas D y G para el grafeno libre y el modificado con ácido fólico

Muestra	Desplazamiento Raman (cm^{-1})		I_D/I_G
	Banda D	Banda G	
Grafeno	$1352 \pm 5,2$	$1598 \pm 3,2$	0,84
Grafeno y ácido fólico	$1326 \pm 2,8$	$1583 \pm 4,5$	0,87

Triplicados; nivel de confianza del 95 %

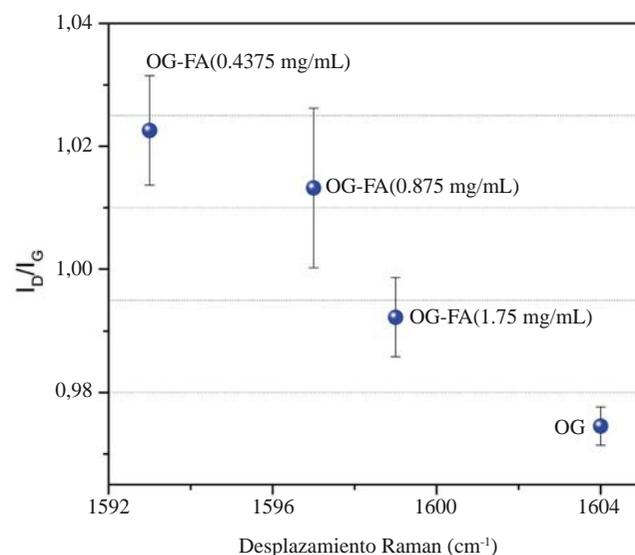


Figura 3. Relación de intensidades de las bandas D y G en función de la banda G para diferentes concentraciones de óxido de grafeno

En la Figura 3 se presenta la relación de intensidades I_D/I_G en función de la banda G para diferentes concentraciones de grafeno libre y del funcionalizado con ácido fólico a una concentración constante de 6,5 mM ($n=10$). Como se aprecia en la figura, a medida que disminuye la cantidad de grafeno el número de defectos aumenta debido a que el ácido ocupa un mayor número de posiciones en la estructura del grafeno. Por otro lado, se aprecia nuevamente el desplazamiento hacia números de ondas menores a medida que el ácido fólico interactúa con el grafeno.

Con el propósito de simular la interacción entre el ácido fólico y el grafeno la estructura electrónica del ácido fue optimizada, como se observa en la Figura 4

En la estructura optimizada del ácido fólico se ven el ácido glutámico y la parte p-aminobenzoico (paba) en el mismo plano molecular, además, el ácido glutámico posee un ángulo diedro de $175,8^\circ$ (C13-C10-C7-C6) y otro ángulo diedro formado por la unión entre este y la parte paba, con un valor de $187,7^\circ$ (C6-N17-C19-C20), en tanto que el ácido glutámico α está fuera del plano, con un diedro de $282,4^\circ$ (C4-C6-N17-C19). Estos resultados concuerdan con los reportados anteriormente por **Castillo, et al.** (2013).

Los métodos computacionales híbridos se han empleado como complemento de los resultados experimentales para simular diversos tipos de interacciones entre formas alotrópicas de carbono (grafeno, nanotubos de carbono, etc.) y diferentes tipos de biomoléculas. En la Tabla 2 Se pueden

apreciar estudios recientes de la aplicación de métodos computacionales para simular interacciones del grafeno y varios tipos de moléculas.

En este estudio y por medio del método semiempírico PM6 se trabajó con una lámina de grafeno de una longitud $20 \times 20 \text{ \AA}$ de tal forma que el ácido fólico tuviese movilidad en la lámina de grafeno y no interaccionara con carbonos de la orilla que tienen hidrógenos. En el modelo A el AF se ubicó en el centro de la lámina de grafeno, mientras en el modelo B en la orilla (ver figura 5).

El modelo teórico basado en el método computacional PM6 corrobora que la formación del complejo grafeno-AF ocurre por medio de interacciones débiles tipo puente de hidrogeno (**Jefrey, 1997; Martz, 2004**). Las interacciones de tipo puentes de hidrógeno se presentan cuando un átomo donador se enlaza covalentemente a otro átomo aceptor electronegativo. De acuerdo con lo anterior las distancias atómicas donador-aceptor en el rango $2.2\text{-}2.5 \text{ \AA}$ son consideradas como interacciones covalentes. Por otro lado, en el rango $2.5\text{-}3.2 \text{ \AA}$ son moderadamente covalentes y en el rango $3.2\text{-}4.0 \text{ \AA}$ se consideran como interacciones débiles electrostáticas (**Jefrey, 1997**). Según lo anterior y como se aprecia en las distancias calculadas entre el ácido fólico y la superficie del grafeno la interacción ácido fólico-grafeno es una interacción no covalente (Figura 6).

El modelo teórico basado en el método computacional PM6 corrobora que la formación del complejo de grafeno y

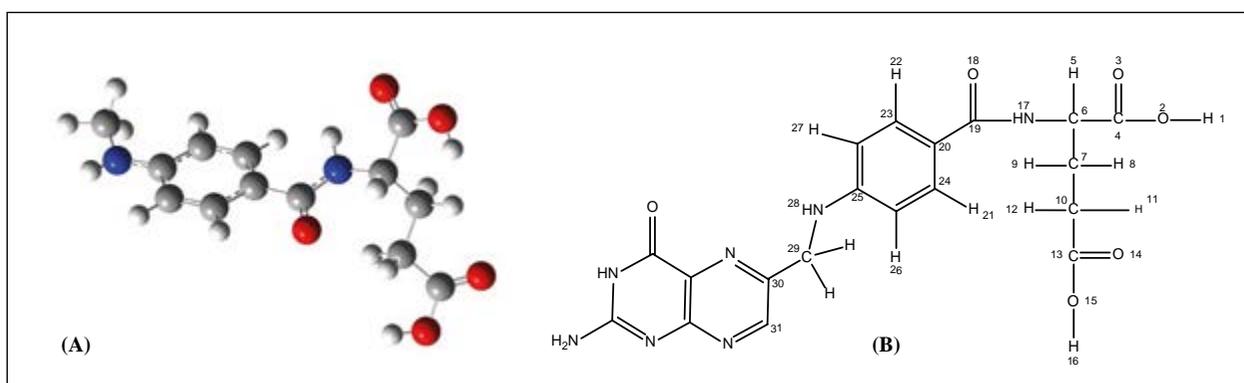


Figura 4. A. Geometría optimizada de la estructura del ácido fólico. B. Estructura química del ácido fólico

Tabla 2. Comparación de métodos computacionales para el estudio de la funcionalización de grafeno con diferentes moléculas

Método	Interacción	Referencia
DFT <i>ab initio</i>	Grafeno-areno	(Zhao, et al., 2012)
DFT	Grafeno-boro	(Manna, et al., 2013)
GGA-DFT	Grafeno-ADN	(Xu, et al., 2014)
MP2	Grafeno-naftaleno-ADN	(Cho, et al., 2013)
LDA-DFT	Grafeno-bisulfato de sodio	(Ayala, et al., 2012)

GGA: aproximación del gradiente generalizado; LDA: aproximación de la densidad local MP2: método Moller-Plesset post Hartree-fock.

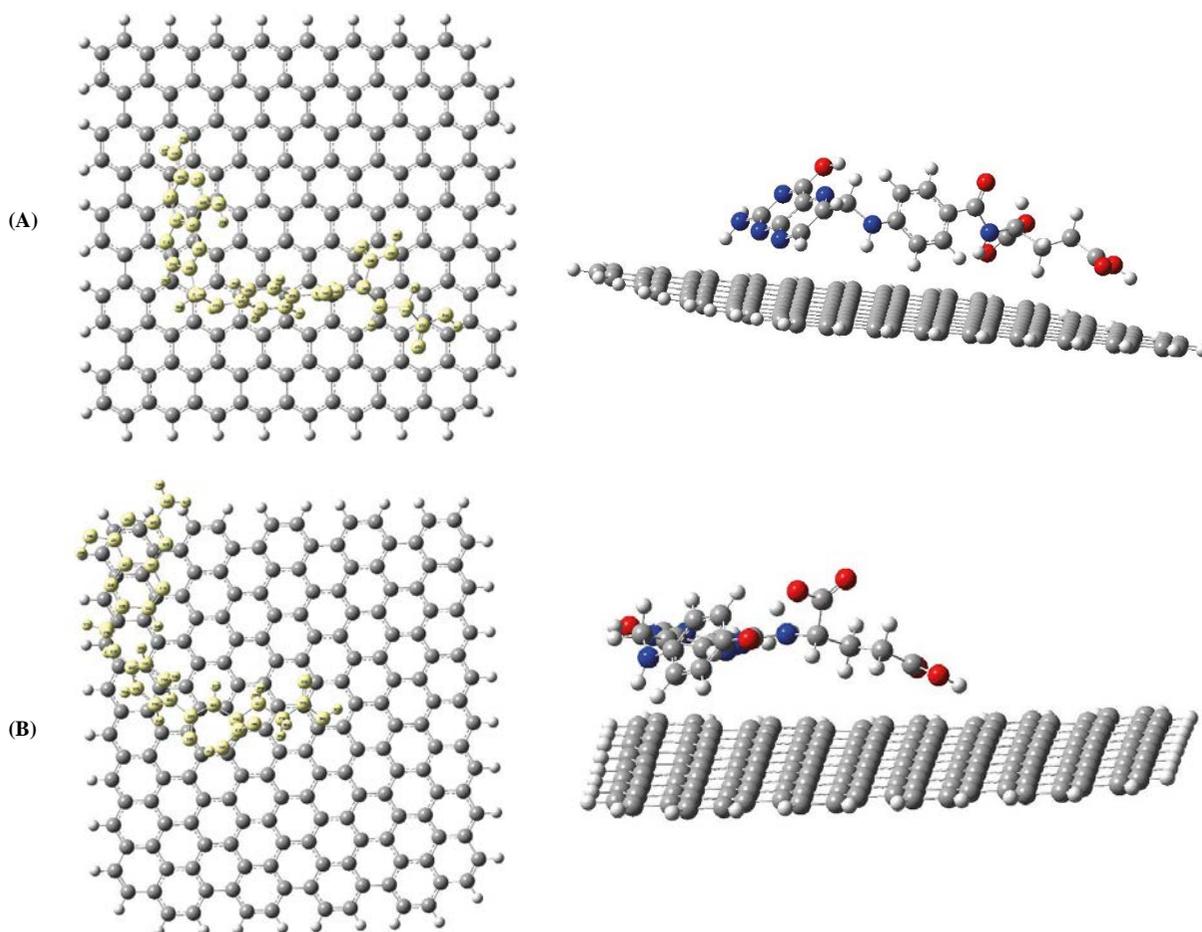


Figura 5. Interacciones del grafeno y el ácido fólico. Modelo A. Ácido fólico en el centro de la lámina de grafeno. Modelo B. Ácido fólico en la orilla

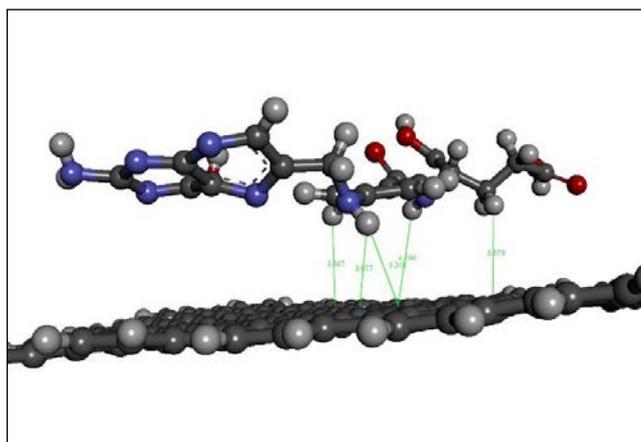


Figura 6. Distancias interatómicas representativas de la interacción del ácido fólico y el grafeno

ácido fólico ocurre por medio de interacciones débiles del tipo de puente de hidrógeno (Jeffrey, 1997; Martz, 2004). Este tipo de interacciones se presentan cuando un átomo donador se enlaza de forma covalente con otro átomo

aceptor electronegativo, de manera que las distancias atómicas entre donador y aceptor en el rango de 2,2 a 2,5 Å se consideran como interacciones covalentes. Por otro lado, en el rango de 2,5 a 3,2 Å son moderadamente covalentes y en el rango de 3,2 a 4,0 Å se consideran como interacciones débiles electrostáticas (Jeffrey, 1997). Según lo anterior, y como se aprecia en las distancias calculadas entre el ácido fólico y la superficie del grafeno, la interacción de los dos es no covalente.

Como se observa en la Figura 6 existen dos modelos: el modelo A se caracteriza por la interacción de los átomos de hidrógeno de los anillos pteridínico y paba del ácido fólico con los electrones de los anillos aromáticos del grafeno. Esta interacción posee un valor de energía de 473.372 Kcal mol⁻¹. El modelo B se caracteriza por la interacción de los electrones π de la pteridina y del anillo aromático del paba con la nube electrónica del grafeno, por lo tanto es una interacción no covalente del tipo de apilamiento (π - π). Esta interacción presentó un valor de energía de 474.454 Kcal mol⁻¹. Si se comparan los valores de energía de los modelos se concluye que el modelo A presentó el valor de energía más bajo y, por lo tanto, fue el más estable, y se caracterizó

por la interacción de los hidrógenos del ácido fólico con la nube electrónica del grafeno, que, al estar en la orilla, no se favorecen energéticamente

Conclusiones

El conjugado de grafeno y ácido fólico se formó con interacciones de tipo no covalente, lo cual se demostró empleando espectroscopia Raman mediante los valores de la relación I_D/I_G y se sustentó con cálculos teóricos que evidenciaron interacciones del tipo de puente de hidrógeno. El conjugado obtenido y caracterizado de esta manera podría utilizarse para la detección de células malignas con sobreexpresión de receptores de folato, o en la elaboración de sistemas de detección rápida de células cancerígenas.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al *Department of Micro and Nanotechnology, Technical University of Denmark*, y a *The Danish Council for Independent Research's NANOPLASmonic Sensors (NAPLAS) Sapere Aude Project*, por la financiación de este estudio.

Contribución de los autores

Angie Orduz, ejecutó y llevo a cabo la mayor parte de los experimentos relacionados con la síntesis y caracterización del conjugado grafeno-ácido fólico. Ciro E. Rozo, ejecutó toda la parte relacionada con los métodos computacionales para la caracterización del grafeno-ácido fólico. John J. Castillo, coordinó todas las actividades y escribió el artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflictos de intereses.

Referencias

- Allen, M., Tung, M., Kaner, R. (2010). Honeycomb carbon: A review of graphene. *Chem Rev.* **110**: 132-145.
- Ayala, I.G., Cordero, N.A. (2012) Interaction of sodium bisulfate with mono- and bi-Layer graphene. *J Nanoparticle Res.* **14**: 1-7.
- Balapanuru, J., Yang, J.X., Xiao, S., Bao, Q., Jahan, M., Polavarapu, L., Wei, J., Xu, Q.H., Loh, K.P. (2010). A graphene oxide-organic dye ionic complex with DNA-sensing and optical-limiting properties. *Angew Chemie - Int Ed.* **49**: 6549-53.
- Becke, A.D. (1993). Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange. *J Chem Phys.* **98**: 5648.
- Becke, A.D. (1996). Density-functional thermochemistry. IV. A new dynamic correlation functional and implications for exact-exchange mixing. *J Chem Phys.* **104**: 1040-6.
- Bose, S., Kuila, T., Mishra, A.K., Kim, N.H., Lee, J.H. (2011) Preparation of non-covalently functionalized graphene using 9-anthracene carboxylic acid. *Nanotechnology.* **22**: 405603.
- Casiraghi, C. (2011). Raman intensity of graphene. *Phys Status Solidi Basic Res.* **248**: 2593-7.
- Castillo JJ, Svendsen WE, Rozlosnik N, Escobar P, Martínez F, Castillo-León J. (2013). Detection of cancer cells using a graphene modified peptide nanotube-folic acid. *Analyst.* **138**: 965-972.

- Castillo J.J., Rindzevicius T., Novoa L. V., Martínez F., Svendsen W.E., Rozlosnik N., Boisen A., Escobar, P., Martínez, F., Castillo, J. (2013). Non-covalent conjugates of single-walled carbon nanotubes and folic acid for interaction with cells over-expressing folate receptors. *J Mater Chem B.* **1**: 1475-81.
- Castillo, J.J., Rindzevicius, T., Wu, K., Rozo, C.E., Schmidt, M.S., Boisen, A. (2015). Silver-capped silicon nanopillar platforms for adsorption studies of folic acid using surface enhanced Raman spectroscopy and density functional theory. *J Raman Spect.* **46**: 1087-1094.
- Castillo, J.J., Rozo, C.E., Castillo-León, J., Martínez, F., Rindzevicius, T., Svendsen, W.E., Rozlosnik, N. (2013). Computational and experimental studies of the interaction between single-walled carbon nanotubes and folic acid. *Chem Phys Lett.* **564**: 60-4.
- Castillo, J.J., Torres, M.H., Molina, D.R., Castillo-León, J., Martínez, F., Escobar P., Svendsen, W.E. (2012) Monitoring the functionalization of single-walled carbon nanotubes with chitosan and folic acid by two-dimensional diffusion-ordered NMR spectroscopy. *Carbon.* **50**: 2691-7.
- Cho, Y., Min, S.K., Yun, J., Kim, W.Y., Tkatchenko, A., Kim, K.S. (2013). Noncovalent interactions of DNA bases with naphthalene and graphene. *J Chem Theory Comput.* **9**: 2090-6.
- Choi, E.Y., Han, T.H., Hong, J., Kim, J.E., Lee, S.H., Kim, H.W., Kim, S.O. (2010). Noncovalent functionalization of graphene with end-functional polymers. *J Mater Chem.* **20**: 1907.
- Dresselhaus, M.S., Jorio, A., Hofmann, M., Dresselhaus, G., Saito, R. (2010). Perspectives on carbon nanotubes and graphene Raman spectroscopy. *Nano Lett.* **10**: 751-8.
- Frisch, M., Trucks, G., Schlegel, H., Scuseria, G., Robb, J., Cheeseman, J. (2010). Gaussian 09, Revision B.01, Inc. Wallingford, CT, 2010.
- Hu, C., Liu, Y., Qin, J., Nie, G., Lei, B., Xiao, Y. (2013). Fabrication of reduced graphene oxide and silver nanoparticle hybrids for Raman detection of absorbed folic acid: A potential cancer diagnostic probe. *ACS Appl Mater Interfaces.* **12**: 4760-4768.
- Jeffrey, A. (1997). An Introduction to Hydrogen Bonding. Oxford University Press. p. 56-71.
- Martz, E. (2004). Help, Index & Glossary for Protein Explorer. http://www.umass.edu/microbio/chime/pe_beta/pe/protexpl/igloss.htm?q=microbio/chime/explorer/igloss.htm
- Kamińska, A., Dzieciolewski, I., Weyher, J.L., Waluk, J., Gawinkowski, S., Sashuk, V., Fialkowski, M., Sawicka, M., Suski, T., Porowski, S., Holyst, R. (2011). Highly reproducible, stable and multiple regenerated surface-enhanced Raman scattering substrate for biomedical applications. *J Mater Chem.* **21**: 8662.
- Li, Y.X., Zhu, J., Chen, Y., Zhang, J., Wang, J., Zhang, B., He, J., Blau, W.J. (2011). Synthesis and strong optical limiting response of graphite oxide covalently functionalized with gallium phthalocyanine. *Nanotechnology.* **22**: 205704.
- Long, B., Manning, M., Burke, M., Szafranek, B.N., Visimberga, G., Thompson, D., et al. (2012). Non-covalent functionalization of graphene using self-assembly of alkane-amines. *Adv Funct Mater.* **22**: 717-25.

- Manna, A.K., Pati, S.K.** (2013). Computational studies on non-covalent interactions of carbon and boron fullerenes with graphene. *ChemPhysChem*. **14**: 1844-52.
- Ni, Z., Wang, Y., Yu, T., Shen, Z.** (2008). Raman spectroscopy and imaging of graphene. *Nano Res*. **1**: 273-91.
- Rassolov, V.A.** (2001). 6-31G* basis set for third-row atoms. *J Comput Chem*. **22**: 976-84.
- Stewart, J.J.** (2007). Optimization of parameters for semi-empirical methods V: Modification of NDDO approximations and application to 70 elements. *J Mol Model*. **13**: 1173-213.
- Wojtoniszak, M., Rogińska, D., Machaliński, B., Drozdziak, M., Mijowska, E.** (2013). Graphene oxide functionalized with methylene blue and its performance in singlet oxygen generation. *Mater Res Bull*. **48**: 2636-9.
- Xu, Z., Meher, B.R., Eustache, D., Wang, Y.** (2014). Insight into the interaction between DNA bases and defective graphenes: Covalent or non-covalent. *J Mol Graph Model*. **47**: 8-17.
- Zhao, J.X., Wang, H.X., Gao, B., Wang, X.G., Cai, Q.H., Wang, X.Z.** (2012). Chemical functionalization of graphene via aryne cycloaddition: A theoretical study. *J Mol Model*. **18**: 2861-8.

Algoritmo teórico para la estimación de la radiación solar global para una atmósfera despejada

Carlos Girado-Polo*, Leonardo Gónima-Gónima

Grupo de Física Aplicada y de Materiales, Departamento de Física y Electrónica, Universidad de Córdoba, Montería Colombia

Resumen

En este trabajo se desarrolló un algoritmo para la estimación de la radiación solar global, para una atmósfera despejada, mediante el modelamiento de las ecuaciones teóricas de transferencia radiativa de onda corta ($0,3 \mu\text{m}$ - $2,8 \mu\text{m}$). Se determinaron las transmitancias espectrales de la radiación solar directa, debidas a la dispersión de Rayleigh y Mie. Mediante el software Propiedades Ópticas de Aerosoles y Nubes (Optical Properties of Aerosols and Clouds, OPAC) se calculó la Profundidad Óptica de los Aerosoles (Aerosol Optical Depth, AOD) para cuatro diferentes tipos de atmósferas, indispensable para la determinación del índice de turbidez de Ångström. Así mismo, se calcularon las transmitancias espectrales por absorción de la radiación solar directa, incluyendo aerosoles, vapor de agua, ozono y aire seco (mezcla de gases). El contenido de O_3 se obtuvo de los datos diarios existentes en base de datos de la NASA. Para la componente difusa de la radiación solar, se dedujo una nueva expresión para el cálculo de la fracción de la radiación solar dispersada por los aerosoles hacia la superficie terrestre. La comparación estadística entre los resultados obtenidos con el algoritmo desarrollado, los datos medidos de la radiación global (estación Potsdam - Alemania) y los resultados de otros tres modelos radiativos, entre 2012 y 2014, muestra que el nuevo modelo permite calcular los valores horarios de la radiación solar global con suficiente precisión. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Modelación teórica; Radiación solar global; Profundidad Óptica de los Aerosoles; Fracción espectral de dispersión hacia adelante; Radiación solar directa; Radiación solar difusa.

Theoretical algorithm for estimating global solar radiation for a cloudless atmosphere

Abstract

In this work we developed an algorithm to estimate global solar radiation for a cloudless atmosphere, by using the shortwave radiative transfer equations ($0.3 \mu\text{m}$ - $2.8 \mu\text{m}$). Spectral transmittances of direct solar radiation due to Rayleigh and Mie scattering were determined. In order to estimate the Ångström turbidity coefficient, the Aerosol Optical Depth (AOD) was calculated for four different types of atmospheres, using the software Optical Properties of Aerosols and Clouds (OPAC). Likewise, spectral transmittances due to absorption of direct solar radiation were calculated, including aerosols, water vapor, carbon dioxide and dry air (mixed gases). The ozone content was obtained from daily data of NASA's database. For the diffuse component of solar radiation, a new equation was developed for the calculation of the spectral forward scattering fraction. The statistical comparison between the results obtained with the model developed here, the measured global solar radiation data at Potsdam radiation station in Germany and the results of other three radiative models, between 2012 and 2014, shows that the new model allows to calculate the hourly global solar radiation with sufficient precision. © 2018. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Theoretical modelling; Global solar radiation; Aerosol Optical Depth; Spectral forward scattering fraction; Direct solar radiation; Diffuse solar radiation.

Introducción

El primer algoritmo publicado para el cálculo de la radiación solar global fue el de Ångström (1924), que posteriormente fue modificado por Prescott (1940). En la actualidad, los modelos denominados Ångström-Prescott, que de acuerdo con Pelkowski (2009) incluyen de forma integral las interacciones entre la atmósfera despejada y la radiación solar, son utilizados debido a su sencillez y facilidad en el

cálculo de la radiación solar. Estos modelos para poderlos utilizar, requieren indispensablemente de datos medidos "in situ" de la radiación solar global (i.e. López, *et al.*, 2007, Janjai, *et al.*, 2013, Pacheco, *et al.*, 2017), sin la

*Correspondencia:

Carlos Girado-Polo, karlg21@hotmail.com

Recibido: 23 de enero de 2018

Aceptado: 24 de marzo de 2018

Editor: Germán Poveda

cual es imposible calcular la ecuación correspondiente para la estimación de dicha variable, lo cual constituye una limitación de éstos.

Para resolver el problema descrito anteriormente, algunos autores han desarrollado modelos teóricos y semi-teóricos o híbridos utilizados en el cálculo de la radiación solar global de una atmósfera despejada, basados en las ecuaciones de transferencia radiativa de onda corta en la atmósfera (teoría de Lambert-Bouguer). En este sentido y como ejemplos, **Brine e Iqbal** (1983) desarrollaron un modelo espectral que permite estimar la radiación solar difusa y global, de una atmósfera despejada. En este modelo se consideran los procesos de extinción de la radiación solar en la atmósfera: absorción de la radiación solar por las moléculas de ozono, vapor de agua, los gases uniformemente mezclados y los aerosoles, y la dispersión de la radiación solar por efecto Rayleigh y Mie. Así mismo, **Justus y Paris** (1985) desarrollaron un modelo espectral utilizado en el cálculo de la radiación solar directa y difusa en la superficie terrestre, basados en aproximaciones similares a los modelos de **Brine e Iqbal**. Posteriormente, **Bird y Riordan** (1986), modificaron la componente de la radiación solar difusa de **Justus y Paris** (1985) mediante el algoritmo de transferencia radiativa BRITE. Por otra parte, **Yang, et al.** (2001) diseñaron un modelo para el cálculo de la radiación solar global de una atmósfera despejada, a partir de las componentes teóricas de las radiaciones directa y difusa (dispersión simple). Este modelo fue mejorado en **Yang, et al.** (2006) al desarrollar nuevas expresiones en el cálculo de las transmitancias atmosféricas, además de introducir en él datos de aerosoles y ozono disponibles a nivel mundial en vez de relaciones empíricas para el cálculo de estos. Posteriormente, **Tang, et al.** (2010) reescribieron las ecuaciones de transmitancia directa y difusa del modelo híbrido de **Yang, et al.** (2006), y a partir de éstas calcularon las componentes de la radiación solar global de una atmósfera despejada. Recientemente, **Dai y Fang** (2014) desarrollaron un algoritmo que mejoró la precisión del cálculo de la radiación solar global para una atmósfera despejada, a partir de una nueva expresión para la estimación de la radiación solar difusa.

En este trabajo se desarrolló un nuevo modelo híbrido para el cálculo de la radiación solar global de una atmósfera despejada, a partir de los valores espectrales de radiación solar directa y difusa (limitado a primera dispersión). En este modelo se propone y utiliza una nueva expresión teórica para la determinación de la fracción de la radiación solar difusa incidente sobre la superficie. El cálculo y validación del modelo desarrollado se realizó con datos de la estación Potsdam (Alemania) entre los años 2012 y 2014.

Materiales y métodos

El modelo desarrollado en el cálculo de la radiación solar, de una atmósfera despejada, está basado en la siguiente expresión espectral:

$$K_{\lambda} \downarrow = K_{D\lambda} \downarrow + K_{d\lambda} \downarrow \quad (1)$$

donde $K_{D\lambda} \downarrow$ es la radiación solar directa espectral y $K_{d\lambda} \downarrow$ es la radiación solar difusa espectral.

La radiación solar directa espectral incidente sobre la superficie $K_{D\lambda} \downarrow$ se determina a partir de la expresión de Bird y Riordan (1986):

$$K_{D\lambda} \downarrow = K_{E\lambda}^* \downarrow P_{\lambda}^R P_{\lambda}^M P_{\lambda}^a P_{\lambda}^{O_3} P_{\lambda}^{mg} P_{\lambda}^{H_2O} \quad (2)$$

siendo, $K_{E\lambda}^* \downarrow$ la radiación espectral extraterrestre efectiva, determinada por:

$$K_{E\lambda}^* \downarrow = K_{E\lambda} \downarrow f \cos \theta \quad (3)$$

donde, $K_{E\lambda} \downarrow$ es la radiación espectral extraterrestre perpendicular o constante solar espectral, f es el factor de corrección astronómica, ambos determinados por **Fröhlich y London** (1986), mientras que θ es el ángulo cenital solar. P_{λ}^R y P_{λ}^M son las transmitancias espectrales debidas a las dispersiones de Rayleigh y Mie respectivamente, y P_{λ}^a , $P_{\lambda}^{O_3}$, P_{λ}^{mg} y $P_{\lambda}^{H_2O}$ son las transmitancias espectrales debidas a la absorción de aerosoles, ozono, mezcla de gases (**Justus y Paris**, 1985) y vapor de agua, respectivamente.

La transmitancia espectral debida a la dispersión de Rayleigh P_{λ}^R , se determina por medio de

$$P_{\lambda}^R = e^{-m_r \delta_{\lambda}^R} \quad (4)$$

Donde m_r es la masa relativa que se obtiene a partir de **Kasten** (1965)

$$m_r = \frac{1}{\cos \theta + 0,15(93,885 - \theta)^{-1,253}} \quad (5)$$

En la ecuación (4), δ_{λ}^R es el coeficiente de dispersión adimensional de Rayleigh dado por **Fröhlich y London** (1986):

$$\delta_{\lambda}^R = \left(\frac{p}{p_0}\right) 0,00865 \lambda^{-(3,916+0,074 \lambda+0,05/\lambda)} \quad (6)$$

siendo p_0 la presión atmosférica al nivel del mar (1013.25 hPa) y p^* es la presión atmosférica en el lugar de medición seleccionado.

La transmitancia espectral debida a la dispersión de Mie P_{λ}^M tiene la forma:

$$P_{\lambda}^M = e^{-m_r \delta_{\lambda}^M} \quad (7)$$

en la cual el coeficiente de dispersión adimensional de Mie δ_{λ}^M está dado por Ångström (1961):

$$\delta_{\lambda}^M = \beta \lambda^{-1,3} \quad (8)$$

β es el coeficiente de turbidez de Ångström, determinado por medio del espesor óptico de los aerosoles AOD (**Hess, et al.**, 1998)

$$\beta = 0,55^{1,3} \text{AOD}(0,55) \quad (9)$$

donde, AOD (0,55) es el espesor óptico debido a la dispersión de los aerosoles, normalizado a una longitud de onda de 0,55 μm .

La expresión para determinar la transmitancia espectral debida a la absorción de aerosoles P_{λ}^a , está dada por **Russell, et al.** (2010),

$$P_{\lambda}^a = e^{-(1-\omega_{0\lambda})m_r \delta_{\lambda}^M} \quad (10)$$

siendo, $\omega_{0\lambda}$ el denominado albedo de dispersión simple.

La transmitancia espectral debida a la absorción del ozono $P_{\lambda}^{O_3}$, se determina por la expresión de **Leckner** (1978):

$$P_{\lambda}^{O_3} = e^{-k_{\lambda}^{O_3} l m_{O_3}} \quad (11)$$

$k_{\lambda}^{O_3}$ es el coeficiente de absorción del ozono, l es el contenido de ozono en la atmósfera y m_{O_3} es la masa relativa del ozono, que se obtiene mediante la ecuación de **Iqbal** (1983):

$$m_{O_3} = \frac{1+z/R}{(\cos^2 \theta + 2z/R)^{1/2}} \quad (12)$$

siendo, z la altitud del lugar de medida y R el radio de la Tierra.

De acuerdo a **Leckner** (1978), la transmitancia espectral debida a la mezcla de gases P_{λ}^{mg} tiene la forma:

$$P_{\lambda}^{mg} = e^{-1,41 k_{\lambda}^{mg} m_a / (1 + 118,93 k_{\lambda}^{mg} m_a)^{0,45}} \quad (13)$$

donde, k_{λ}^{mg} es el coeficiente de absorción de los gases uniformemente mezclados y m_a es la masa relativa aparente, que se obtiene de la expresión de **Kasten** (1965):

$$m_a = m_r \left(\frac{p^*}{p_0} \right) \quad (14)$$

La transmitancia espectral debida a la absorción del vapor de agua $P_{\lambda}^{H_2O}$ se determina por **Leckner** (1978) y tiene la forma:

$$P_{\lambda}^{H_2O} = e^{-0,2385 k_{\lambda}^{H_2O} m_r \omega / (1 + 20,7 k_{\lambda}^{H_2O} m_r \omega)^{0,45}} \quad (15)$$

siendo, $k_{\lambda}^{H_2O}$ el coeficiente de absorción del vapor de agua y ω el contenido de agua precipitable en una columna de aire. Este último se determina así:

$$\omega = 0,493 \frac{HR p_s}{100 T} \quad (16)$$

HR es la humedad relativa, T la temperatura del aire y p_s la presión de saturación del vapor de agua, que se obtiene mediante la expresión de **Leckner** (1978), ecuación (17), en la cual $e^{26,23}$ contiene la dimensionalidad de esta presión:

$$p_s = e^{26,23} e^{(-5416/T)} \quad (17)$$

Regresando a la ecuación (1), la estimación teórica de $K_{d\lambda} \downarrow$ es bastante compleja debido a las diferentes direcciones de la dispersión y a los respectivos estados de polarización de la radiación solar incidente. Como ilustración de esta situación **Goody y Yung** (1989) proponen una expresión para la determinación de la radiación solar dispersada por una atmósfera despejada en todas las direcciones, de la forma:

$$\frac{\omega_0 \lambda}{4\pi} \int_{4\pi} I_{\lambda} \downarrow F_{\lambda}(\Omega, \Omega') d\Omega' \quad (18)$$

donde, $I_{\lambda} \downarrow$ es la radiación solar incidente en una capa o volumen determinado de la atmósfera y $F_{\lambda}(\Omega, \Omega')$ es la función de fase, dependiente de los ángulos sólidos de la radiación incidente Ω y dispersada Ω' . Puesto que en la práctica, la estimación de F_{λ} (diferentes direcciones de dispersión y de polarización de la radiación solar incidente) presenta grandes dificultades, se recurrió a la ecuación propuesta por **Justus y Paris** (1985) en el cálculo de la radiación solar difusa espectral $K_{d\lambda} \downarrow$:

$$K_{d\lambda} \downarrow = K_{d\lambda}^R \downarrow + K_{d\lambda}^M \downarrow \quad (19)$$

siendo, $K_{d\lambda}^R \downarrow$ la radiación solar difusa debida a la dispersión de Rayleigh y $K_{d\lambda}^M \downarrow$ la debida a la dispersión de Mie. $K_{d\lambda}^R \downarrow$ está dado por:

$$K_{d\lambda}^R \downarrow = 0,5 K_{E\lambda}^* \downarrow P_{\lambda}^{O_3} P_{\lambda}^{mg} P_{\lambda}^{H_2O} P_{\lambda}^a (1 - P_{\lambda}^R) \quad (20)$$

donde, 0,5 es la fracción de la radiación solar dispersada hacia la superficie terrestre por efecto Rayleigh.

Para la determinación de $K_{d\lambda}^M \downarrow$ se utilizó la siguiente expresión teórica:

$$K_{d\lambda}^M \downarrow = f_{\lambda}^M K_{E\lambda}^* \downarrow P_{\lambda}^{O_3} P_{\lambda}^{mg} P_{\lambda}^{H_2O} P_{\lambda}^a (1 - P_{\lambda}^M) \quad (21)$$

Siendo, f_{λ}^M la fracción de la radiación solar dispersada por los aerosoles hacia la superficie terrestre, la cual se determina a partir de la expresión teórica citada en **Gónima** (1993):

$$f_{\lambda}^M = \frac{\omega_0 \lambda}{2} (1 + g_{\lambda}) \quad (22)$$

siendo, g_{λ} el factor de asimetría.

Dada la importancia teórica de f_{λ}^M en el cálculo de $K_{d\lambda}^M \downarrow$ y para mejorar la descripción y precisión de la estimación de $K_{\lambda} \downarrow$ (ec. (1)), se modificó la ecuación (22), ya que esta describe únicamente la dispersión de la componente vertical de la radiación solar incidente sobre los aerosoles, como se muestra en la figura 1 para $\theta = 0^\circ$.

En realidad, al incidir la radiación solar con diferentes ángulos θ (Figura 1), la radiación dispersada de Mie hacia un lugar determinado de la superficie terrestre varía a medida que θ aumenta. Por consiguiente y basado en **Irvine** (1963) esta dependencia se introdujo en la ecuación (22), de la siguiente forma:

$$f_{\lambda}^M(\theta) = \frac{\omega_0 \lambda}{2} (1 + g_{\lambda} \cos \theta) \quad (23)$$

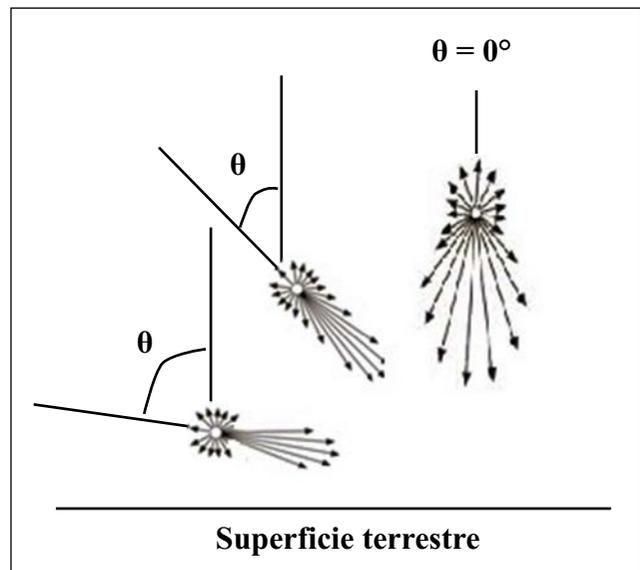


Figura 1. Dispersión de Mie para diferentes ángulos cenitales θ .

Un análisis del comportamiento teórico de la ecuación (23) se realizó utilizando la ecuación (22) y el modelo validado y aceptado internacionalmente de **Bird y Riordan**, (1986). Estos últimos autores presentan una compleja expresión empírica para representar la dependencia directa de f_{λ}^M con θ .

El comportamiento de $f_{\lambda}^M(\theta)$, ec. (23), se muestra en la figura 2, comparado con el de los dos modelos mencionados anteriormente.

En la figura 2 se observa que $f_{\lambda}^M(\theta)$, ecuación (23), está por debajo de los valores de dicha fracción comparado con los de la ecuación (22) y de **Bird y Riordan** (1986). Sin embargo, para θ cercanos a la vertical ($\theta < 10^\circ$), los valores de $f_{\lambda}^M(\theta)$ estimados por la ecuación (23), son similares a los calculados con la ecuación (22) ($\theta = 0^\circ$). Para $\theta > 10^\circ$, $f_{\lambda}^M(\theta)$ de la ecuación (23) muestra la dependencia con el ángulo, siendo esta mayor a medida que aumenta θ . Respecto a Bird y Riordan (1986), a pesar de que su fracción también depende de θ , los valores calculados con ésta están por encima de los obtenidos con las ecuaciones (22) y (23).

Continuando con el análisis de $f_{\lambda}^M(\theta)$, la figura 3 muestra el comportamiento espectral de los $f_{\lambda}^M(\theta)$ de la ecuación (23) y de **Bird y Riordan** (1986), y el $f_{\lambda}^M(\theta = 0^\circ)$ de la ecuación (22) para dos horas del día (ejemplo).

En la figura 3, se observa que los valores de $f_{\lambda}^M(\theta)$ de la ecuación (23) y de **Bird y Riordan** (1986) son mayores a las 13:00 horas comparados con los valores de la misma variable a las 6:00 hora local. Esto se debe a la dependencia de $f_{\lambda}^M(\theta)$ con el ángulo cenital (Figura 2) y por consiguiente la cantidad de radiación solar dispersada por los aerosoles hacia la superficie terrestre dependerá de la hora del día. Respecto a $f_{\lambda}^M(\theta = 0^\circ)$ de la ecuación (22), tanto su comportamiento como sus valores en ambas horas del día son similares, es decir, los aerosoles dispersan porcentualmente la misma cantidad de radiación solar hacia la superficie terrestre a cualquier hora del día para una misma longitud de onda.

De acuerdo con lo anterior, la nueva expresión desarrollada para la determinación de $K_{d\lambda}^M \downarrow$ fue:

$$K_{d\lambda}^M \downarrow = f_{\lambda}^M(\theta) K_{E\lambda}^* \downarrow P_{\lambda}^{O_3} P_{\lambda}^{mg} P_{\lambda}^{H_2O} P_{\lambda}^a (1 - P_{\lambda}^M) \quad (24)$$

Una vez obtenidas todas las variables radiativas antes mencionadas, la radiación solar global integral $K \downarrow$ ($0,3 \mu\text{m} - 2,8 \mu\text{m}$) se determinó así:

$$K \downarrow = \int_{\lambda} K_{\lambda} \downarrow d\lambda = \int_{\lambda} (K_{D\lambda} \downarrow + K_{d\lambda} \downarrow) d\lambda = K_D \downarrow + K_d \downarrow \quad (25)$$

siendo, $K_D \downarrow$ y $K_d \downarrow$ las irradiancias solares directa y difusa integrales de una atmósfera despejada, respectivamente.

Los datos requeridos para el desarrollo del modelo fueron adquiridos a partir de las bases de datos meteorológicos y de radiación solar del servicio meteorológico alemán (**Deutscher Wetterdienst, DWD**, 2016), entre el periodo de tiempo comprendido entre el 01.01.2012 y el 31.12.2014, correspondientes a 17536 datos horarios seleccionados (debidamente validados) de la temperatura del aire T , presión atmosférica p , humedad relativa HR , ángulo cenital solar θ ,

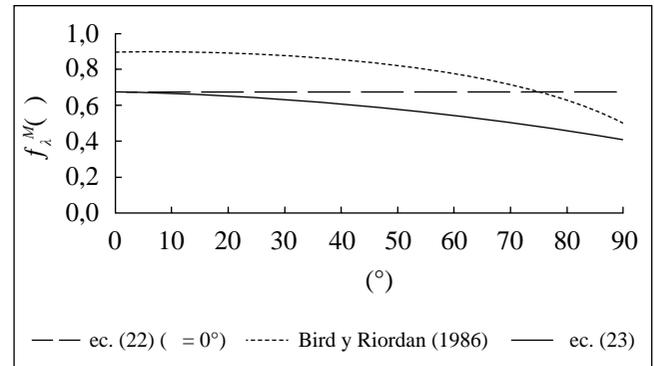


Figura 2. Variación de la fracción de la radiación solar dispersada por los aerosoles en dirección a la superficie terrestre $f_{\lambda}^M(\theta)$.

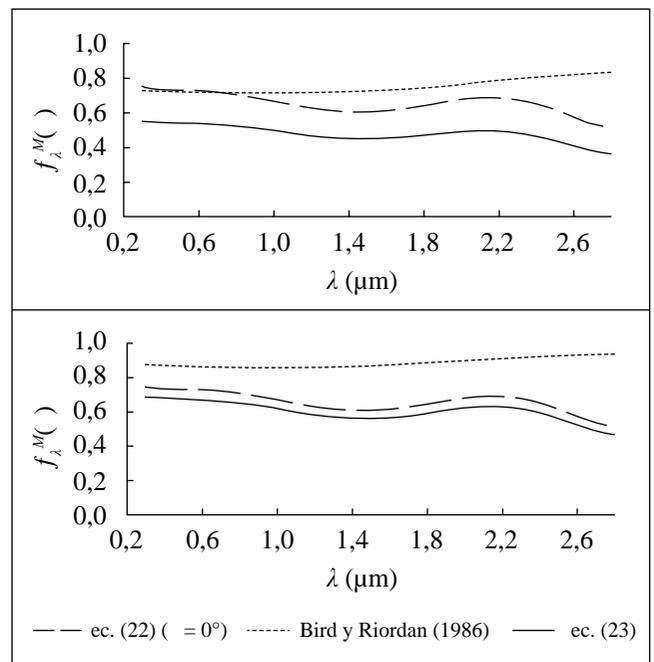


Figura 3. Variación de la fracción de la radiación solar dispersada por los aerosoles en dirección a la superficie terrestre ($f_{\lambda}^M(\theta)$) en función de λ , correspondiente al día 25 de julio de 2012 a las (a) 6:00 horas local con $\theta = 37.25^\circ$ y (b) 13:00 horas local con $\theta = 70.11^\circ$.

radiación solar global $K \downarrow$ y complementariamente la fracción del brillo solar. La estación meteorológica y radiométrica seleccionada está localizada en Potsdam-Alemania ($52^\circ 22' 48''$ N, $13^\circ 3' 36''$ E y 81 msnm). Del total de los datos antes mencionados para cada variable, se seleccionaron los correspondientes a una atmósfera despejada, utilizando la fracción del brillo solar en la identificación de éstos. A continuación, se eliminaron aquellos datos que correspondían a HR mayores al 90% (atmósfera con un alto contenido de vapor de agua), lo que en la práctica no representa las condiciones de una atmósfera despejada. Posteriormente, se descartaron aquellos datos de las fechas, en las cuales no existían las correspondientes mediciones de ozono de acuerdo a **NASA**

(2015). Finalmente, se obtuvieron 1350 datos horarios de T , p , HR, θ y $K \downarrow$ de una atmósfera despejada, correspondientes a 315 días calendario, con los cuales se procedió al cálculo de la radiación solar global integral, ecuación (25).

Para el cálculo de $K_{\lambda} \downarrow$ en la ecuación (1), fue necesario determinar inicialmente $K_{D\lambda} \downarrow$ por medio de la ecuación (2). Para esto se calculó $K_{E\lambda}^* \downarrow$, ecuación (3), a partir de la constante solar espectral $K_{E\lambda} \downarrow$ y del factor de corrección astronómica f (Fröhlich y London, 1986), así como del ángulo cenital θ . Posteriormente, se determinaron las transmittancias atmosféricas espectrales en su orden:

a) Se calculó P_{λ}^R , ecuación (4), por medio de m_r , ecuación (5) y δ_{λ}^R , ecuación (6).

b) Se determinó P_{λ}^M , ec. (7), en la cual δ_{λ}^R y β se calcularon mediante las ecuaciones (8) y (9), respectivamente. En la determinación del AOD, se utilizó el software Optical Properties of Aerosols and Clouds OPAC (OPAC, 2016), que además de calcular el AOD, proporciona el contenido y las propiedades ópticas de los aerosoles de la atmósfera para diferentes longitudes de onda y diferentes valores de HR. El procedimiento utilizado en el cálculo del AOD fue el siguiente:

Inicialmente se calculó esta variable utilizando solamente el modelo atmosférico Continental Polluted para los aerosoles, descrito en el software mencionado.

Debido a que la estación meteorológica y radiométrica en Potsdam, situada al suroeste de Berlín, está en las cercanías de esta última (35 km aproximadamente), su atmósfera está fuertemente influenciada por la de Berlín (ciudad industrial), la cual permanece parte del año afectada por contaminantes atmosféricos en forma de aerosoles generados por la actividad industrial y los sistemas de calefacción de carbón y kerosene (Alemania guía de vivienda, 2016). En este sentido y puesto que la atmósfera de interés presentó marcadas variaciones durante el transcurso del tiempo, debidas al contenido de aerosoles, como se pudo comprobar posteriormente, al analizar los resultados calculados de la radiación solar global utilizando un solo tipo de atmósfera (Continental Polluted del OPAC), fue necesario seleccionar cuatro tipos de atmósfera, representativas del contenido y propiedades ópticas de los aerosoles existentes en la atmósfera sobre el lugar de medición (Urban-UR, Continental Polluted-CP, Continental Average-CA y Continental Clean-CC). Estos modelos de atmósferas fueron aplicados selectivamente en el cálculo de los datos horarios del AOD. En el OPAC, para el cálculo del AOD, se utiliza HR como variable representativa de las condiciones termodinámicas de la atmósfera existentes sobre el lugar de medición, cuyos valores nominales son 0%, 50%, 70%, 80%, 90%, 95%, 98% y 99% (OPAC, 2016). Entonces, para la determinación de valores horarios de AOD (datos de HR diferentes a los nominales), fue necesario calcular y aplicar una correlación estadística entre los AOD calculados para cada uno de los datos nominales de HR y éstos.

c) Se estimó P_{λ}^a utilizando la ecuación (10), en la cual para determinar el albedo de dispersión simple $\omega_{0\lambda}$, se

seleccionaron los datos discretos existentes de $\omega_{0\lambda}$ (WCP, 1986), con los cuales se calculó una regresión estadística ($\omega_{0\lambda}$, λ) para con ella calcular $\omega_{0\lambda}$ en el rango espectral 0,3 μm -2,8 μm .

d) Se calculó $P_{\lambda}^{O_3}$ mediante la ecuación (11). Los valores de $k_{\lambda}^{O_3}$ requeridos se adquirieron de las tablas existentes en Leckner (1978). Los valores de l (contenido de O_3) se extrajeron de las bases de datos específicas de la NASA (2015), correspondientes a las fechas de los 1350 datos seleccionados como representativos de una atmósfera despejada. Finalmente, m_{O_3} se estimó a partir de la ecuación (12).

e) Se determinó $P_{\lambda}^{m_g}$ utilizando la ecuación (13), en la cual los valores de $k_{\lambda}^{m_g}$ requeridos se adquirieron de las tablas existentes en Leckner (1978) y m_a se estimó a partir de la ecuación (14).

f) Se estimó $P_{\lambda}^{H_2O}$ a partir de la ecuación (15), en la cual los valores de $k_{\lambda}^{H_2O}$ se adquirieron de las tablas existentes en Leckner (1978). ω se determinó mediante la ecuación (16) y p_s mediante de la ecuación (17).

La componente de la radiación solar difusa espectral $K_{d\lambda} \downarrow$, ecuación (19), se calculó de la siguiente forma:

a) $K_{d\lambda}^R \downarrow$ se calculó a partir de la ecuación (20).

b) $K_{d\lambda}^M \downarrow$, ec. (24), en la cual $f_{\lambda}^M(\theta)$ se determinó mediante la ecuación (23). Para calcular el factor de asimetría g , se seleccionaron los datos discretos existentes de g (WCP, 1986), a partir de los cuales se calculó una regresión estadística (g , λ) para con ella estimar esta variable entre 0,3 μm y 2,8 μm .

Una vez realizado lo anterior, la radiación solar global integral $K \downarrow$ para los 1350 datos horarios seleccionados correspondientes a una atmósfera despejada, se determinó a partir de la ecuación (25). Finalmente, se validaron los resultados de $K \downarrow$, calculados por medio del modelo desarrollado, con las mediciones hechas en campo de esta misma variable en la estación meteorológica Potsdam, (01.01.2012 - 31.12.2014), comparándolos al mismo tiempo con los resultados de $K \downarrow$ obtenidos utilizando otros tres modelos seleccionados de la literatura especializada actual: Yang, et al. (2006), Tang, et al. (2010), y Dai y Fang (2014).

Resultados y discusión

El modelo desarrollado de una atmósfera despejada, permite hacer cálculos horarios de la radiación solar global, a partir de variables meteorológicas que describen el estado de la atmósfera y de otras variables radiativas que requieren ser calculadas. En análisis de los resultados obtenidos se escogió un día en particular (25 de julio de 2012), ya que para el resto de días seleccionados con atmósfera despejada (315 en total), el comportamiento mostrado por las variables involucradas es similar.

Dada la importancia que tiene la radiación solar difusa en el cálculo de la radiación solar global, inicialmente se hace un análisis exhaustivo de dicha variable en función de la radiación solar dispersada hacia la superficie terrestre por los aerosoles, al igual que el tipo de atmósfera seleccionado.

Finalmente, se comparan los resultados de $K \downarrow$ calculados con el nuevo modelo y los obtenidos aplicando los otros tres modelos mencionados anteriormente.

Al realizar inicialmente los cálculos de $K_\lambda \downarrow$ con un solo modelo atmosférico (CP) se obtuvieron resultados que difirieron en gran medida respecto a los datos medidos de esta variable, y puesto que la ubicación de la zona de estudio está influenciada por los aerosoles provenientes de la ciudad de Berlín, fue necesario utilizar los cuatro modelos atmosféricos definidos anteriormente, para mejorar la precisión del cálculo de $K_\lambda \downarrow$ (ec. (1)). Las características de los aerosoles que componen cada una de las atmósferas seleccionadas, para diferentes valores de HR, se muestran en la tabla 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2579> (Hess, *et al.*, 1998).

Analizando los datos de la composición de las cuatro atmósferas seleccionadas (Tabla 1S), ρ es diferente en las tres componentes (Partículas insolubles en agua, Partículas solubles en agua y Hollín) de cada una de las atmósferas seleccionadas. En particular, la componente insoluble muestra una mayor densidad respecto a las otras dos componentes. Respecto a N, para las componentes Partículas insolubles en agua, Partículas solubles en agua y Hollín, UR tiene un mayor número de partículas que en las otras tres atmósferas. Por otra parte, también se observa que HR es la causa de la variación de ρ para la componente Partículas solubles en agua (Figura 4), mientras que en las otras dos componentes HR no ejerce ninguna influencia sobre ρ .

La disminución de ρ con el aumento de HR (Figura 4) se debe a que la componente Partículas solubles en agua, como era de esperarse, experimenta una mayor disolución con el aumento de HR, disminuyendo la cantidad de éstas que ocupaban el volumen inicial.

De acuerdo con OPAC, para el cálculo del AOD son necesarios los valores de las componentes (Partículas insolubles en agua, Partículas solubles en agua y Hollín) mostradas en la tabla 1S. Como se muestra en la tabla 1S, las componentes Partículas insolubles en agua y Hollín no dependen de HR, mientras que ρ de Partículas solubles en agua, como se mencionó anteriormente, varía en función de esta variable meteorológica.

La figura 5 muestra el comportamiento del AOD en función de ρ de Partículas solubles en agua.

En la figura 5, el AOD de las cuatro atmósferas seleccionadas disminuye con el incremento de ρ . Este comportamiento del AOD, que está influenciado por la componente Partículas solubles en agua, es consecuencia de la disolución de las partículas de aerosol en el agua existente en la atmósfera (en un momento determinado), aumentando la densidad del nuevo compuesto y disminuyendo al mismo tiempo la capacidad de éste para dispersar la radiación solar incidente, como resultado de una mayor absorción de ésta. Por otra parte, UR es la atmósfera que muestra mayores valores de AOD respecto a las otras dos, debido a que ésta es la que contiene mayor número de partículas de las tres componentes (Tabla 1S).

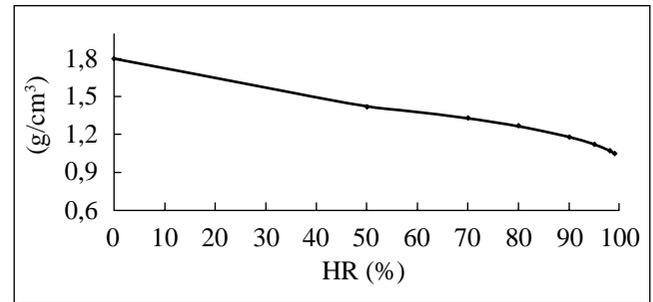


Figura 4. Comportamiento de ρ de la componente Partículas solubles en agua con la variación de HR.

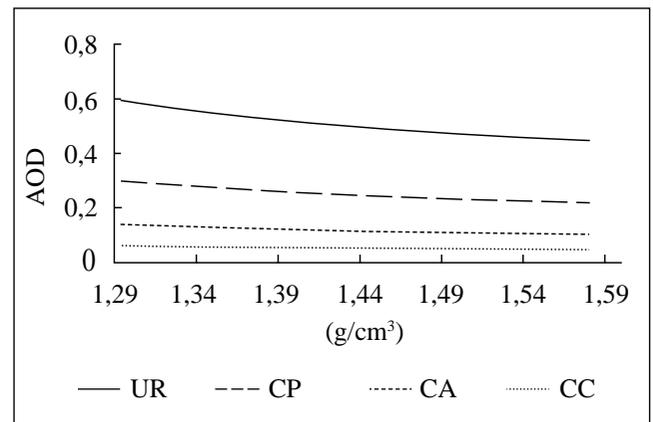


Figura 5. Comportamiento del AOD en función de ρ de la componente Partículas solubles en agua, para las cuatro atmósferas seleccionadas.

Debido a la importancia del AOD en la determinación del coeficiente de dispersión de Mie (ecuaciones (8) y (9)), las transmitancias atmosféricas por dispersión de Mie (ecuación (7)) y absorción de aerosoles (ecuación (10)), a continuación se hace un análisis del comportamiento de estas variables radiativas en los diferentes tipos de atmósferas.

En la figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2572>, la componente Partículas solubles en agua muestra valores más altos del coeficiente δ_λ^M para la atmósfera UR respecto a las otras tres atmósferas. Asimismo, se observa que este coeficiente disminuye con el incremento de ρ , siendo este comportamiento similar al del AOD, débilmente modificado por $\lambda^{-1.3}$ (ecuación (8)). Además y de acuerdo con la figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2573>, se observa que la mayor dispersión de la radiación solar incidente en las cuatro atmósferas seleccionadas se efectúa entre $0,3 \mu\text{m}$ y $1,0 \mu\text{m}$, mientras que para valores $> 1 \mu\text{m}$, δ_λ^M disminuye continuamente a medida que aumenta λ . Este comportamiento de δ_λ^M concuerda con la teoría (Goody y Yung, 1989), siendo UR la atmósfera con mayor capacidad de dispersión por su mayor densidad de partículas.

Para analizar el comportamiento de la transmitancia por dispersión de Mie y puesto que según la ecuación (7) ésta depende de δ_λ^M , coeficiente que a la vez está relacionado con el contenido de vapor de agua en la atmósfera (Figura 1S), es necesario analizar la dependencia entre esta transmitancia y ρ de Partículas solubles en agua, correspondiente a los modelos de las cuatro atmósferas seleccionadas. En la figura 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2574>, se observa que, en las cuatro clases de atmósfera, P_λ^M aumenta con el incremento de ρ entre 1,29 g/cm³ y 1,58 g/cm³, mientras que a partir de 1,58 g/cm³ (16:00 horas) estas dos variables disminuyen. De acuerdo con la ecuación (7), el aumento (6:00 horas a 15:00 horas) y posterior disminución (>16 horas) de P_λ^M se debe en parte al comportamiento mostrado por δ_λ^M (Figura 4S a, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2575>), pero especialmente al aumento abrupto de m_r a partir de las 16:00 horas (Figura 4S b). Este comportamiento abrupto de m_r posiblemente pudo haberse debido a una mayor emisión de gases industriales en la ciudad de Berlín, que eventualmente pudieron ser trasladados a la ciudad de Potsdam por efecto de los vientos, modificando su atmósfera.

De acuerdo con la figura 5S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2576>, y en concordancia con la teoría, P_λ^M es mayor entre 0,3 μm y 1,0 μm , mientras que para $\lambda > 1 \mu\text{m}$ ésta es mucho menor. Además, la atmósfera UR presenta menor transmitancia comparada con las otras tres atmósferas, debido a que la concentración de aerosoles y por ende la extinción de la radiación solar por dispersión por parte de éstos es mayor comparada con la de las otras tres.

Finalmente, en la figura 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2577>, se muestra el comportamiento espectral por absorción de aerosoles en la atmósfera. En esta figura se observa que en las cuatro atmósferas, los aerosoles absorben mayor cantidad de radiación solar entre 0,3 μm y 0,7 aproximadamente, debido a que en este rango espectral y de acuerdo con la ecuación (10), los valores de δ_λ^M son mayores (Figura 2S) que la cantidad $(1 - \omega_{0\lambda})$, representativa de la radiación absorbida por los aerosoles mientras que a partir de 0,7 μm la absorción disminuye.

Puesto que $K_{d\lambda}^M \downarrow$ (ecuación (24)) depende de de la fracción de la radiación solar dispersada por los aerosoles hacia la superficie terrestre, la figura 6 muestra la variación espectral de $K_{d\lambda}^M \downarrow$ calculada para un día y horas particulares (por ejemplo), utilizando los valores de dicha fracción (Figura 2).

En la figura 6 se observa que los valores $K_{d\lambda}^M \downarrow$ para los tres modelos de la fracción de dispersión (ecuación (22), **Bird y Riordan** (1986) y ecuación (23)) son mayores a las 13:00 hora local que a las 6:00 horas, esto debido a la dependencia de esta fracción con el ángulo cenital (Figura 2). En el cálculo de $K_{d\lambda}^M \downarrow$ en el nuevo modelo se utilizó la estimada a partir de $f_\lambda^M(\theta)$ obtenida mediante la ecuación (23).

La otra componente de la radiación solar global, representada por $K_{D\lambda} \downarrow$ fue determinada a partir de las transmitancias espectrales (P_λ^R , P_λ^M , P_λ^a , P_λ^{mg} , $P_\lambda^{H_2O}$ y $P_\lambda^{O_3}$), se muestra en la figura 7S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/610/2578>. En esta figura se confirma el hecho de que $K_{D\lambda} \downarrow$ se extingue en mayor magnitud cuando atraviesa una mayor masa atmosférica (6:00 horas), con respecto a la menor extinción de $K_{D\lambda} \downarrow$ a las 13:00 horas. Espectralmente (Figura 7S), $K_{E\lambda}^* \downarrow$ y $K_{D\lambda} \downarrow$ muestran el típico comportamiento de la radiación solar tanto en el límite superior de la atmósfera (aproximadamente cuerpo negro) como en la superficie terrestre (dispersión y absorción).

Es así como, basándose en la ecuación (25), se compararon inicialmente los valores horarios calculados de $K \downarrow$ con los respectivos valores medidos en Potsdam (**DWD**, 2016) y posteriormente con los resultados obtenidos de la misma variable mediante la aplicación de otros tres modelos seleccionados de la literatura especializada actual (**Yang, et al.** (2006), **Tang, et al.** (2010) y **Dai y Fang** (2014)).

Para examinar la relación entre los $K_\lambda \downarrow$ medidos y calculados con los diferentes modelos, se realizó inicialmente un análisis de regresión estadística (Figura 7), en el cual se utilizó el coeficiente de correlación r para analizar dicha relación. Además, otros criterios estadísticos calculados y utilizados en este análisis fueron rangos y promedios de las diferencias entre los valores medidos y calculados, el error cuadrático medio (ECM) y el número de datos de $K_\lambda \downarrow$ calculados que difieren de los medidos en una cantidad menor al 10 % y al 5% o precisión de la estimación de dicha variable con el nuevo modelo desarrollado (Tabla 1).

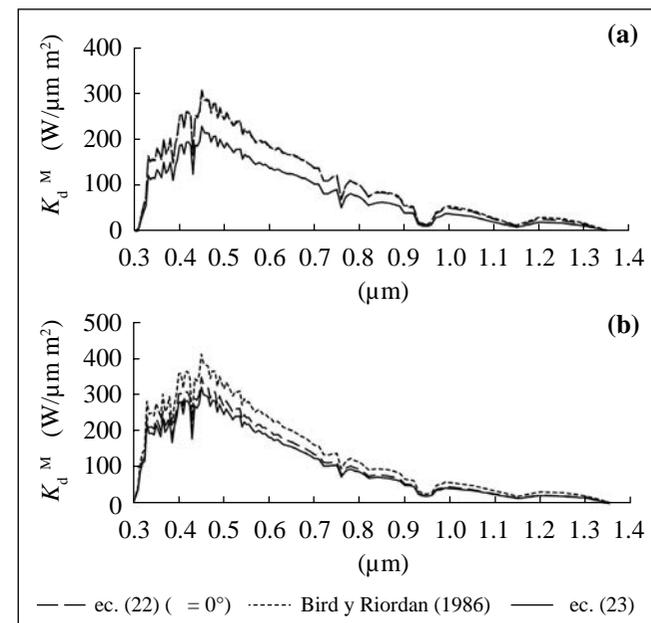


Figura 6. Variación de la radiación solar difusa espectral por dispersión de Mie ($K_{d\lambda}^M \downarrow$) en función de λ , correspondiente al día 25 de julio de 2012 a las (a) 6:00 horas local y (b) 13:00 horas local.

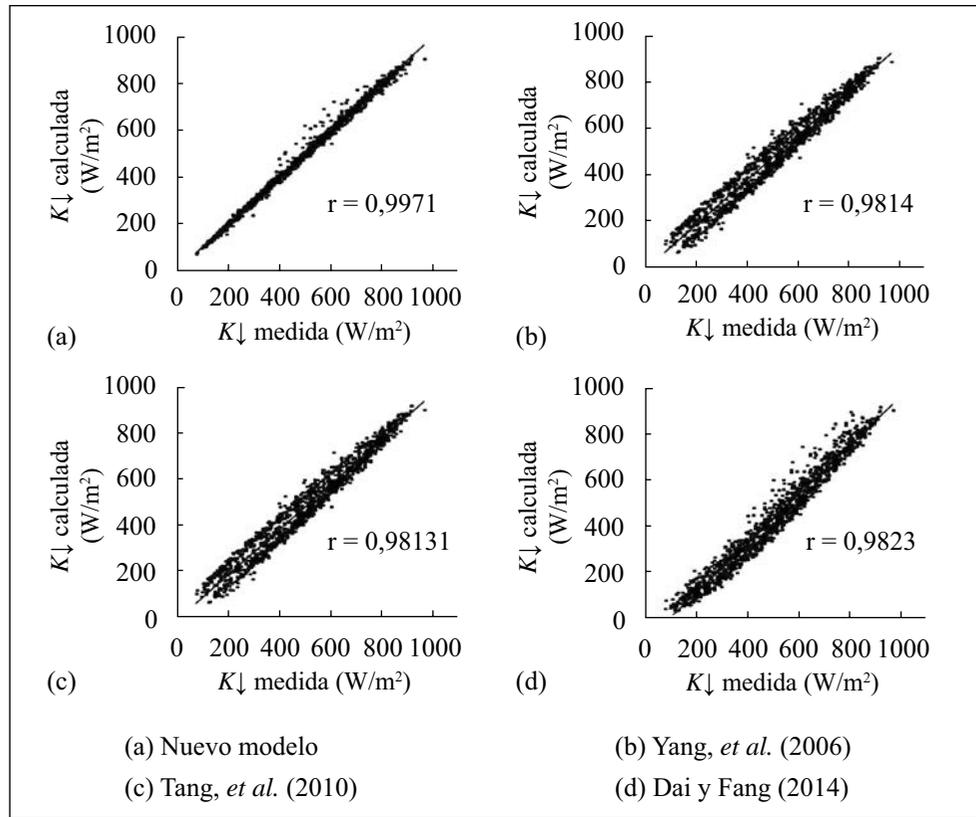


Figura 7. Valores de radiación solar global medida y calculada en la ciudad de Potsdam durante los periodos del 2012 al 2014, correspondientes a una atmósfera despejada.

Tabla 1. Comparación estadística de los datos de $K \downarrow$ calculados con los diferentes modelos (Número total de datos de atmósfera despejada: 1350).

	$K \downarrow$ (nuevo modelo)	$K \downarrow$ (Yang, <i>et al.</i> , 2006)	$K \downarrow$ (Tang, <i>et al.</i> , 2010)	$K \downarrow$ (Dai y Fang, 2014)
Δ (W/m^2)	-124–60	-108–125	-101–126	-133–158
$\bar{\Delta}$ (W/m^2)	-1,42	17,88	22,38	66,05
ECM (W/m^2)	15,75	45,61	43,72	79,14
Número de datos < 10 % de precisión	1329	780	800	497
Número de datos < 5 % de precisión	1265	446	461	274

Δ : rango de las diferencias entre los datos medidos y calculados; $\bar{\Delta}$: promedio de las diferencias entre los valores medidos y calculados.

En la figura 7 se observa que la dispersión de los datos es menor en el nuevo modelo desarrollado, comparado con la de los otros tres modelos, lo que indica que el nuevo modelo presenta un mejor ajuste estadístico, como se demuestra con los correspondientes r . Continuando con el análisis de $K \downarrow$, la tabla 1 muestra el resto de los criterios estadísticos utilizados para su análisis.

En la tabla 1 se observa que los Δ y $\bar{\Delta}$ calculados con el nuevo modelo desarrollado, son menores comparado con los otros tres modelos. Además, al comparar los ECM, se observa que el nuevo modelo tiene el valor más bajo respecto a los demás modelos. Por otra parte, teniendo en

cuenta el número de datos de $K \downarrow$ calculados < 10 % y < 5 % de precisión, el nuevo modelo desarrollado muestra una mayor precisión del cálculo de $K \downarrow$ que los otros modelos.

De acuerdo con el análisis estadístico anterior, el nuevo modelo desarrollado representa con mayor precisión las correspondientes mediciones de $K \downarrow$, comparado con los otros tres modelos seleccionados.

Conclusiones

Al comparar los criterios estadísticos utilizados para el análisis entre los valores de radiación solar global medidas y calculadas por los diferentes modelos, el nuevo modelo

desarrollado presenta un coeficiente de correlación r igual a 0,9971, mientras que los modelos de **Yang, et al.** (2006), **Tang, et al.** (2010) y **Dai y Fang** (2014) presentan coeficientes iguales a 0,9814, 0,9813 y 0,9823, respectivamente. Además, el rango de las diferencias entre los datos medidos y calculados son menores en el nuevo modelo desarrollado comparado con los tres modelos restantes. Por otra parte, el nuevo modelo desarrollado presenta un error cuadrático medio ECM igual a 15,75 W/m², **Yang, et al.** (2006) de 45,61 W/m², **Tang, et al.** (2010) de 43,72 W/m² y **Dai y Fang** (2014) de 79,14 W/m². Por último, el 98 % de los datos de la radiación solar global $K \downarrow$, calculados con el nuevo modelo desarrollado, están por debajo del 10 % de precisión y el 94 % de éstos son menores que el 5 % de precisión, mientras que para los otros tres modelos la concordancia es inferior al 62 % para 10 % y 32 % para 5 % de precisión. Por consiguiente, el nuevo modelo desarrollado permite obtener resultados más precisos de la radiación solar global $K \downarrow$ horaria.

La precisión del cálculo de la radiación solar global, depende estrechamente de una mejor determinación de la radiación solar difusa por dispersión de Mie, la cual se logró introduciendo la variación de la fracción de dispersión $f_{\lambda}^M(\theta)$ con el ángulo de incidencia de la radiación solar θ .

Otras diferencias entre el nuevo modelo desarrollado y los modelos de **Yang, et al.** (2006), **Tang, et al.** (2010) y **Dai y Fang** (2014) fueron que el cálculo de todas las variables radiativas se realizó en forma espectral y que además se incluyó la transmitancia de los aerosoles por absorción.

En el nuevo modelo se consideran todos los procesos de extinción radiativa en la atmósfera, al igual que los efectos de los aerosoles, mezcla de gases, vapor de agua y el ozono, lo que permite realizar cálculos de la radiación solar global horaria de una atmósfera despejada, a partir de la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica, el AOD, el contenido de ozono, mezcla de gases y vapor de agua.

De acuerdo con que el nuevo modelo desarrollado está estructurado teóricamente, es posible utilizarlo en el cálculo horario de la radiación solar global de una atmósfera despejada en cualquier región del mundo, siempre que se disponga de datos de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa y presión atmosférica), radiativas (constante solar espectral, albedo de dispersión simple, factor de asimetría y coeficientes de absorción del O₃, mg y H₂O) y del contenido de ozono de la atmósfera.

Debido a que el contenido de aerosoles atmosféricos sobre la ciudad de Potsdam está influenciado por el de Berlín y la importancia que este tiene sobre la radiación solar incidente, se consideraron cuatro modelos atmosféricos (aerosoles) para el cálculo de la radiación solar global $K \downarrow$, mejorando consecuentemente la precisión en los cálculos de esta variable radiativa.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Trabajo de tesis de maestría de Carlos Giraldo Polo bajo la dirección de Leonardo Gónima Gónima.

Información Suplementaria

Tabla 1S. Descripción de las características de las atmósferas seleccionadas (UR, CP, CA y CC) para diferentes valores de HR (**Hess, et al.**, 1998). Vea la tabla 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2579>

Figura 1S. Comportamiento de δ_{λ}^M en función de ρ de la componente Partículas solubles en agua, para $\lambda = 1 \mu\text{m}$ por ejemplo, correspondiente al día 25 de julio de 2012, entre las 6:00 horas y las 18:00 horas locales. Vea la figura 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2572>

Figura 2S. Comportamiento espectral de δ_{λ}^M : 25 de julio de 2012 a las 6:00 hora local (T = 18.4 °C, HR = 75 %). Vea la figura 2S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2573>

Figura 3S. Variación de P_{λ}^M en función de ρ de la componente Partículas solubles en agua, para $\lambda = 1 \mu\text{m}$ por ejemplo, correspondiente al día 25 de julio de 2012, entre las 6:00 horas y las 18:00 horas locales. Vea la figura 3S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2574>

Figura 4S. Variación temporal de (a) δ_{λ}^M para $\lambda = 1 \mu\text{m}$ (ejemplo) y (b) m , correspondiente al día 25 de julio de 2012, entre las 6:00 horas y las 18:00 horas locales. Atmósfera UR por ejemplo. Vea la figura 4S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2575>

Figura 5S. Comportamiento de la transmitancia atmosférica espectral por dispersión de aerosoles calculada P_{λ}^M : 25 de julio de 2012 a las 6:00 hora local (T = 18.4 °C, HR = 75 %). Vea la figura 5S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2576>

Figura 6S. Variación espectral de la transmitancia atmosférica calculada por la absorción de los aerosoles (P_{λ}^a): 25 de julio de 2012 a las 6:00 hora local (T = 18.4 °C, HR = 75 %). Vea la figura 6S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2577>

Figura 7S. Variación de la radiación solar espectral directa ($K_{D\lambda} \downarrow$) y extraterrestre efectiva ($K_{E\lambda}^* \downarrow$) en función de λ , correspondiente al día 25 de julio de 2012 a las (a) 6:00 hora local (T = 18.4 °C, HR = 75 %) y (b) 13:00 hora local (T = 31,1 °C, HR = 42 %). Vea la figura 7S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/downloadSuppFile/610/2578>

Referencias

Alemania guía de vivienda. (2016). Disponible en <https://www.justlanded.com/espanol/Alemania/Guia-Alemania/Alojamiento/Vivienda>, accedida en marzo de 2016.

- Ångström, A.** (1924). Solar and terrestrial radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. **50**: 121-126.
- Ångström, A.** (1961). Techniques of determining the turbidity of the atmosphere. *Tellus*, **13**: 214-223.
- Bird, R., Riordan, C.** (1986). Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres. *J. Climate Appl. Meteor.* **25**: 87-97.
- Brine, D., Iqbal, M.** (1983). Diffuse and global solar spectral irradiance under cloudless skies. *Solar Energy*, **30**: 447-453.
- Dai, Q., Fang, X.** (2014). A simple model to predict solar radiation under clear sky conditions. *Advances in Space Research*. **53**: 1239-1245.
- Fröhlich, C., London, J.** (1986). Revised instruction manual on radiation instruments and measurements. Ginebra, Suiza: WCRP Publications.
- Gónima, L.** (1993). Simple algorithm for the atmospheric correction of reflectance images. *International Journal of Remote Sensing*. **14**: 1179, 1187.
- Goody, R. M., Yung, Y. L.** (1989). *Atmospheric Radiation: theoretical basis*. New York, USA: Oxford University Press.
- Hess, M., Koepke, P. Schult, I.** (1998). Optical properties of aerosols and clouds: the software package OPAC. *American Meteorological Society*. **79**: 831-844.
- Iqbal, M.** (1983). *An introduction to solar radiation*. Toronto, Canada: Academic Press.
- Irvine, W.** (1963). The asymmetry of the scattering diagram of a spherical particle. *Astronomical Institutes of The Netherland*. **17**: 176-184.
- Janjai, S., Nunez, M., Prathumsit, L., Wattam, R., Sabooding, R.** (2013). A semi-empirical approach for the estimation of global, direct and diffuse illuminance under clear sky condition in the tropics. *Energy and Buildings*. **66**: 177-182.
- Justus, C., Paris, M.** (1985). A model for solar spectral irradiance and radiance at the bottom and top of a cloudless atmosphere. *Journal of Climate and Applied Meteorology*. **24**: 193-205.
- Kasten, F.** (1965). A new table and approximation formula for the relative optical air mass. *Theoretical and Applied Climatology*. **14**: 206-223.
- Leckner, B.** (1978). The spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface elements of a model. *Solar Energy*. **20**: 143-150.
- Lopez, G., Batlles, F., Tovar, J.** (2007). A new simple parameterization of daily clear-sky global solar radiation including horizon effects. *Energy Conversion and Management*. **48**: 226-233.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA).** (2015). *Ozone & Air Quality*. Disponible en: <ftp://toms.gsfc.nasa.gov/pub/omi/data/ozone/> accedida en noviembre de 2015.
- Optical Properties of Aerosols and Clouds (OPAC).** 2016. Fecha de consulta: Entre junio y diciembre de 2016. Disponible en: <http://andromeda.caf.dlr.de/data-products/spectroscopy-data/optical-properties-aerosols-and-clouds-opac>.
- Pacheco, A., Carvalho, A., Aki, A., Morgan, E., Terra, F., Evaldo, A., Almeida, A.** (2017). Global radiation by simplified models for the state of Mato Grosso, Brazil. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. **52**: 215-227.
- Pelkowski, J.** (2009). A physical rationale for generalized Ångström-Prescott regression. *Solar Energy*. **83**: 955-963.
- Prescott, J.** (1940). Evaporation from water surface in relation to solar radiation. *Transactions of the Royal Society of South Australia*. **64**: 114-118.
- Russell, P., Bergstrom, R., Shinozuka, Y. Clarke, A., Decarlo, P., Jimenez, J., Livingston, J., Redemann, J., Dubovik, O., Strawa, A.** (2010). Absorption Ångström Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*. **10**: 1155-1169.
- Servicio Meteorológico Alemán.** (2016). Disponible en <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>, accedida entre enero de y junio de 2016.
- Tang, W., Yang, K. He, J. Qin, J.** (2010). Quality control and estimation of global solar radiation in China. *Solar Energy*. **84**: 466-475.
- Yang, K., Huang, G., Tamai, N.** (2001). A hybrid model for estimating global solar radiation. *Solar Energy*. **70**: 13-22.
- Yang, K., Koike, T., Ye, B.** (2006). Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*. **137**: 43-55.
- World Climate Programme (WCP).** (1986). A preliminary cloudless standard atmosphere. WCP-No. 112.

Mariano Ospina Hernández

1927-2018



El 12 de marzo falleció Mariano Ospina Hernández, miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Mariano Ospina se graduó en MIT como ingeniero civil, luego obtuvo en Harvard un SBA en Planeación urbana y regional y un Master (Graduate School of Design). Además obtuvo un doctorado *Honoris Causa* en biología marina de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

Durante su larga vida el doctor Ospina se interesó tanto por la ingeniería y la política como por la botánica, la educación y la investigación. Colombia y su medio ambiente fueron el centro de sus actividades bien en el Congreso de la República como en la Fundación Mariano Ospina Pérez, creada por él.

Como ingeniero Mariano Ospina publicó varios estudios acerca de urbanismo y planificación regional y diseñó diversas soluciones para establecer sistemas de integración fluvial en Suramérica.

En sus labores políticas Ospina fue uno de los congresistas que apoyaron la ley que permitió la redacción y emisión del Código de protección al ambiente y elaboró el estudio que motivó la creación del Parque Nacional Las Orquídeas.

Desde la Fundación Mariano Ospina publicó catorce estudios fundamentales acerca de las orquídeas en Colombia y en América Latina, estableció uno de los pocos premios anuales que reciben los investigadores de la actividad agrícola en Colombia, creó un jardín botánico de especies andinas y se encontraba en los últimos años de su vida empeñado en organizar en la sabana de Bogotá, con el apoyo de MIT y de Harvard, un instituto de estudios superiores que debía incluir un centro de investigación guiado por el concepto de biología ambiental.

Julio Carrizosa Umaña

Miembro Honorario

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

www.accefyn.com

<http://www.fundmarianoospinaperez.org>

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.

