



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. 43 • Número 168 • Págs. 343-592 • Julio-Septiembre de 2019 • 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. 43 • Número 168 • Págs. 343-592 • Julio-Septiembre de 2019 • Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora

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

Editores asociados

Ciencias Biomédicas

- Luis Fernando García, M.D., M.Sc.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
- Gustavo Adolfo Vallejo, Ph. D.
Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia
- Luis Caraballo, Ph. D.
Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia
- Juanita Ángel, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Manuel Franco, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Alberto Gómez, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- John Mario González, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Gloria Patricia Cardona Gómez, B.Sc., Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias del Comportamiento

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

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

Ciencias Físicas

- Pedro Fernández de Córdoba, Ph. D.
Universidad Politécnica de Valencia, España
- Diógenes Campos Romero, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- Román Eduardo Castañeda, Dr. rer. nat.
Universidad Nacional, Medellín, Colombia
- María Elena Gómez, Doctor
Universidad del Valle, Cali
- Gabriel Téllez, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Jairo Roa-Rojas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- Ángela Stella Camacho Beltrán, Dr. rer. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- Edgar González, Ph. D.
Pontificia Universidad Javeriana,
Bogotá, Colombia
- Guillermo González, Ph. D.
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia

Ciencias Naturales

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

Ciencias Químicas

- 15 Sonia Moreno Guaqueta, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- Moisés Wasserman Lerner, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- 15 Myriam Sánchez de Gómez, M.Sc.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- 15 Fernando Martínez, Docteur en Chimie
Universidad Industrial de Santander,
Bucaramanga, Colombia
- 15 Luis Fernando Echeverry, Ph. D.
Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Ciencias de la tierra

- 15 Carlos Alberto Vargas, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia
- 15 Carlos Alberto Jaramillo Muñoz, Ph. D.
Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá
- 15 José Daniel Pabón, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, Colombia

Matemáticas

- Jorge Ivan Cossio Betancur, Ph. D.
Universidad Nacional de Colombia,
Medellín, Colombia
- 15 Luis Español González, Doctor
Universidad de la Rioja, España
- Jaime Ignacio Lesmes Camacho, Dr. phil. nat.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
- 15 Luis Carlos Arboleda, Doctor
Universidad del Valle, Cali, Colombia
- 15 Alf Onshuus, Ph. D.
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

- | | | |
|---|---|---|
| 15 Ángela María Guzmán, Ph. D.
University of Central Florida,
Orlando, Estados Unidos | 15 Carlos Jiménez, Ph. D.
Universidad de La Coruña, España | 15 José Rubens Pirani, Ph. D.
Universidade de São Paulo, Brasil |
| 15 Antoine M. Cleef, Ph. D.
University of Amsterdam,
The Netherlands | Gioconda San Blas, Ph. D.
Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas
y Naturales, Caracas, Venezuela | 15 Wolfgang Gieren, Ph. D.
Universidad de Concepción, Chile |
| Rodolfo Castillo, Ph. D.
Fort Lauderdale, Florida, USA | 15 Alfonso Castro, Ph. D.
Harvey Mudd College, Claremont, CA,
USA | 15 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

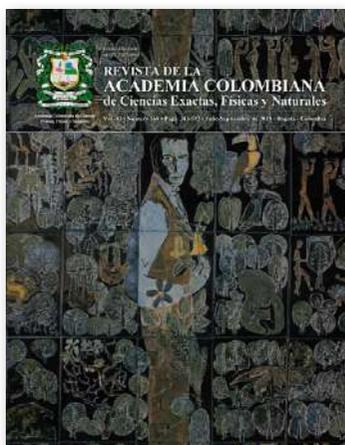
Esta publicación se ha financiado mediante la transferencia de recursos del Gobierno Nacional a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

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



Nuestra portada

Leopoldo Richter (1976). Esmalte sobre baldosa cerámica (detalle).

El entomólogo alemán Leopoldo Richter (1896-1984) es autor de una de las obras artísticas más relevantes del siglo XX en Colombia. Su origen alemán, su disciplina científica, su calidad estética, sus viajes a las profundidades de las selvas colombianas, y su rigor y sensibilidad, lo proyectaron a la escena cultural del país que visitó Alexander von Humboldt a comienzos de siglo XIX. Esta imagen fue elaborada en Bogotá en 1976, y sintetiza dos ejes de emancipación: el del libertador político y militar, Simón Bolívar, y el del potenciador científico y artístico, Alexander von Humboldt.

La obra se encuentra hoy instalada frente a la entrada de la Biblioteca Otto G. Richter de la Universidad de Miami, Florida, Estados Unidos.

Tomado de Gómez Gutiérrez, Alberto. *Humboldtiana neogranadina*. Bogotá: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2018, tomo IV, pp. 92-93





Academia Colombiana de Ciencias
Exactas, Físicas y Naturales

ISSN 0370-3908
eISSN 2382-4980

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

Vol. 43 • Número 168 • Págs. 343-592 • Julio-Septiembre de 2019 • Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

Editorial	Alexander von Humboldt en la Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales Alexander von Humboldt in the journal of <i>Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales</i> <i>Alberto Gómez Gutiérrez</i> 349
Ciencias Biomédicas Biomedical Sciences	Filogenia y oncogénesis del virus del papiloma humano: una aproximación translacional al descubrimiento de biomarcadores para la detección de lesiones precancerosas de cérvix AP Phylogeny and oncogenicity of the human papillomavirus: A translational approach for the discovery of biomarkers for the detection of precancerous lesions of the cervix <i>Arianis Tatiana Ramírez-Pineda, Martha Isabel González, Kelly Melisa Castañeda-Vanegas, María Cecilia Agudelo-Fernández, Carolina López-Urán, Gloria Inés Sánchez-Vásquez</i> 351
Ciencias Físicas Physical Sciences	Efecto del contenido de Ni en las propiedades ópticas y eléctricas de recubrimientos ZrTiSiNiN depositados por co-sputtering AO Effect of Ni content on the optical and electrical properties of ZrTiSiNiN thin films deposited by co-sputtering <i>Gina Milena Prieto-Novoa, Estrella Natali Borja-Goyeneche, Jhon Jairo Olaya-Florez</i> 366
	Efectos de la temperatura en la resonancia ferromagnética: estudio comparativo para diferentes materiales AO Effects of temperature on the ferromagnetic resonance of particles: Comparative study for different materials <i>Carlos A. Mercado, Jorge A. Otalora, Omar J. Suarez</i> 375
	Humboldt y el rayo del Catatumbo: ¿mito o realidad? E Humboldt and the Catatumbo's Lightning <i>Horacio Torres-Sánchez</i> 382
Ciencias Naturales Natural Sciences Alexander von Humboldt	Alexander von Humboldt Geografía de las plantas. Cuadro físico de las regiones equinoxiales. VIII (29): 65-103, 1953 Geography of plants. <i>Tableau physique</i> of equinoxial regions. VIII (29): 65-103, 1953 388

**Ciencias
Naturales**

Natural Sciences

**Alexander von
Humboldt**

Armando Dugand El primer arribo de Humboldt a la Nueva Granada. IX (35): 210-213, 1954 Humboldt's first arrival to New Granada. IX (35): 210-213, 1954	427
Alexander von Humboldt Elogio de Humboldt a la obra de Codazzi X (41): xxxiv, 1959 Humboldt's praise of Codazzi's work. X (41): xxxiv, 1959	431
Abel Naranjo Villegas Humboldt y las ciencias naturales. X (41): xxxvi-xxxix, 1959 Humboldt and the natural sciences. X (41): xxxvi-xxxix, 1959	433
Siegfried Striegel Evocación del barón Alexander von Humboldt. X (41): xli-xliv, 1959 Evocation of Baron Alexander von Humboldt. X (41): xli-xliv, 1959	439
Ernesto Guhl Humboldt y nosotros. X (41): xlv-xlviii, 1959 Humboldt and us. X (41): xlv-xlviii, 1959	443
Guillermo Hernández de Alba Humboldt y Mutis. X (41): l-lvii, 1959 Humboldt and Mutis. X (41): l-lvii, 1959	447
Jorge Arias de Greiff El diario inédito de Humboldt. XIII (51): 393-398, 1969 Humboldt's unpublished diary. XIII (51): 393-398, 1969	456
Jorge Arias de Greiff El mapa de Humboldt del río Magdalena. XIII (51): 399-402, 1969 Humboldt's map of the Magdalena river. XIII (51): 399-402, 1969	470
Imaginario de naturaleza y el futuro de la biodiversidad AP Nature imaginaries and the future of biodiversity <i>Luis Germán Naranjo</i>	480
Estudio, curaduría y nuevos registros de odonatos presentes en la colección del Museo de La Salle Study, curation and new records of odonates present in the collection of the Museum of La Salle AO <i>José A. Cuéllar-Cardozo, María Fernanda Lozano-Bernal, José-Warles Díaz-Guamán</i>	489
Viabilidad y germinación <i>in vitro</i> de taxones de las tribus Cymbidieae y Epidendreae (subfamilia Epidendroideae, Orchidaceae) AO Viability and <i>in vitro</i> germination of taxa from Cymbidieae and Epidendreae tribes (subfamily Epidendroideae, Orchidaceae) <i>Adriana Paola Bonilla-Sánchez, Hilda Rocío Mosquera-Mosquera</i>	494
Descripción, ampliación y nuevo registro de distribución para <i>Dendropsophus manonegra</i> (Rivera & Orrico, 2013) y <i>Dendropsophus sarayacuensis</i> (Shreve, 1935) (Amphibia: Anura: Hylidae) en el piedemonte andino-amazónico del departamento de Caquetá, Colombia AO Description, extension, and new distribution register for <i>Dendropsophus manonegra</i> (Rivera & Orrico, 2013) and <i>Dendropsophus sarayacuensis</i> (Shreve, 1935) (Amphibia: Anura: Hylidae) in the Andean-Amazon piedmont region in the department of Caquetá - Colombia <i>Alejandro Navarro-Morales, Diego Huseth Ruiz-Valderrama</i>	502

**Ciencias
Naturales**

Natural Sciences

**Ciencias
Naturales**
Natural Sciences

**Riqueza florística y estructura de la vegetación acuática y terrestre en el humedal
El Salitre, Bogotá, Colombia** **AO**

Floristic richness and structure of aquatic and terrestrial vegetation in El Salitre wetland,
Bogotá, Colombia

Diego Mauricio Cabrera Amaya, José Wilfredo López Cruz 508

First records of *Theobroma speciosum* fruits dispersion **BC**

Primer registro de la dispersión de frutos de *Theobroma speciosum*

Lucinéia Barbosa1, Isadora França, Emil José Hernández Ruz 518

**Butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea) of Montes de María sub-region: Preliminary list
of species from El Carmen de Bolívar (Bolívar, Colombia)** **BC**

Mariposas (Lepidoptera: Papilionoidea) de la sub-región de Montes de María: lista preliminar
de especies de El Carmen de Bolívar (Bolívar, Colombia)

Daniela Ahumada-C., Alejandro Segovia-Paccini, Gabriel R. Navas-S. 521

**Ciencias
Químicas**
Chemical Sciences

Los 5-aminopirazoles como bloque de construcción de compuestos heterocíclicos fusionados **AP**

5-Aminopyrazoles as a building block for fused heterocyclic compounds

Jairo Quiroga Puello 531

**Producción de alcohol cinámico a partir de la hidrogenación selectiva de cinamaldehído
usando catalizadores de oro soportados en óxidos metálicos** **AP**

Cinnamyl alcohol production from selective hydrogenation of cinamaldehyde using golden
catalysts supported on metallic oxides

Hugo Alfonso Rojas, José Jobanny Martínez, María Helena Brijaldo, Fabio Passos 539

**Ciencias
de la Tierra**
Earth Sciences

**Las plantas como fuente de compuestos fotoprotectores frente al daño en el ADN
producido por la radiación ultravioleta** **AP**

Plants as a source of photoprotective compounds against ultraviolet radiation-induced DNA damage

Jorge Luis Fuentes Lorenzo 550

Matemáticas
Mathematics

Una convolución muy útil y unas derivadas ilustres **AP**

A very useful convolution and some illustrious derivatives

Carlos E. Mejía 563

Comentario bibliográfico 572

Vida de la Academia 578

Enfoque y alcance

Focus and Scope 581

AP **IA** Artículo de posesión / Inaugural article **AO** **OA** Artículo original / Original article

BC **CB** Comunicación breve / Brief communication **E** Ensayo / Essay

Alexander von Humboldt en la *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*.

Para conmemorar el 250 aniversario del nacimiento de Alexander von Humboldt, nuestra revista ha querido entregar a sus lectores la antología de textos relativos a este científico que han sido publicados en sus páginas desde su fundación en la primera mitad del siglo XX. Como se verá, Humboldt fue incluido y referido en un total de once (11) artículos en el periodo que va de 1953 a 1969, dos de los cuales fueron ya publicados en edición facsimilar en el suplemento dedicado a Francisco José de Caldas en el volumen 42 de 2018, por estar asociados al homenajeado en esa oportunidad. Estos dos artículos fueron escritos por Alfredo Bateman y Enrique Pérez Arbeláez, con los títulos “Caldas y Humboldt” y “La ciencia y la historia: el caso de Caldas-Humboldt”, respectivamente.

De los nueve artículos restantes, dos corresponden a producciones propias de Humboldt, “Geografía de las plantas. Cuadro físico de las regiones equinoxiales” y “Elogio [...] a Codazzi”, dos a reflexiones de Jorge Arias de Greiff, “El diario inédito de Humboldt” y “El mapa de Humboldt del río Magdalena”, y uno a cada uno de los siguientes autores, en orden cronológico: Armando Dugand, “El primer arribo de Humboldt a la Nueva Granada”; Abel Naranjo Villegas, “Humboldt y las ciencias naturales”; Siegfried Striegel, “Evocación del barón Alexander von Humboldt”; Ernesto Guhl Nimitz, “Humboldt y nosotros”; Guillermo Hernández de Alba, “Humboldt y Mutis”.

Además de estas producciones, la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales publicó en 1982 una edición bilingüe preparada en conjunto con la Academia de Ciencias alemana, la cual contenía una compilación de extractos de los diarios del viaje americano de Humboldt en lo que tenía que ver con el territorio colombiano, bajo el título: *Alexander von Humboldt in Kolumbien. Auswahl aus seinen Tagebüchern / Alexander von Humboldt en Colombia. Extractos de sus diarios*. En esta participó también el profesor Jorge Arias de Greiff, quien viajó a Berlín para revisar personalmente los documentos fuente que conservaba la Academia de Ciencias de la entonces República Democrática Alemana.

El primero de los artículos de la presente antología, tanto en orden cronológico como en el de su extensión e importancia, corresponde a la transcripción de la *Geografía de las plantas* manuscrita por Humboldt en francés. Esta fue remitida por el prusiano a José Celestino Mutis en febrero de 1803 desde Guayaquil, en medio de su periplo americano. Esta remisión se hizo a través del Marqués de Selva Alegre y de Francisco José de Caldas, radicado en esos días en Quito. Una vez recibida por Mutis en Santafé, el gaditano solicitó a Jorge Tadeo Lozano su traducción al español, y esta es la única fuente primaria que se conserva hoy del manuscrito príncipes humboldtiano que fue acompañado por una acuarela también manuscrita por Humboldt en francés, centrada en el Chimborazo, con el título “Geographie des plantes près de l'Equateur. Tableau physique des Andes et pays voisins fondé sur les observations et mesures faites sur les lieux en 1799-1803” [Geografía de las plantas cerca al Ecuador. Cuadro físico de los Andes y regiones vecinas fundado en las observaciones y medidas hechas en estos lugares]. Esta acuarela se conserva hoy en el Museo Nacional de Colombia en Bogotá.

La primera lectura pública de este texto fue presentada por el propio Alexander von Humboldt a su regreso a Europa el 7 de enero de 1805 en el Institut de France en París, y fue luego impresa en la casa Levrault, Schoell et Compagnie en 1807, bajo el título *Essai sur la géographie des plantes: accompagné d'un tableau physique des régions équinoxiales, fondé sur des mesures exécutées, depuis le dixième degré de latitude boréale jusqu'au dixième degré de latitude australe, pendant les années 1799, 1800, 1801, 1802 et 1803*. Esta primera impresión parisina incluía el “Tableau physique des Andes et pays voisins”, síntesis gráfica lograda por Humboldt después de atravesar las cordilleras neogranadinas.

También en 1807, la imprenta de la familia Cotta en Tübingen publicó esta misma obra en versión alemana bajo el título *Ideen zu einer Geographie der Pflanzen* incluyendo el “Tableau physique” grabado que Humboldt tituló en su lengua materna como “Naturgemälde der Tropenländer, auf Beobachtungen und Messungen gegründet, welche vom 10ten Grade nördlicher bis zum 10ten Grade südlicher breite, in den Jahren 1799, 1800, 1801, 1802 und 1803” [Cuadro de la naturaleza de las tierras tropicales, según las observaciones y mediciones tomadas en esos lugares, desde el 10º grado de latitud boreal hasta el 10º grado de latitud austral en los años 1799, 1800, 1801, 1802 y 1803].

La edición de París incluyó el texto central titulado “Essai sur la géographie des plantes” (1807, 13-35) seguido del [Cuadro físico de las regiones ecuatoriales] (1807, 37-145) con los complementos de la [Tabla de las alturas] (1807, 147-152), de algunas [Adiciones a la geografía de las plantas] (1807, 153-155) y del grabado a color del [Cuadro físico de los Andes y de

los países vecinos levantado a partir de las observaciones y de las mediciones tomadas en estos lugares desde el grado 10 de latitud boreal hasta el (grado) 10 de latitud austral en 1799, 1800, 1801, 1802 y 1803] (1807, 156, desplegable), y se abrió con el [Prefacio] firmado por Alex[andre] de Humboldt [en Roma, en julio de 1805].

Más de 177 años después, en 1985, el profesor Ernesto Guhl Nimitz (1915-2000), radicado en Colombia desde mediados del siglo XX, publicó para el Jardín Botánico de Bogotá la traducción de la versión alemana del año 1807,¹ haciendo énfasis en la palabra “*Ideen*” [Ideas]: “la recolección y ordenación de los objetos era secundaria”, decía Guhl. “En primer lugar, estaba el pensar sobre el causalismo de los fenómenos y la consecuencia de estos. La esencia de las *ideas* para una geografía de las plantas de Humboldt está precisamente en la inquietud espiritual del *por qué y para qué*, a lo cual responde la filosofía de la naturaleza, pero no el objeto natural en sí”.²

Los artículos restantes, presentados a continuación,³ podrán revelar qué tanto se acercaron sus autores a este precepto.

Alexander von Humboldt

Geografía de las plantas. Cuadro físico de las regiones equinoxiales. VIII (29): 65-103, 1953

Armando Dugand

El primer arribo de Humboldt a la Nueva Granada. IX (35): 210-213, 1954

Alexander von Humboldt

Elogio de Humboldt a la obra de Codazzi. X (41): xxxiv, 1959

Abel Naranjo Villegas

Humboldt y las ciencias naturales. X (41): xxxvi-xxxix, 1959

Siegfried Striegel

Evocación del barón Alexander von Humboldt. X (41): xli-xliv, 1959

Ernesto Guhl

Humboldt y nosotros. X (41): xlv-xlvi, 1959

Guillermo Hernández de Alba

Humboldt y Mutis. X (41): l-lvii, 1959

Alfredo Bateman

Caldas y Humboldt. X (41): lx-lxvii, 1959 (véase XLII (Suplemento): 129-137, 2016)

Enrique Pérez Arbeláez

La ciencia y la historia: el caso de Caldas-Humboldt. X (41): lxx-lxxii, 1959 (véase XLII (Suplemento): 138-141, 2016)

Jorge Arias de Greiff

El diario inédito de Humboldt. XIII (51): 393-398, 1969

Jorge Arias de Greiff

El mapa de Humboldt del río Magdalena. XIII (51): 399-402, 1969

Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS

Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Editor asociado en Ciencias Biomédicas, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*

¹ Humboldt, Alejandro de [1807] 1985. *Ideas para una geografía de las plantas*. Traducido por Ernesto Guhl. Bogotá: Jardín Botánico José Celestino Mutis.

² Véase: <http://babel.banrepcultural.org/cdm/ref/collection/p17054coll10/id/2406> (p. 9).

³ Los títulos de los artículos ya publicados en 2018 se incluyen en cursivas.

Filogenia y oncogénesis del virus del papiloma humano: una aproximación translacional al descubrimiento de biomarcadores para la detección de lesiones precancerosas de cérvix

● Arianis Tatiana Ramírez-Pineda¹, ● Martha Isabel González¹, ● Kelly Melisa Castañeda-Vanegas¹,
● María Cecilia Agudelo-Fernández¹, ● Carolina López-Urán², ● Gloria Inés Sánchez-Vásquez^{1,*}

¹Grupo de Infección y Cáncer, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

²Departamento de Patología, Facultad de Medicina, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 23 de julio del 2019

Resumen

El cáncer cervical es la principal causa de mortalidad entre las mujeres en poblaciones con índice de desarrollo humano bajo y medio. La infección con 14 de los genotipos del virus del papiloma humano de alto riesgo (VPH-AR) es la causa principal de este cáncer. Las vacunas profilácticas previenen esta infección si se aplican antes del inicio de la actividad sexual. Las mujeres que no han sido vacunadas deben someterse a tamización con la prueba de VPH-AR, y recibir el diagnóstico histopatológico y el tratamiento oportunos. Cerca del 20 % de las mujeres son positivas para el VPH-AR, pero muy pocas presentan lesiones potencialmente malignas. Las mujeres infectadas con los genotipos VPH16 o 18 o aquellas con ascendencia europea infectadas con variantes de origen nativo americano del VPH 16 tienen mayor riesgo de cáncer. También aquellas con historia de uso de anticonceptivos hormonales y de tabaquismo. Estos factores parecen contribuir a un aumento de la expresión de las oncoproteínas E6 y E7 del VPH-AR, lo que conduce a la desregulación del control del ciclo celular y, finalmente, al cáncer. En el presente estudio se pasa revista al estado del arte de los mecanismos carcinogénicos del VPH-AR haciendo énfasis en el papel de las proteínas E6 y E7 y se presentan los resultados de la genotipificación del VPH16 o 18, la tasa de positividad de las proteínas p16 y ki67 y la evaluación bioinformática de la expresión aberrante de los miARN y su correlación con el grado de la lesión cervicouterina, datos que contribuyen a validar el potencial clínico de estos biomarcadores para la detección de lesiones potencialmente malignas de cérvix.

Palabras clave: Virus del papiloma humano; Variantes virales; Filogenética; Cáncer cervical; Biomarcadores; Prevención secundaria.

Phylogeny and oncogenicity of the human papillomavirus: A translational approach for the discovery of biomarkers for the detection of precancerous lesions of the cervix

Abstract

Cervical cancer is the main cause of mortality among women in populations with low and medium human development index. The infection with 14 genotypes of the high-risk human papillomavirus (HR-HPV) is the main cause of this cancer. Prophylactic vaccines prevent this infection if they are applied before the onset of sexual activity. Unvaccinated women should be screened with the HR-HPV test and receive the histopathological diagnosis and timely treatment. About 20% of women are HR-HPV positive, but very few have potentially malignant lesions. Women infected with HPV16 or 18 genotypes or women with European ancestry infected with Native American variants of HPV 16 have a higher risk of cancer. Also, those with a history of use of hormonal contraceptives and cigarette smoking. These factors seem to contribute to an increase in the expression of the HR-HPV oncoproteins E6 and E7, which leads to the deregulation of cell cycle control and finally to cancer. We present here the state of the art of the carcinogenic mechanisms of HPV-AR emphasizing the role of the E6 and E7 proteins, as well as the results of our study on the HPV16 or 18 genotyping, the positivity rate of the p16 and ki67 proteins, and the bioinformatic evaluation of the aberrant expression of miRNAs and their correlation with the degree of cervical lesions. These data contribute to validate the clinical potential of these biomarkers for the detection of potentially malignant lesions of the cervix.

Key words: Human papillomavirus; Viral variants; Phylogenetic; Cervical cancer; Biomarkers; Secondary prevention.

*Correspondencia:

Gloria Inés Sánchez-Vásquez; sanchezg@une.net.co, **Recibido:** 15 de noviembre de 2018, **Aceptado:** 11 de marzo de 2019, **Editor:** Juana Ángel

Introducción

El cáncer cervical es una neoplasia maligna que se produce a partir de la alteración de las células del cérvix. El cérvix es el único órgano del aparato genital femenino que está conformado por dos tipos de epitelio: el exocervical, que es plano, y el endocervical, cilíndrico y mucosecretor. El sitio de unión de estos dos epitelios se llama unión escamocolumnar o zona de transformación, y su localización varía durante la vida de la mujer debido a los cambios metaplásicos en el epitelio cervical, los cuales ocurren después de la pubertad y durante el embarazo. La metaplasia es el nombre dado al proceso por el cual un tipo de epitelio completamente diferenciado se transforma en otro, lo que en el cuello uterino implica la transformación del epitelio endocervical en un epitelio escamoso. Este fenómeno fisiológico predispone a dichas células al desarrollo de cáncer por la acción de la infección por el virus del papiloma humano de alto riesgo (VPH-AR) (Herfs, *et al.*, 2012). Los dos tipos histológicos principales de cáncer de cuello uterino reconocidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) son el escamocelular y el adenocarcinoma, originados en las células del exocérvix y el endocérvix, respectivamente. El primero constituye cerca de 80 a 85 % de todos los casos, mientras que el adenocarcinoma constituye entre 10 y 12 % (Eroschenko, 2008).

La infección por el VPH se adquiere con el inicio de las relaciones sexuales; en la gran mayoría de los casos (70 %, aproximadamente) se presenta una infección autocontrolada que se resuelve en un plazo de 18 meses (Rodríguez, *et al.*, 2008). Ocasionalmente, dicha infección puede inducir una lesión intraepitelial de bajo grado (NIC1); sin embargo, estas lesiones regresan espontáneamente en la mayoría de los casos. Cuando el virus no se elimina y persiste la infección por VPH-AR, la lesión precursora se mantiene y entre un 5 y un 10 % de estas lesiones puede progresar hasta convertirse en una lesión intraepitelial de alto grado, o mayor (neoplasia intraepitelial cervical de grado 2 o NIC2+), que si no es tratada a tiempo, progresa a cáncer (Rodríguez, *et al.*, 2008).

Carga de la enfermedad. El cáncer cervical es la cuarta causa más frecuente de cáncer entre las mujeres alrededor del mundo, y la primera en muchos países con un índice de desarrollo humano bajo o medio, donde ocurre cerca del 80 % de los casos y muertes reportadas anualmente (Bray, *et al.*, 2018). En el 2018, el *Global Cancer Observatory* (GLOBOCAN) estimó en 570.000 los nuevos casos y en 311.000 las muertes, con una tasa de incidencia y mortalidad estandarizada por edad de 13,1 y 6,9 por cada 100.000 mujeres, respectivamente (Bray, *et al.*, 2018). En los países de menor índice de desarrollo humano este cáncer ocupa el segundo lugar en incidencia después del cáncer de mama y el primero en mortalidad. En 28 países es el cáncer que se diagnóstica con más frecuencia, y en otros 42 es la primera causa de muerte. La gran mayoría de estos países están ubicados en África y Asia. En América Latina y el Caribe este

cáncer ocupa la tercera posición entre los cánceres que se presentan entre las mujeres; en el 2018 se reportaron 56.186 casos nuevos y 28.318 muertes, con una tasa de incidencia y mortalidad estandarizada por edad de 14,6 y 7,1 por cada 100.000 mujeres, respectivamente. En Colombia ocupa la cuarta posición entre los cánceres que se presentan en las mujeres, con un total de 3.900 casos nuevos y 1.800 muertes en ese mismo año, y una tasa de incidencia y mortalidad ajustadas por edad de 12,7 y 5,7, respectivamente (Bray, *et al.*, 2018).

La inequidad contribuye enormemente a que las mujeres desarrollen cáncer de cérvix y representa el mayor desafío para la salud de aquellas que viven en estas regiones.

Caracterización clínica de las lesiones potencialmente malignas del cuello uterino. El desarrollo del cáncer de cuello uterino se manifiesta inicialmente a la manera de lesiones precursoras conocidas como neoplasia intraepitelial cervical, habitualmente de evolución lenta y progresiva, generalmente en estadios. Convencionalmente, los estadios se denominan NIC1, NIC2 y NIC3, según la cantidad de epitelio cervical que se encuentre comprometido (Figura 1). Microscópicamente, la evolución de la lesión se caracteriza por la proliferación de las células epiteliales que progresivamente invaden el espesor del epitelio. Conforme se incrementa la gravedad de la neoplasia intraepitelial cervical aumenta el número de figuras mitóticas, visibles en las capas epiteliales superficiales (Zsemlye, 2013).

La neoplasia intraepitelial cervical de grado 1 (NIC1), o bajo grado, es la consecuencia más frecuente de una infección productiva por el VPH humano y en ella las células presentan una buena maduración y solo en el tercio inferior se observan células indiferenciadas y pocas figuras mitóticas. Pueden verse, además, efectos citopáticos virales (coilocitos), los cuales corresponden a la manifestación clásica de la infección por VPH en la célula cervical. Las lesiones NIC2 o displasia de alto grado, se caracterizan por cambios celulares displásicos restringidos a los dos tercios inferiores del epitelio, y la atipia nuclear es más grave que en las lesiones NIC1. Pueden verse figuras mitóticas en toda la mitad inferior del epitelio, pleomorfismo en el núcleo y pérdida de la polaridad celular (Zsemlye, 2013). En las lesiones NIC3 hay una mayor pérdida de maduración, el epitelio inmaduro ocupa todo el espesor del epitelio, la diferenciación y la estratificación se pierden por completo en toda la superficie epitelial y se encuentran abundantes figuras mitóticas anormales. Esta lesión precede al cáncer cervical y, al igual que las NIC2, deben ser tratadas para evitar que progresen hasta un cáncer cervical (Figura 1) (Zsemlye, 2013).

Etiología. La etiología del cáncer cervical ha sido claramente demostrada en estudios moleculares *in vitro* y plenamente confirmada en estudios epidemiológicos. Esta infección cumple con los criterios de causalidad de Bradford Hill, y la infección por VPH-AR se considera la causa necesaria para el desarrollo del cáncer de cuello

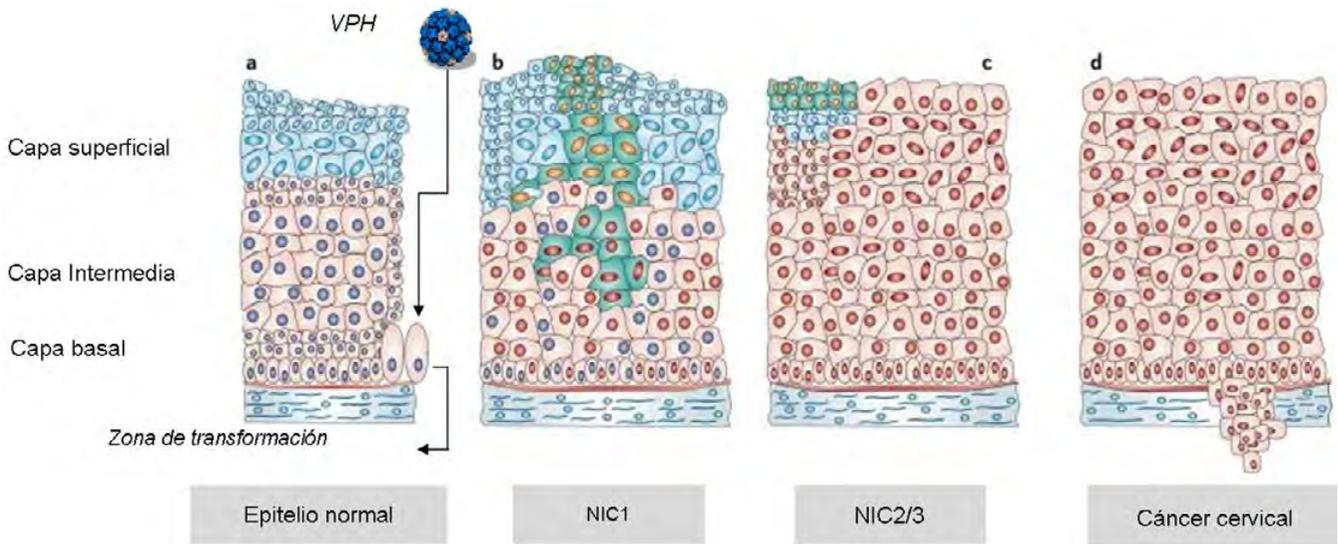


Figura 1. Representación esquemática de las lesiones causadas por el VPH en el epitelio cervical

a) El VPH ingresa por microheridas al epitelio cervical normal; la zona de transformación es el sitio donde más comúnmente se inician las infecciones virales y el desarrollo de lesiones cervicales. b) Después del inicio de la infección, el ADN viral se replica e inicia la expresión de genes virales (células con núcleo rojo), hasta tal punto que si la infección no remite, empiezan a surgir anomalías en el primer tercio inferior del epitelio. c) Si la infección persiste, las alteraciones celulares ocuparán las dos terceras partes del epitelio en NIC2, y todo el espesor del epitelio en NIC3. d) Si no se instaura el tratamiento adecuado la proliferación descontrolada de estas células induce el rompimiento de la membrana basal y se inicia en este punto el desarrollo del cáncer cervical. La figura fue tomada y modificada de **Roden & Wu, 2006**. Todos los derechos reservados

uterino (**Bosch, et al., 2002; Walboomers, et al., 1999**). Los hallazgos más significativos en la comprobación de dicha relación causal son la demostración de la función de transformación celular de los oncogenes E7 y E6 mediante el bloqueo de las proteínas supresoras de tumores pRb y p53, respectivamente, y los estudios de casos y controles que demostraron que son 14 tipos del VPH-AR los que se asocian de forma exclusiva con el riesgo de este cáncer. Estos 14 genotipos se distribuyen en dos grupos filogenéticos caracterizados por la alta afinidad de sus oncoproteínas E7 y E6 por la pRb y la p53, respectivamente, lo que evidencia claramente la relación epidemiológica y filogenética de la oncogénesis del VPH (**Muñoz, et al., 2003; Schiffman, et al., 2005**). Estos 14 genotipos de VPH-AR son los únicos capaces de inducir infección persistente, la cual es el primer requisito para la carcinogénesis cervical. Sin embargo, existen otros factores concomitantes relacionados con el ambiente y el huésped que pueden modular la persistencia y la progresión maligna. Entre estos factores se encuentran las inmunodeficiencias adquiridas (infección por VIH, tratamientos inmunosupresores) o congénitas (respuestas inmunológicas anormales, tipos HLA y polimorfismos en p53); factores hormonales como el uso prolongado de anticonceptivos orales, el tabaquismo, las infecciones concomitantes con otros agentes infecciosos como el virus herpes simplex de tipo 2 (VHS-2), con *Chlamydia trachomatis* y el virus de Epstein Bar (VEB), así como los múltiples partos (**Muñoz, et al., 2006**).

Virus del papiloma humano. Los VPH son virus pequeños con un genoma de ADN circular de doble cadena de aproximadamente 8.000 pares de bases de longitud y una cápside de simetría icosaédrica sin envoltura, que pertenecen a la familia *Papillomaviridae*.

Estos virus tienen especificidad celular, y solo infectan células del epitelio escamoso, cutáneas o mucosas, dando lugar a lesiones proliferativas de origen epitelial (**Doorbar, et al., 2015**). Las partículas virales miden entre 52 y 55 nm de diámetro. La cápside está constituida por 72 capsómeros pentaméricos de la proteína L1, que es la proteína tardía más abundante de la cápside (representa el 95 %) y de la proteína L2, que representa tan solo el 5 % de la cápside; esta última se asocia internamente a los capsómeros formados por L1 (**Finnen, et al., 2003**). En el interior de la cápside se encuentra el genoma viral, que comprende tres regiones funcionales ubicadas en una de las cadenas del ADN circular, como se observa en la figura 2. La primera región se conoce como reguladora o región larga de control (*Long Control Region, LCR*), la cual contiene el origen de la replicación y los sitios de unión para factores de transcripción viral y celular, y, asimismo, cumple una función reguladora de la transcripción de los genes virales E6 y E7 (**Van Doorslaer, 2013**). La segunda es una región temprana (E del inglés *Early*), que contiene seis marcos de lectura abiertos (*open reading frame, ORF*), conformada por los genes E1, E2, E4, E5, E6, y E7, los cuales codifican para proteínas no estructurales involucradas en la transcripción, replicación

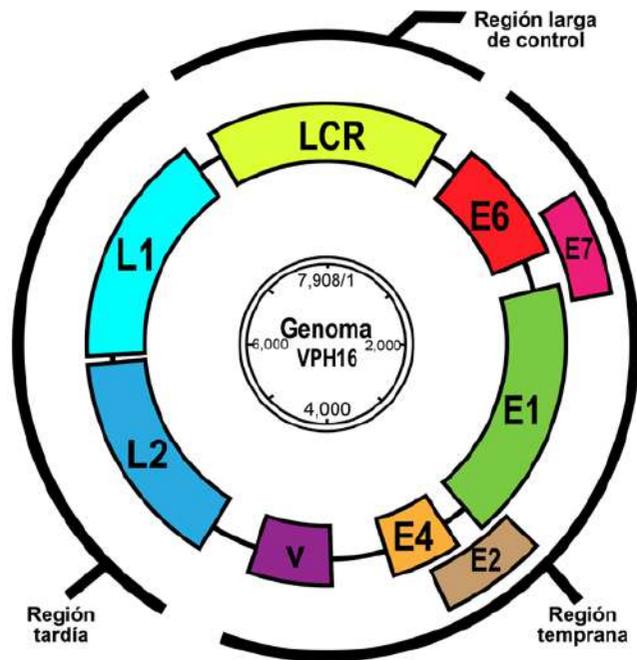


Figura 2. Estructura y organización del genoma de VPH tipo 16. El esquema representa la molécula de doble cadena circular, dividida en sus tres regiones principales: región reguladora (LCR), región temprana (Early) y región tardía (Late). Imagen elaborada por las autoras.

y oncogénesis viral; dicha región se localiza en posición adyacente y corriente abajo del LCR. La tercera es la región tardía (L, del inglés *Late*), ubicada en posición adyacente y corriente abajo de la región temprana, la cual codifica las proteínas estructurales de la cápside L1 y L2, facilitadoras del empaquetamiento y la maduración del ADN viral (*Van Doorslaer, 2013*).

Se han caracterizado y secuenciado más de 150 papilomavirus humanos, y se conoce que, de estos, alrededor de 40 tipos pueden infectar los órganos genitales, incluido el cuello uterino, la vagina, la vulva, el pene y el ano. Los tipos virales capaces de infectar las mucosas se dividen en virus de alto riesgo (VPH-AR) y bajo riesgo (VPH-BR), según si presentan propiedades que puedan llevar al desarrollo de cáncer (*Doorbar, et al., 2015; Muñoz, et al., 2003*). Los VPH-BR no son oncogénicos y clínicamente producen lesiones benignas (verrugas genitales o condilomas); VPH6 y VPH11 son los principales tipos virales asociados con estas lesiones. Por el contrario, los VPH-AR son clasificados como virus oncogénicos, y se asocian con el desarrollo de lesiones potencialmente malignas y con el cáncer de cuello uterino. En este grupo, VPH16 y VPH18 son los más importantes, dado que son los responsables de aproximadamente el 70 % de todos los casos de cáncer de cuello uterino.

Clasificación taxonómica. Como ya se mencionó, la clasificación taxonómica revela una mayor cercanía filogenética, la cual explica no solo sus características biológicas

sino también patogénicas. Es así como los tipos VPH6 y VPH11 se han clasificado en la especie 10 conjuntamente con otros tipos virales asociados únicamente con lesiones benignas. Mientras que VPH16 se clasifica en la especie 9 con los tipos virales VPH31, VPH33, VPH52, entre otros, los cuales están asociados con el desarrollo de cáncer. Los virus del papilloma se ubican taxonómicamente en la familia *Papillomaviridae*, que contiene 16 géneros, los cuales son designados con una letra griega como prefijo y con la terminación papillomavirus, así: α -papillomavirus, β -papillomavirus, γ -papillomavirus, entre otros (*de Villiers, et al., 2004*). La clasificación taxonómica del VPH se basa en las diferencias encontradas en la secuencia de nucleótidos del ORF que codifica para la proteína de la cápside L1, una de las regiones más conservadas del genoma viral (*de Villiers, et al., 2004*). Los tipos de VPH que pertenecen a diferentes géneros presentan una variación dentro de la región L1 del genoma viral de más del 40 %. Para la clasificación en diferentes especies virales, debe haber un porcentaje de variación entre 30 y 40 % en esta misma región. La clasificación de un nuevo tipo de VPH se define si el genoma completo ha sido secuenciado y la secuencia de nucleótidos del gen L1 difiere por lo menos en un 10 % de la de cualquier otro tipo caracterizado. Si la variación en la secuencia de nucleótidos está entre el 1 y el 10 %, se considera una variante o linaje viral, y si está entre 0,5 y 1,0 %, como un nuevo sublinaje (*de Villiers, et al., 2004*).

Variantes del VPH y riesgo de cáncer de cuello uterino.

En diversos estudios se ha reportado que la variación genética de VPH16 está asociada con la persistencia y el riesgo de cáncer de cuello uterino (*Berumen, et al., 2001; Cornet, et al., 2013; Sánchez, et al., 2011*). En el caso del VPH16, tipo viral asociado con el 50 % de los casos de cáncer cervical, se han identificado cuatro variantes o linajes filogenéticos (A, B, C y D) que incluyen al menos nueve sublinajes, los cuales se han nombrado según los grupos étnicos donde se han descrito con mayor frecuencia: los sublinajes A1, A2 y A3 corresponden a las variantes europeas (E), A4 a las asiáticas (AS), B1 a las africanas-1a (Afr1a), B2 a las africanas-1b (Afr1b), D1 a las norteamericanas 1 (NA), D2 a las asiático-americanas 2 (AA2), D3 a la asiático-americana 1 (AA1), y el linaje C a la africana-2a (Afr2a) (*Burk, et al., 2013*).

Existe una diferencia en la distribución de estas variantes entre las áreas geográficas del mundo (*Yamada, et al., 1997*) y los diferentes grupos étnicos (*Vargas-Robles, et al., 2018*), lo cual se confirmó con la identificación de variantes genéticas en 953 muestras positivas para el VPH16 recolectadas por la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (*International Agency for Research on Cancer, IARC*) en 17 países del norte de África y del África subsahariana, Asia oriental y occidental, Europa (Georgia, Polonia y España) y en muestras de Suramérica (*Cornet, et al., 2012*). Se encontró que las variantes E se distribuyen uniformemente en todas las regiones del mundo,

y las variantes AS, AA y Af (no europeas) se han registrado fundamentalmente en Asia oriental, las Américas y las regiones africanas, respectivamente (**Cornet, et al., 2013**).

La infección con variantes no europeas (Af1, Af2, AA, AS, NA) se ha asociado con un riesgo dos a nueve veces mayor de cáncer cervical que las variantes E, especialmente en estudios llevados a cabo en Estados Unidos y Latinoamérica (**Berumen, et al., 2001; Burk, et al., 2003; de Boer, et al., 2004; Hildesheim, et al., 2001; Tornesello, et al., 2004**). Las poblaciones europeas presentan infección predominantemente con variantes E; específicamente la variación en la posición 350T en comparación con la 350G del gen *E6* del VPH16 tienen dos veces más de riesgo de persistencia (**Cornet, et al., 2013**).

Asimismo, los sublinajes A4, C, D2 y D3 presentan un riesgo de lesiones precancerosas y de cáncer significativamente mayor en comparación con los sublinajes A1/A2 en Estados Unidos (**Mirabello, et al., 2016**). En este estudio se encontró que aquellas mujeres cuya raza o etnia coincidía con la variante infecciosa del VPH16 tenían un mayor riesgo de ser positivas para lesiones de estadio NIC3. Por el contrario, en estudios anteriores llevados a cabo por nuestro grupo de investigación no se encontró evidencia de la correspondencia con esta variante (raza o etnia) (**Lopera, et al., 2014**). Mediante métodos aún más afinados para definir la ascendencia genética se observó una correlación inversa en la distribución de las proporciones de la ascendencia y la frecuencia de esta variante. Se encontró que las mujeres con cáncer cervical con una mayor proporción de ascendencia europea o nativa americana presentaban las variantes AA o E en mayor proporción. Esta relación entre la ascendencia y la distribución de los linajes filogenéticos sugiere que la evolución concertada de la población humana y algunos de los sublinajes específicos del VPH16, se han traducido en la potenciación de propiedades carcinogénicas virales o en la disminución de la capacidad del huésped de controlar la infección, lo que explicaría que el riesgo de lesiones potencialmente malignas y de cáncer de cuello uterino se dé solo en un reducido porcentaje de la población mundial.

Es importante aclarar que los estudios de asociación epidemiológica no necesariamente se traducen en una correlación etiológica mecánica o molecular y que deben explorarse más los mecanismos moleculares que pudieran explicar esta asociación, dado que las características bioquímicas de las oncoproteínas virales que se traducen a partir de estas variantes es limitada.

Estructura y variabilidad de las proteínas oncogénicas E6 y E7 del VPH. La proteína E6 del VPH está conformada aproximadamente por 150 aminoácidos altamente conservados, pues contiene dos motivos o dedos de zinc muy conservados que se caracterizan por la presencia de cuatro motivos Cys-X-X-Cys, cuya integridad es esencial para su interacción con diversas proteínas de la célula huésped (**Vande Pol & Klingelutz, 2013**). En el extremo C-terminal la proteína E6 tiene el motivo X-(T/S)-X-(V/I/L), que

se conserva entre los VPH-AR y que se une a la familia de las proteínas PDZ. La proteína E6 es esencial para el ciclo productivo del virus y el mantenimiento del ADN viral en los queratinocitos y presenta actividades oncogénicas claramente descritas; además, se une a un sinnúmero de blancos celulares, entre los que se encuentran la proteína supresora de tumores p53, las proteínas con dominios PDZ y la telomerasa. La unión de E6 con la proteína p53 induce su degradación por la vía de la ubiquitina, lo que le permite bloquear la apoptosis, interferir con la diferenciación celular e inducir la transformación celular en las células infectadas (**Vande Pol & Klingelutz, 2013**). También se ha reportado que la E6 puede interrumpir la apoptosis mediante mecanismos independientes de la p53, uniéndose a Bak (una proteína pro-apoptótica de la familia Bcl-2) (**Vande Pol & Klingelutz, 2013**).

La proteína E6 induce, además, la degradación de la proteína humana PDZ hDlg, la cual está involucrada en la formación de uniones celulares, la regulación de la adhesión celular y la proliferación de los tejidos epiteliales. Esta alteración induce una desregulación en el control del crecimiento invasivo de las células epiteliales, favoreciendo la formación e invasión del tumor maligno (**Pim & Banks, 2010**).

Además de unirse a la telomerasa y activar la transcripción de la subunidad catalítica de esta enzima, lo cual ayuda al mantenimiento de las estructuras teloméricas contenidas al final de los cromosomas, permite la proliferación celular sostenida (**Vande Pol & Klingelutz, 2013**), e interfiere con la respuesta inmunológica ante la infección viral. La proteína E6 tiene una función inmunosupresora mediante su unión al transactivador de transcripción IRF-3, afectando su función de activador transcripcional, lo que directamente interrumpe la expresión de los genes inducidos por el interferón. Además, se une a la proteína tirosina cinasa 2 (*tyrosine-protein kinase 2*, Tyk2), una proteína transductora de señales de la vía Jak-STAT y, por lo tanto, interfiere en la activación de la vía de señalización del IFN- α (**Vande Pol & Klingelutz, 2013**). La otra oncoproteína del VPH es la E7, la cual está conformada por cerca de 100 aminoácidos y posee un sitio con motivos de dedos de zinc en su extremo carboxilo terminal, el cual se utiliza para su dimerización (**Roman & Munger, 2013**); en la región amino terminal la E7 contiene dos regiones homólogas con la proteína E1A del adenovirus; estos dominios son importantes para la actividad transformadora, pues permiten la interacción con diferentes proteínas celulares, incluidas la unión y la degradación de la proteína supresora de tumores del retinoblastoma (pRb), lo que contribuye a la progresión maligna y la inducción de la inestabilidad genómica en las células infectadas (**Roman & Munger, 2013**). En una primera instancia, la proteína E7 establece un complejo con la forma hipofosforilada de pRb e induce su degradación. La inactivación de pRb induce, a su vez, la activación constitutiva del factor de transcripción E2F, que, en su turno, induce la activación de genes involucrados en la síntesis de ADN durante la fase S del ciclo celular (**Roman & Munger, 2013**).

Otra característica de la proteína E7 es su capacidad de unión a miembros de la familia de factores de transcripción AP-1, tales como c-Jun, JunD y c-Fos, todos ellos importantes en las vías de señalización relacionadas con el proceso de mitosis y de diferenciación celular (Antinore, et al., 1996). Las proteínas que pertenecen al grupo Jun controlan la proliferación y la apoptosis mediante su capacidad de controlar la expresión y la función de los reguladores del ciclo celular. La E7 se une a c-Jun y activa su promotor por un mecanismo de transactivación, potenciando la activación de genes involucrados en la progresión del ciclo celular y la mitosis (Antinore, et al., 1996). Por último, esta proteína también puede interactuar con el factor de crecimiento semejante a la insulina 3 (*insulin-like growth factor binding protein 3*, IGFBP-3) modulando el proceso de apoptosis (Roman & Munger, 2013).

La desregulación del ciclo celular por acción de las proteínas E6 y E7 predice el riesgo de cáncer cervical. Como ya se mencionó, las proteínas E6 y E7 son esenciales para la capacidad transformadora de los VPH-AR mediante la interferencia con las funciones de los supresores de tumores p53 y pRb, respectivamente, lo que impide la regulación de los principales puntos de control del ciclo celular (Vande Pol & Klingelutz, 2013). La cooperación entre estas dos oncoproteínas conduce a la immortalización celular *in vitro*, en la cual la célula no solamente es incapaz de eliminar el ADN viral, sino que pierde la capacidad de corregir errores

intrínsecos en el ADN, de modo que se van acumulando alteraciones genéticas progresivamente hasta convertirse en una célula con fenotipo neoplásico (Yeo-Teh, et al., 2018). Uno de los hallazgos clínicos más importantes es que los niveles de expresión de las oncoproteínas E6 y E7 del VPH-AR, pero no así las del VPH-BR, aumentan con la gravedad de la lesión, expresión que se correlaciona con el grado de las lesiones histológicas. En las lesiones NIC1 o de bajo grado, el ciclo viral permisivo y productivo se acompaña de la replicación completa del genoma y la liberación de nuevos viriones de las células escamosas diferenciadas del epitelio. Sin embargo, cuando la infección se convierte en persistente, se produce un aumento en la expresión de E6 y E7, lo que conduce al desarrollo de lesiones NIC2+ o del alto grado. En este tipo de infecciones el nivel de expresión de E6 y E7 es más alto y, además, la producción de partículas virales baja (Doorbar, et al., 2012), así como la expresión aberrante de proteínas reguladoras del ciclo celular, como la p16INK4a (p16), codificada por el gen supresor de tumores CDKN2A (Bergeron, et al., 2015). Como se explica en la figura 3, en una célula normal en la cual se ha inducido el estado proliferativo, la transición de la fase G1 a S del ciclo celular es activada directamente por una serie de heterodímeros formados por las ciclinas y las cinasas dependientes de ciclinas (*cyclin-dependent protein kinases*, CDK), específicamente, por los complejos ciclina D/CDK4/6 y ciclina E/CDK2. La función del complejo D/CDK4/6 es fosforilar

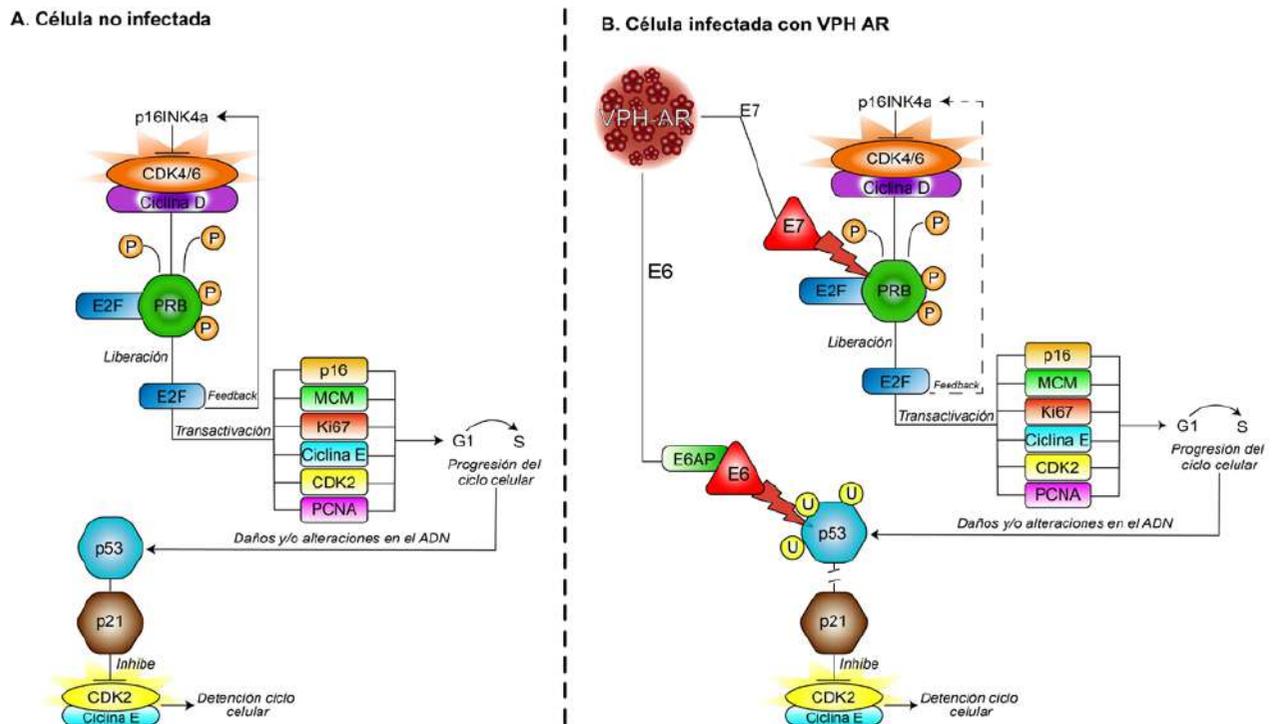


Figura 3. Esquema comparativo de la regulación del ciclo celular en una célula normal no infectada (A) versus una célula infectada por VPH-AR (B). En una célula no infectada las proteínas supresoras de tumores pRb y p53 regulan la proliferación celular, mientras que en las células con infección transformadora por la acción del VPH-AR, las oncoproteínas E6 y E7 desregulan los puntos de control de la proliferación celular, inhibiendo el mecanismo de control de p53 y pRb, respectivamente. Imagen elaborada por las autoras

la proteína pRb en la fase G1, fosforilación que genera un cambio conformacional en pRb, el cual induce la liberación del factor de transcripción E2F, que al ser liberado genera la transactivación de los genes que codifican para las proteínas involucradas en la replicación del ADN (MCM, Ki-67, ciclina E, CDK2, PCNA), lo que facilita el inicio de la fase de síntesis del ADN. Pero cuando se inhibe el estado proliferativo, la proteína pRb se encuentra en un estado hipofosforilado y se activa su función inhibitoria sobre el factor de transcripción E2F, lo que bloquea la replicación del ADN (Doorbar, *et al.*, 2012). Las condiciones fisiológicas normales que permiten las transiciones del ciclo celular proliferativo a uno no proliferativo están, a su vez, comandadas por la proteína inhibitoria p16, la cual aumenta su expresión y se une de forma específica al complejo CDK4/CDK6, inhibiendo indirectamente la fosforilación de la pRb y, por lo tanto, estimulando su estado hipofosforilado y su unión al factor E2F, lo que evita que la célula mantenga el estado proliferativo continuo. En la figura 3 también se evidencia cómo la célula cuenta con un mecanismo que se activa en caso de que se detecte alguna alteración o daño, o un aumento inusual de la proliferación celular. Esta segunda vía de protección de la célula esta comandada por la proteína p53, la cual se activa como respuesta al daño del ADN y se acumula en la célula generando, así, la detención del ciclo celular. El aumento de la p53 induce la transcripción de la p21, la cual se encarga, a su vez, de inhibir el complejo ciclina E/CDK2, lo que genera que la pRb permanezca en un estado hipofosforilado que le permite permanecer unida a E2F bloqueando su función. En las infecciones transformadas por VPH-AR los puntos de control del ciclo celular se ven alterados, primero porque la oncoproteína E7 bloquea e induce la degradación de pRb, de tal manera que el factor E2F queda libre, dando paso a la transcripción de los genes de la fase de síntesis. Consiguientemente, la proteína p16 es regulada positivamente, tratando de inhibir la proliferación descontrolada, pero allí su función inhibitoria es nula dado que el aumento de E2F no está relacionado con un aumento del complejo CDK4/6 (Doorbar, *et al.*, 2012). En segundo lugar, como respuesta a esta alteración, la célula normalmente induce la expresión de p53, pero este control también se ve alterado en una célula transformada por VPH-AR dado que la oncoproteína E6 induce la degradación de p53 (Scheffner, *et al.*, 1993). De esta manera, en las infecciones oncogénicas y persistentes de genotipos del VPH-AR se observa un aumento del nivel de p16 en presencia de proteínas indicadoras de proliferación celular tales como Ki67 y MCM, proteínas nucleares que son detectadas concomitantemente en las fases de proliferación del ciclo celular como consecuencia de la actividad oncogénica de la oncoproteína E7 (Doorbar, *et al.*, 2012).

Hipótesis de la relación entre la filogenia y la oncogénesis del VPH, una visión translacional. Se ha demostrado que la variabilidad genética del VPH explica su capacidad oncogénica (Schiffman, *et al.*, 2005). Esta mayor

capacidad oncogénica de ciertos genotipos y variantes moleculares reside, a su vez, en las diferencias funcionales de las oncoproteínas E6 y E7 (Münger & Howley, 2002) y la variabilidad genética del huésped (Doorbar, 2018). Específicamente, la proteína E6 del VPH 16, no solo tiene mayor afinidad por la proteína p53, sino que, además, algunas de sus variantes degradan más eficientemente la proteína supresora de tumores. También se ha observado un mayor riesgo de cáncer cervical en mujeres infectadas con variantes específicas, asociación que parece estar influenciada por el componente ancestral del huésped (Lopera, *et al.*, 2014). Estas características genéticas del virus y del huésped, además, se ven influenciadas por estilos de vida que afectan la exposición de los individuos a factores hormonales, tales como el uso de los anticonceptivos orales, los múltiples partos o el consumo del tabaco (Luhn, *et al.*, 2013). Por lo tanto, los mecanismos moleculares que controlan el ciclo celular y que se alteran debido a las diferencias funcionales en E6 y E7 explicarían el por qué solo una pequeña proporción de individuos entre los millones que se infectan con el VPH desarrollan el cáncer y, además, el hecho de ser la fuente de posibles biomarcadores predictores de su desarrollo.

Las pruebas basadas en las secuencias genómicas de los VPH-AR y los genotipos VPH16 y 18 predicen el riesgo de cáncer. Una vez confirmado el papel etiológico del VPH en el cáncer cervical y el hallazgo de los casi 40 tipos que infectan el epitelio genitourinario y que son transmitidos sexualmente, se ha observado que solo 14 tipos son oncogénicos, lo cual llevó a diseñar pruebas que diferenciaran molecularmente los VPH-AR de los VPH-BR. En la actualidad se cuenta con, por lo menos, 193 técnicas moleculares disponibles comercialmente para la detección de los VPH-AR, 69 de las cuales han sido clínicamente evaluadas (Burd, 2016). Dichas pruebas pueden dividirse en tres grupos principales según si detectan: 1) el ADN de los VPH-AR sin discriminar entre tipos virales, es decir, solo detectan la presencia o ausencia de los VPH-AR; 2) el ADN de los VPH-AR con la concomitante genotipificación de algunos de los principales tipos de alto riesgo, y 3) el ARNm (ARN mensajero) de las oncoproteínas E6 y E7 de los VPH-AR. Estas pruebas tienen una sensibilidad cercana al 100 % para detectar lesiones potencialmente malignas del cuello uterino, y en ensayos clínicos controlados aleatorizados se ha demostrado que, en una primera ronda de tamización, dichas pruebas no solo detectan más lesiones NIC2+ y NIC3+ que la citología, el método tradicional de detección, sino que, además, ayudan a reducir el número de casos y muertes por cáncer cervical hasta en un 70 %, ya que permiten determinar el tratamiento inmediato en las mujeres con mayor riesgo (Denny, *et al.*, 2017). Sin embargo, la prueba de VPH-AR es poco específica, pues la mayoría de las mujeres positivas para VPH-AR tienen infecciones transitorias que se resuelven espontáneamente (Rodríguez, *et al.*, 2008).

Los estudios sobre la historia natural del VPH han demostrado que el riesgo de lesiones de alto grado y de cáncer cervical varía sustancialmente según el tipo de VPH-AR; el VPH16 es el tipo más prevalente en el cáncer, seguido del VPH18. El 70 % de la carga mundial de cáncer cervical se atribuye a la infección por estos dos tipos virales (**de Sanjose, et al., 2010**). Como ya se mencionó, las pruebas de VPH-AR son inespecíficas, pero el riesgo de lesiones de alto grado en mujeres infectadas por el VPH16 o el VPH18 es mayor que el asociado con la infección por cualquiera de los otros genotipos de VPH-AR. Por esta razón, la tipificación del VPH16 y el VPH18 ya se usa en la clínica en dos circunstancias principales: 1) para el triaje de mujeres de 21 años o más con resultados de ASC-US en la citología cervical, y 2) para el triaje de mujeres mayores de 30 años positivas en la tamización con la prueba de VPH-AR. En ambos casos, los resultados de la tipificación permiten detectar a las mujeres que deben ser enviadas a colposcopia inmediatamente (**Burd, 2016**). Las guías clínicas de Estados Unidos ya han adoptado estas estrategias e incorporan la citología cervical combinada con la tipificación de VPH16/18 como estrategia de triaje para mujeres de 25 años o más (**Saslow, et al., 2012**).

Tamización con la prueba de VPH-AR. La prueba de VPH ha sido ampliamente validada en diferentes ensayos clínicos que han incluido cerca de 140.000 mujeres a nivel mundial. Esta evidencia se resumió en una revisión sistemática de la literatura en la cual se concluyó que la prueba de VPH es más sensible que la citología para la tamización de cáncer cervical en la población general y después del tratamiento (**Koliopoulos, et al., 2017; van der Heijden, et al., 2015**).

En la guía de práctica clínica colombiana para la detección y manejo de lesiones precancerosas de cuello uterino del 2014 (No. GPC 2014 – 44) y en la Resolución N° 3280 de 2018, se recomendó la tamización basada en pruebas de ADN-VPH y el triaje con citología cervical en mujeres a partir de los 30 años (**Ministerio de Salud y Protección Social, 2014**). Las pruebas recomendadas en esta guía según los grupos de edad son las siguientes.

- De los 25 a los 30 años: citología de cuello uterino bajo el esquema 1-1-3 (una citología cada año durante dos años consecutivos; si el resultado de las dos es negativo se hace cada tres años).
- De los 30 a los 65 años: prueba de VPH y triaje con citología. Se recomienda que las mujeres negativas para VPH se repitan la prueba en un intervalo de cinco años; las mujeres positivas deben recibir triaje con citología y si los resultados de esta son positivos, deben ser referidas a colposcopia y biopsia según el tipo de hallazgos; a las mujeres con resultado negativo en el triaje debe recomendárseles una nueva prueba de VPH a los 18 meses, con el fin de evaluar si persiste la infección.
- De los 25 a los 50 años en mujeres residentes en zonas de difícil acceso a servicios de salud: técnicas de inspección visual del cuello uterino (**Ministerio de Salud y Protección Social, 2014**).

El uso de estas técnicas de tamización ha sido objeto de estudio a nivel nacional e internacional, y se han descrito algunas de sus ventajas y desventajas. Entre las ventajas de la citología cervicouterina se encuentra su alta especificidad y aceptación entre las mujeres. Sin embargo, tiene una sensibilidad baja, cercana al 53 % (**Baena, et al., 2017**), lo que quiere decir que muchas lesiones se pasan por alto y las mujeres no son diagnosticadas correctamente.

En cuanto a la prueba de VPH, se sabe que tiene una alta sensibilidad y alto valor predictivo negativo, por lo que no debe hacerse muchas veces durante la vida. Si la prueba es negativa deberá repetirse a los 5 años, lo que a su vez disminuye la carga económica para el sistema de salud. Sin embargo, la prueba tiene poca especificidad, lo que implica que muchas mujeres tendrán un resultado positivo, pero ello no necesariamente implica una lesión en el cérvix. En la mayoría de estas mujeres, especialmente las menores de 30 años, la infección remite sin ninguna consecuencia en el curso de los 18 meses siguientes (**Rodríguez, et al., 2008**). Esto conlleva la necesidad de pruebas diagnósticas adicionales, como colposcopias y biopsias innecesarias, que constituyen una carga económica para el sistema.

Por otra parte, una de las ventajas de la inspección visual con ácido acético (VIA) es que no requiere personal altamente especializado ni equipos costosos, y facilita el tratamiento o el diagnóstico confirmatorio inmediato de las mujeres positivas, especialmente en áreas rurales y de difícil acceso, pues solo se requiere una visita a la clínica. Sin embargo, para hacer esta prueba el personal debe recibir entrenamiento y debe hacerse un control de calidad para garantizar el uso correcto de la técnica (**Castle, et al., 2017**), la cual tiene una especificidad moderada (83 %) (**Gaffikin, et al., 2003**); además, es probable que sea menos precisa en las mujeres posmenopáusicas y depende de un evaluador (**American Society for Colposcopy and Cervical Pathology – ASCCP, 2013**).

Los biomarcadores son pruebas confiables, relativamente baratas, que por su carácter molecular no dependen de un evaluador. Desempeñan un papel fundamental en la correcta clasificación de las mujeres positivas para el VPH. Su uso permite restringir la remisión a colposcopia y biopsia a aquellas mujeres con un verdadero riesgo de tener lesiones precancerosas que requieren tratamiento inmediato. De esta manera se optimiza un mejor uso de los recursos, se disminuyen el diagnóstico incorrecto o equivoco y los tratamientos innecesarios.

Las proteínas celulares p16 y ki67, la detección de VPH16/18 y la detección de microARN (miARN) pueden ser biomarcadores de la transformación maligna útiles en el triaje. La infección maligna por el VPH-AR induce proliferación celular sostenida por la acción de la proteína E7 sobre la pRb. Esta acción conlleva la expresión de la Ki67, una proteína nuclear que participa y es marcador indicativo de procesos de proliferación celular. En condiciones normales esta proliferación irregular y, consecuentemente, la expresión de Ki67 es controlada por el inhibidor de la

cinasa dependiente de la ciclina p16, una proteína supresora de tumores, la cual inhibe la proliferación celular al activar una cascada de eventos celulares para que la pRb se una e inactiva la E2F, la proteína central inductora de la transcripción de proteínas relacionadas con la proliferación celular. En el caso de la infección por VPH-AR, sin embargo, debido a la ausencia de la pRb, la p16 no solo no logra su capacidad antitumoral, sino que, además, se acumula en presencia de ki67, lo cual indica una desregulación aberrante del ciclo celular.

En varios estudios se ha demostrado que la prueba que detecta la p16 y la Ki 67 tiene más sensibilidad que la citología convencional para la detección de NIC2+ en mujeres positivas para el VPH. En este artículo se han referenciado específicamente los estudios en la población de la “EPS Kaiser Permanente de Estados Unidos” (Wentzensen, *et al.*, 2015) y el *Primary ASC-US LSIL Marker Study* (PALMS) de Francia (Bergeron, *et al.*, 2015), porque incluyeron un mayor número de mujeres durante un periodo de seguimiento más prolongado y una apropiada verificación de las pruebas de referencia (colposcopia y biopsias en todas las mujeres del estudio). El hallazgo más claro de estos estudios es que, a diferencia de la citología convencional, que necesita seguimiento anual, la prueba de p16/Ki67 permite ampliar de manera segura hasta por tres años el seguimiento de mujeres positivas para VPH que aún no han presentado lesiones de alto grado (Clarke, *et al.*, 2018). Por otro lado, la identificación concomitante de los VPH 16 y 18 en mujeres positivas para VPH ha demostrado ser una alternativa muy precisa para detectar de forma inmediata quienes necesitan colposcopia, aunque es importante mencionar que solo el 50 % de las lesiones de alto grado son positivas para estos dos tipos virales, lo que deja de lado casi al 50 % de mujeres con lesiones de alto grado que requieren pruebas con otros biomarcadores para la identificación y el adecuado manejo clínico (Castle, *et al.*, 2011).

Además, se sabe que durante el desarrollo del cáncer cervical ocurre una cascada de eventos anormales que altera el control del ciclo celular e induce la perturbación de la respuesta inmunitaria antitumoral, alteración la expresión génica y procesos epigenéticos como la metilación y la desregulación de los microARN (miARN), y que estos marcadores pueden ser útiles en el diagnóstico y el tratamiento del cáncer cervical (Kori & Yalcin-Arga, 2018). Esta revisión se centra en biomarcadores evaluados en nuestro laboratorio, pero es importante señalar que hay una gran cantidad de biomarcadores que están siendo evaluados y que en un futuro cercano podrán ser alternativas para el manejo clínico de mujeres positivas para el VPH en todo el mundo.

Materiales y métodos

Participantes y muestras cervicales. La población de estudio incluyó a 864 mujeres entre los 20 y los 69 años que habían sido referidas a colposcopia en instituciones médicas de Medellín por presentar una citología anormal (\geq ASC-US) o una prueba de VPH positiva.

Antes de la colposcopia, se recolectó una muestra de exfoliado cervical usando el citocepillo Rovers Cervex-Brush® (Rovers, Oss, The Netherlands), la cual fue almacenada en 20 mL del medio de transporte ThinPrep® PreservCyt® (Hologic Inc., Marlborough, MA, USA) y usada para la detección de VPH y para la tinción dual de p16/ki67. Posteriormente, un ginecólogo hizo la colposcopia y la toma de biopsias de los sitios acetoblanos con sospecha de lesiones cervicales; además, se tomó una biopsia aleatoria con el fin de detectar lesiones que no eran visibles. La muestra de exfoliado cervical se transportó al laboratorio del Grupo de Infección y Cáncer de la Universidad de Antioquia, donde se realizó la detección de VPH usando la prueba Cobas® 4800 (Roche Diagnostics, Mannheim, Germany), así como la tinción dual para las proteínas p16 y ki67 con la prueba CINTec® PLUS kit (Ventana, Tucson, Arizona, USA). Las biopsias cervicales se enviaron a los laboratorios de patología que prestaban el servicio a cada uno de los centros de colposcopia y de allí se obtuvieron los informes histopatológicos.

Detección de VPH-AR y tipificación VPH16/18 (Cobas® 4800). Se utilizó la prueba comercial Cobas 4800 aprobada por la *Food and Drug Administration* (FDA) para la detección de 14 tipos de VPH-AR, la cual identifica específicamente los tipos de VPH 16 y 18 y detecta simultáneamente los otros doce tipos virales (VPH 31, 33, 35, 39, 45, 51, 52, 56, 58, 59, 66 y 68) como un solo grupo denominado VPH-AR. El ADN se aisló usando el sistema automático Cobas X 480 a partir de la muestra de exfoliado cervical obtenida en medio Preservcyt®. Enseguida, se detectó el ADN viral mediante la amplificación de una secuencia de 200 pares de bases de la región L1 del genoma del VPH y del gen *HBB* de la β -globina humana mediante la amplificación de una secuencia de 330 pares de bases usada como control interno para la validación de la extracción. Se utilizaron sondas TaqMan®, marcadas con cuatro diferentes fluoróforos, para la detección de los productos amplificados durante la reacción en cadena de la polimerasa (*polymerase chain reaction*, PCR) en tiempo real, la cual se hizo en el termociclador Cobas Z 480. Por último, los resultados se interpretaron con el programa Cobas 480 como “negativos”, “positivos para VPH-16”, “positivos para VPH-18”, “positivos para otros VPH-AR” o como la combinación de los tres últimos.

Detección de las proteínas p167 y ki67. Para la tinción inmunocitoquímica se utilizó el estuche comercial CINTec® PLUS aprobada por el Invima, con el cual se determina cualitativamente y de forma simultánea la expresión de las proteínas p16INK4a y Ki-67 en extendidos de células cervicales. En la detección se empleó un anticuerpo monoclonal primario producido en ratón (clon E6H4™) y un anticuerpo monoclonal primario producido en conejo (clon 274-11 AC3), dirigidos contra las proteínas p16 y Ki-67, respectivamente. Posteriormente, se usó un sistema de revelado basado en dos reactivos de polímeros conjugados:

el primero con fragmentos Fab de anticuerpos anti-ratón conjugados con peroxidasa de rábano picante, y el segundo con fragmentos Fab de anticuerpos anti-conejo conjugados con fosfatasa alcalina de rábano picante. A continuación, se llevaron a cabo las reacciones de revelado mediante la transformación del cromógeno 3'3 diaminobencidina (DAB) mediado por la peroxidasa de rábano picante y la transformación de un cromógeno Fast Red mediado por la fosfatasa alcalina.

Las tinciones se clasificaron dicotómicamente como positivas para p16 o Ki-67 (presencia de tinción dual) o negativas para p16 o Ki-67 (ausencia de tinción), conforme al atlas y la guía del fabricante. La prueba se consideró positiva cuando se observaba por lo menos una célula con un citoplasma marrón (p16) y un núcleo rojo (Ki-67), es decir, se debían detectar las dos tinciones simultáneamente en la misma célula. Si no se observaban células cervicales epiteliales con ambas tinciones, la prueba se consideraba negativa. La presencia de células cervicales epiteliales con inmunorreacción frente a uno solo de los dos marcadores indicaba que estas no eran positivas, incluso si ambos tipos de células cervicales se encontraban en la misma muestra. Todas las tinciones fueron evaluadas bajo microscopio de luz por un patólogo del Departamento de Patología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia.

Predicción mediante algoritmos bioinformáticos de microARN. Con el objetivo de escoger un panel con buena probabilidad de ser utilizado como biomarcador para la detección de lesiones de alto grado de cérvix en mujeres infectadas con VPH-AR, se hizo una predicción mediante algoritmos bioinformáticos de los microARN diana reguladores de proteínas blanco de la acción de E6 y E7 del VPH usando la similitud de secuencias y la estabilidad termodinámica del programa miRWalk2.0 (Dweep & Gretz, 2015). Como estrategia de predicción se emplearon los códigos EntrezID (National Center for Biotechnology Information, NCBI) de 19 proteínas diana de la acción de E6 y E7

de VPH-AR; los resultados obtenidos en la predicción se filtraron seleccionando los microARN reportados previamente en la literatura científica. Acto seguido, se filtraron los microARN descritos con expresión aberrante en artículos relacionados con lesiones preneoplásicas y cáncer cervical y, por último, se seleccionaron aquellos con sobreexpresión.

Diagnóstico histológico. El diagnóstico de las biopsias tomadas el día del reclutamiento de las participantes se hizo por colposcopia. Las biopsias se colocaron inmediatamente en formalina tamponada y se enviaron para ser procesadas y leídas en los laboratorios de patología que prestaban el servicio a cada centro de colposcopia.

Consideraciones éticas. A todas las mujeres se les explicó el estudio y quienes estuvieron de acuerdo en participar dieron su consentimiento por escrito autorizando el uso de las muestras y los datos. Las mujeres recibieron una copia del consentimiento informado. El estudio fue aprobado por el Comité de Bioética para Investigación en Humanos de la Sede de Investigación Universitaria de la Universidad de Antioquia (CBE-SIU), según consta en el acta número 14-40-536 del 2014.

Resultados

La positividad para VPH16 y 18 y p16 y ki67 diferencia a las mujeres positivas para NIC1 y NIC2 en la prueba de VPH-AR. En los análisis llevados a cabo en nuestro laboratorio (Tabla 1), se observó que los resultados positivos aumentaron con ambas pruebas a medida que aumentaba la gravedad de las lesiones cervicales. En la prueba de VPH16/18 la positividad fue de 11,44, 19,28, 56,67, 46,43, 57,14 y 75 % en mujeres con diagnóstico negativo de NIC1, NIC2, NIC3, carcinoma escamocelular invasivo y adenocarcinoma, respectivamente. En la de p16/ki67 la positividad también aumentó con la gravedad de la lesión, pasando de 11,25 % en las mujeres con diagnóstico negativo a 100 % en los casos de cáncer escamocelular invasivo. En las mujeres positivas para ambas pruebas, VPH-AR y

Tabla 1. Positividad para VPH-AR, VPH 16/18, p16/ki67 y p16/ki67/VPH-AR de acuerdo al diagnóstico histopatológico cervical.

Diagnóstico histológico	VPH-AR Positivo ^a		VPH 16/18 Positivo ^b		p16/ki67 Positivo		p16/ki67/VPH-AR Positivo ^a	
	n	%	n	%	n	%	n	%
Negativo (n=542)	236	43,54	62	11,44	61	11,25	40	7,38
NIC1 (n=223)	148	66,37	43	19,28	52	23,32	41	18,39
NIC2 (n=60)	53	88,33	34	56,67	19	31,67	18	30
NIC3 (n=28)	25	89,29	13	46,43	19	67,86	18	64,29
SCC (n=7)	6	85,71	4	57,14	7	100	6	85,71
ADC (n=4)	3	75	3	75	3	75	2	50
Total (n=864)	471	54,51	159	18,4	161	18,63	125	14,47

^a Positivo para cualquier tipo de VPH-AR (VPH16, 18, 31, 33, 35, 39, 45, 51, 52, 56, 58, 59, 66 y 68).

^b Positivo para cualquier tipo de VPH 16 y/o 18

^c Prueba de VPH Positiva para cualquiera de los 14 tipos de alto riesgo y p16/ki67 positivas

p16/ki67, se observó que solo el 7,38 % de aquellas sin lesiones dio positivo, en la de NIC1 solo el 18,39 %, en tanto que para las lesiones de alto grado y cáncer la positividad fue del 30 al 86 %. Por lo tanto, estas pruebas no solo podrían aumentar la probabilidad de detectar lesiones de alto grado, sino que disminuirían el número de mujeres que deben ser referidas para colposcopia o sometidas a un tratamiento innecesario, pues clasifican correctamente a las mujeres positivas para VPH que tienen lesiones de alto grado (datos aún no publicados). Estos resultados son preliminares y deben ser validados en estudios con un mayor tamaño de muestra y en una situación de tamización.

Los microARN que controlan las proteínas del ciclo celular blanco de la acción y desreguladas por las oncoproteínas E6 y E7 son biomarcadores de inducción de lesiones malignas del cérvix. Los microARN son un grupo de ARN no codificantes de 19 a 23 nucleótidos conservados evolutivamente, cuya función es la regulación post-transcripcional y traduccional. Los microARN intervienen en muchos procesos celulares, entre los que se encuentran la diferenciación y la proliferación celular, el desarrollo y la apoptosis (Turchinovich, *et al.*, 2011). Puesto que bloquea la expresión de genes inhibidores de la proliferación (supresores de tumores), la desregulación de los miARN puede llevar a una pérdida del control del ciclo celular, lo que se ha asociado con subsecuentes alteraciones génicas al promover la progresión y la metástasis (Turchinovich, *et al.*, 2011). Hay evidencias preliminares *in vitro* sobre la modulación de la expresión de los microARN por los oncoproteínas E6 y E7 del VPH-AR (Harden & Munger, 2017). En el cáncer cervical, la expresión diferencial de los microARN en lesiones precursoras de bajo y alto grado se ha relacionado con el proceso carcinogénico inducido, como se muestra en la figura 4, debido al bloqueo de la actividad de proteínas supresoras de tumores tales como la p53, la CDKN1A (p21), la CDKN1B (p27), la PRB-E2F1, la CUL2, la EP300 y la UBR4, inducido por las oncoproteínas E6 y E7 de VPH-AR, lo que constituye un paso clave en la carcinogénesis cervical. Esto se ve ha visto respaldado indirectamente por los ensayos *in vitro* que demuestran la correlación entre la sobreexpresión de los microARN que modulan la expresión de las proteínas reguladoras del ciclo celular y la expresión de E6 y E7 *in vitro* (Harden & Munger, 2017). Otros hallazgos que respaldan indirectamente esta posible relación incluyen la regulación de p53 por miR-106b, miR-16, miR-18 y miR-25; de CDKN1A (p21) por miR-106b, miR-15b, miR-16, miR-20b; de CDKN1B (p27) por miR-155; de E2F1 por miR-106b, miR-181b, miR-205, miR-20b y miR-10a; de UBR4 por miR-378a, miR-155, CUL2 por miR-15b y miR-16, y de EP300 por miR-181b, miR-25 (Figura 4), así como por el hecho de que algunos de estos microARN están sobreexpresados en las lesiones cervicales de alto grado y en el cáncer cervical.

En este contexto, mediante los algoritmos de predicción bioinformática se identificó un set de 41 microARN

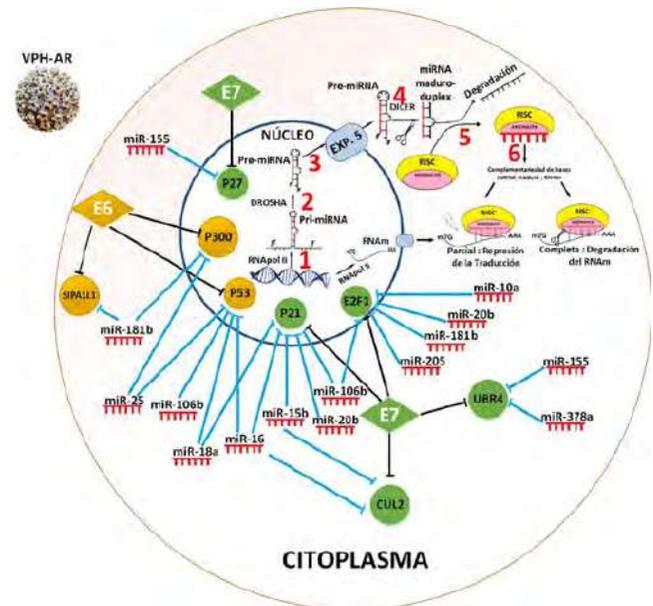


Figura 4. Biogénesis y función de los miARN en el contexto de una célula infectada por VPH de alto riesgo

Los miRNAs se transcriben en el núcleo por la RNA pol II generando largos transcritos de miRNA primario llamados pri-miRNA, los cuales contienen una caperuza 7-metil guanosina en el extremo 5' y una cola poliA en el extremo 3'. Los pri-miARN son clivados por la RNasa III (enzima endorribonucleasa), llamada también Drosha, dando lugar a intermediarios (pre-miRNA) con aproximadamente 70 nucleótidos. Los pre-miRNA son exportados al citoplasma a través de la proteína transmembranal nuclear exportina 5, luego son clivados por otra RNasa III llamada Dicer, dando lugar a un RNA de doble cadena de 19 a 25 nucleótidos, que se disocia por acción helicásica; cada cadena es un miARN, sin embargo, uno es degradado y el otro, que proviene de la cadena guía, es funcional y es incorporado en el complejo de silenciamiento inducido por el ARN (RISC), compuesto, a su vez, por proteínas argonautas (1-6). El complejo RISC-miARN se dirige a sus ARNm dianas y se une a los sitios complementarios, si la complementariedad de bases entre miARN y ARNm es completa, se degrada el transcrito y si es parcial, hay represión de la traducción.

La expresión de las oncoproteínas E6 y E7 (rombos) en una célula infectada por VPH-AR, desregula los niveles de proteínas supresoras tumorales (círculos) importantes en el controlar el ciclo celular (la desregulación se representa con rayas negras), y a su vez se induce la sobreexpresión de los miARN que reprimen la expresión de las mismas proteínas (la represión se representa con rayas azules). Imagen elaborada por las autoras.

potencialmente desregulados por las proteínas E6 y E7 de VPH-AR. Ocho de ellos regularon la expresión de las proteínas p53, EP300, CDK1A y CDK1B, involucradas en la carcinogénesis del cáncer cervical (datos no publicados). Los microARN poseen propiedades deseables en comparación con otros biomarcadores, son altamente estables frente a la acción de las ribonucleasas, lo que facilita su detección no invasiva en fluidos corporales, y son muy estables tanto *in vivo* como *in vitro* (Glinge, *et al.*, 2017). En varios estudios se ha postulado una cantidad apreciable de potenciales

microARN desregulados en lesiones preneoplásicas y en cáncer (Li & Hu, 2015). Nuestra hipótesis es que aquellos miARN relacionados con la función de las oncoproteínas E6 y E7 tienen mejor potencial como marcadores para la estratificación de las mujeres con mayor riesgo de presentar lesiones cervicales de alto grado.

Conclusiones

El VPH tiene un componente genético que le ha permitido evolucionar de forma concertada con el huésped, y es por esto que, a pesar de que anualmente millones de personas son infectadas por este virus, son muy pocas las que llegan a desarrollar un cáncer por esta causa. La relación evolutiva entre la filogenia viral, la ascendencia del huésped y los mecanismos moleculares que se desregulan como consecuencia de la exposición a otros factores como el tabaco, el uso de anticonceptivos hormonales y los múltiples partos, determinan el bajo porcentaje de mujeres con infección por los VPH-AR cuya persistencia puede resultar en cáncer cervical.

El reconocimiento de los VPH-AR como agentes causales del cáncer cervical, el estudio de la historia natural de la enfermedad, y la biología molecular del virus y su interacción con la célula infectada, han permitido conocer los mecanismos de la oncogénesis del virus, entre los cuales se destacan los relacionados con la sobreexpresión de las oncoproteínas virales E6/E7 de VPH-AR. La especificidad de la relación de estas proteínas virales con las de su huésped ocasiona la pérdida del control del ciclo celular y la acumulación de errores genéticos que conducen a la aparición del cáncer. No sorprende, entonces, que, hasta la fecha, los biomarcadores con mejor desempeño para la detección de lesiones de cérvix de alto grado sean las proteínas E6 o E7 y su blanco de acción. A pesar de que este conocimiento ha impulsado el estudio y el desarrollo de técnicas moleculares basadas en la detección de biomarcadores proteicos, aquellos basados en procesos epigenéticos y ácidos nucleicos ofrecen ventajas no solo por ser más estables sino porque, además, su detección sería más precisa y consistente mediante ensayos más simples y menos costosos. En este sentido, es importante resaltar que la determinación de los mecanismos moleculares y celulares básicos de los procesos patogénicos es fundamental para su establecimiento y su traducción en estrategias efectivas de prevención.

La principal limitación del presente estudio es el carácter preliminar de sus resultados, ya que deben ser evaluados en una situación de tamización y con un mayor tamaño de muestra para así evaluar el desempeño diagnóstico de cada uno de los marcadores. Sin embargo, teniendo en cuenta las recomendaciones internacionales, estos resultados respaldan la utilidad de este tipo de estudios sobre la correlación entre la tendencia de la tasa de positividad del biomarcador y el grado de la lesión cervical para evaluar su valor clínico como herramienta de tamización en el cáncer cervical (Arbyn, *et al.*, 2009; Stanczuk, *et al.*, 2017).

Contribución de los autores

Arianis Tatiana Ramírez-Pineda: revisión del estado del arte sobre la detección de p16/Ki67, los mecanismos moleculares de oncogénesis del VPH y los biomarcadores de cáncer cervical; elaboración del primer borrador del manuscrito. Martha Isabel González: análisis para la identificación de microARN como potenciales biomarcadores de detección de lesiones potencialmente malignas de cérvix. Kelly Melisa Castañeda Vanegas: evaluación y revisión del estado del arte en torno de la genotipificación del VPH16/18 como biomarcador para la detección de lesiones potencialmente malignas de cérvix. María Cecilia Agudelo-Fernández: revisión del estado del arte sobre la utilidad clínica de los biomarcadores y redacción y de la escritura del manuscrito. Carolina López-Urán: lectura de las placas para la tinción inmunocitoquímica de p16/ki67 y revisión del manuscrito. Gloria Inés Sánchez-Vásquez: evaluación de biomarcadores para la detección de lesiones potencialmente malignas de cérvix en mujeres positivas para VPH-AR; hipótesis del estudio; planeación y organización del contenido; escritura de los aspectos básicos de la filogenia y variabilidad genética del VPH y su relación con el componente ancestral del huésped y la patogenia del VPH; revisión, corrección y aval final del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses.

Referencias

- Antinore, M. J., Birrer, M. J., Patel, D., Nader, L., McCance, D. J. (1996). The human papillomavirus type 16 E7 gene product interacts with and trans-activates the AP1 family of transcription factors. *EMBO J.* **15** (8): 1950-1960. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8617242>
- Arbyn, M., Ronco, G., Cuzick, J., Wentzensen, N., Castle, P. E. (2009). How to evaluate emerging technologies in cervical cancer screening? *Int J Cancer.* **125** (11): 2489-2496. Doi:10.1002/ijc.24774
- Baena, A., Guevara, E., Almonte, M., Arias-Stella, J., Sasieni, P., Sánchez, G. I. (2017). Factors related to inter-observer reproducibility of conventional Pap smear cytology: A multilevel analysis of smear and laboratory characteristics. *Cytopathology.* **28** (3): 192-202. Doi: 10.1111/cyt.12410
- Bergeron, C., Ikenberg, H., Sideri, M., Denton, K., Bogers, J., Schmidt, D., . . . Ridder, R. (2015). Prospective evaluation of p16/Ki-67 dual-stained cytology for managing women with abnormal Papanicolaou cytology: PALMS study results. *Cancer Cytopathol.* **123** (6): 373-381. Doi: 10.1002/cncy.21542
- Bergeron, C., Ronco, G., Reuschenbach, M., Wentzensen, N., Arbyn, M., Stoler, M., von Knebel Doeberitz, M. (2015). The clinical impact of using p16(INK4a) immunochemistry in cervical histopathology and cytology: An update of recent developments. *Int J Cancer.* **136** (12): 2741-2751. Doi: 10.1002/ijc.28900
- Berumen, J., Ordóñez, R. M., Lazcano, E., Salmerón, J., Galván, S. C., Estrada, R. A., . . . Madrigal-de la Campa,

- A. (2001). Asian-American variants of human papillomavirus 16 and risk for cervical cancer: A case-control study. *J Natl Cancer Inst.* **93** (17): 1325-1330. DOI: 10.1093/jnci/93.17.1325
- Bosch, F. X., Lorincz, A., Munoz, N., Meijer, C. J., Shah, K. V.** (2002). The causal relation between human papillomavirus and cervical cancer. *J Clin Pathol.* **55** (4): 244-265. DOI: 10.1136/jcp.55.4.244
- Bray, F., Ferlay, J., Soerjomataram, I., Siegel, R. L., Torre, L. A., Jemal, A.** (2018). Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA Cancer J Clin.* Doi: 10.3322/caac.21492
- Burd, E. M.** (2016). Human papillomavirus laboratory testing: The changing paradigm. *Clin Microbiol Rev.* **29** (2): 291-319. Doi: 10.1128/CMR.00013-15
- Burk, R. D., Harari, A., Chen, Z.** (2013). Human papillomavirus genome variants. *Virology.* **445** (1-2): 232-243. Doi:10.1016/j.virol.2013.07.018
- Burk, R. D., Terai, M., Gravitt, P. E., Brinton, L. A., Kurman, R. J., Barnes, W. A., . . . Hildesheim, A.** (2003). Distribution of human papillomavirus types 16 and 18 variants in squamous cell carcinomas and adenocarcinomas of the cervix. *Cancer Res.* **63** (21): 7215-7220. DOI: 14612516/Cancer Res.2003-09
- Castle, P. E., Murokora, D., Perez, C., Alvarez, M., Quek, S. C., Campbell, C.** (2017). Treatment of cervical intraepithelial lesions. *Int J Gynaecol Obstet.* **138** (Suppl 1): 20-25. Doi:10.1002/ijgo.12191
- Castle, P. E., Stoler, M. H., Wright, T. C., Sharma, A., Wright, T. L., Behrens, C. M.** (2011). Performance of carcinogenic human papillomavirus (HPV) testing and HPV16 or HPV18 genotyping for cervical cancer screening of women aged 25 years and older: A subanalysis of the ATHENA study. *Lancet Oncol.* **12** (9): 880-890. Doi:10.1016/S1470-2045(11)70188-7
- Clarke, M. A., Cheung, L. C., Castle, P. E., Schiffman, M., Tokugawa, D., Poitras, N., . . . Wentzensen, N.** (2018). Five-year risk of cervical precancer following p16/ki-67 dual-stain triage of HPV-positive women. *JAMA Oncol.* Doi:10.1001/jamaoncol.2018.4270
- Colombian Ministry of Health (Ministerio de Salud y Protección Social).** [Clinical Practice Guide (CPG) for the detection and management of precancerous cervical lesions]. In: Colombian Ministry of Health editor. Guia No GPC 2014-44. Bogota, Colombia.
- Cornet, I., Gheit, T., Clifford, G. M., Combes, J. D., Dalstein, V., Franceschi, S., . . . Clavel, C.** (2013). Human papillomavirus type 16 E6 variants in France and risk of viral persistence. *Infect Agent Cancer.* **8** (1): 4. Doi:10.1186/1750-9378-8-4
- Cornet, I., Gheit, T., Franceschi, S., Vignat, J., Burk, R. D., Sylla, B. S., . . . Clifford, G. M.** (2012). Human papillomavirus type 16 genetic variants: phylogeny and classification based on E6 and LCR. *J Virol.* **86** (12): 6855-6861. Doi:10.1128/jvi.00483-12
- Cornet, I., Gheit, T., Iannacone, M. R., Vignat, J., Sylla, B. S., Del Mistro, A., . . . Clifford, G. M.** (2013). HPV16 genetic variation and the development of cervical cancer worldwide. *Br J Cancer.* **108** (1): 240-244. Doi:10.1038/bjc.2012.508
- de Boer, M. A., Peters, L. A., Aziz, M. F., Siregar, B., Cornain, S., Vrede, M. A., . . . Fleuren, G. J.** (2004). Human papillomavirus type 16 E6, E7, and L1 variants in cervical cancer in Indonesia, Suriname, and The Netherlands. *Gynecol Oncol.* **94** (2): 488-494. Doi:10.1016/j.ygyno.2004.05.037
- de Sanjose, S., Quint, W. G., Alemany, L., Geraets, D. T., Klaustermeier, J. E., Lloveras, B., . . . Group, R. I. S. a. H. T. T. S.** (2010). Human papillomavirus genotype attribution in invasive cervical cancer: A retrospective cross-sectional worldwide study. *Lancet Oncol.* **11** (11): 1048-1056. Doi:10.1016/S1470-2045(10)70230-8
- de Villiers, E. M., Fauquet, C., Broker, T. R., Bernard, H. U., zur Hausen, H.** (2004). Classification of papillomaviruses. *Virology.* **324** (1): 17-27. Doi:10.1016/j.virol.2004.03.033
- Denny, L., de Sanjose, S., Mutebi, M., Anderson, B. O., Kim, J., Jeronimo, J., . . . Sankaranarayanan, R.** (2017). Interventions to close the divide for women with breast and cervical cancer between low-income and middle-income countries and high-income countries. *Lancet.* **389** (10071): 861-870. Doi:10.1016/S0140-6736(16)31795-0
- Doorbar, J.** (2018). Host control of human papillomavirus infection and disease. *Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol.* **47**: 27-41. Doi: 10.1016/j.bpobgyn.2017.08.001
- Doorbar, J., Egawa, N., Griffin, H., Kranjec, C., Murakami, I.** (2015). Human papillomavirus molecular biology and disease association. *Rev Med Virol.* **25** Suppl 1, 2-23. Doi: 10.1002/rmv.1822
- Doorbar, J., Quint, W., Banks, L., Bravo, I. G., Stoler, M., Broker, T. R., Stanley, M. A.** (2012). The biology and life-cycle of human papillomaviruses. *Vaccine.* **30** (Suppl 5): F55-70. Doi:10.1016/j.vaccine.2012.06.083
- Dweep, H., & Gretz, N.** (2015). miRWalk2.0: a comprehensive atlas of microRNA-target interactions. *Nat Methods.* **12** (8): 697. Doi: 10.1038/nmeth.3485
- Eroschenko, V. P.** (2008). Atlas of histology with functional correlation, female reproductive system. (Eleventh edition ed.). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Finnen, R. L., Erickson, K. D., Chen, X. S., Garcea, R. L.** (2003). Interactions between papillomavirus L1 and L2 capsid proteins. *J Virol.* **77** (8): 4818-4826. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12663788>.
- Gaffikin, L., Lauterbach, M., Blumenthal, P. D.** (2003). Performance of visual inspection with acetic acid for cervical cancer screening: A qualitative summary of evidence to date. *Obstet Gynecol Surv.* **58** (8): 543-550. Doi: 10.1097/01.ogx.0000079632.98372.26
- Glinge, C., Clauss, S., Boddum, K., Jabbari, R., Jabbari, J., Risgaard, B., . . . Tfelt-Hansen, J.** (2017). Stability of Circulating Blood-Based MicroRNAs - Pre-Analytic Methodological Considerations. *PLoS One.* **12** (2): e0167969. Doi:10.1371/journal.pone.0167969
- Harden, M. E., & Munger, K.** (2017). Human papillomavirus 16 E6 and E7 oncoprotein expression alters microRNA expression in extracellular vesicles. *Virology.* **508**: 63-69. Doi:10.1016/j.virol.2017.05.005
- Herfs, M., Yamamoto, Y., Laury, A., Wang, X., Nucci, M. R., McLaughlin-Drubin, M. E., . . . Crum, C. P.** (2012). A discrete population of squamocolumnar junction cells implicated in the pathogenesis of cervical cancer. *Proc Natl Acad Sci USA.* **109** (26): 10516-10521. Doi: 10.1073/pnas.1202684109

- Hildesheim, A., Schiffman, M., Bromley, C., Wacholder, S., Herrero, R., Rodríguez, A., . . . Burk, R. D.** (2001). Human papillomavirus type 16 variants and risk of cervical cancer. *J Natl Cancer Inst.* **93** (4): 315-318.
- Koliopoulos, G., Nyaga, V. N., Santesso, N., Bryant, A., Martin-Hirsch, P. P., Mustafa, R. A., . . . Arbyn, M.** (2017). Cytology versus HPV testing for cervical cancer screening in the general population. *Cochrane Database Syst Rev*, **8**, Cd008587. Doi: 10.1002/14651858.CD008587.pub2
- Kori, M., & Yalcin Arga, K.** (2018). Potential biomarkers and therapeutic targets in cervical cancer: Insights from the meta-analysis of transcriptomics data within network biomedicine perspective. *PLoS One.* **13** (7): e0200717. Doi: 10.1371/journal.pone.0200717
- Li, M. Y., & Hu, X. X.** (2015). Meta-analysis of microRNA expression profiling studies in human cervical cancer. *Med Oncol.* **32** (6): 510. Doi: 10.1007/s12032-015-0510-5
- Lopera, E. A., Baena, A., Flórez, V., Montiel, J., Duque, C., Ramírez, T., . . . Sánchez, G. I.** (2014). Unexpected inverse correlation between Native American ancestry and Asian American variants of HPV16 in admixed Colombian cervical cancer cases. *Infect Genet Evol.* **28**: 339-348. Doi: 10.1016/j.meegid.2014.10.014
- Luhn, P., Walker, J., Schiffman, M., Zuna, R. E., Dunn, S. T., Gold, M. A., . . . Wentzensen, N.** (2013). The role of co-factors in the progression from human papillomavirus infection to cervical cancer. *Gynecol Oncol.* **128** (2): 265-270. Doi: 10.1016/j.ygyno.2012.11.003
- Mirabello, L., Yeager, M., Cullen, M., Boland, J. F., Chen, Z., Wentzensen, N., . . . Schiffman, M.** (2016). HPV16 Sublineage associations with histology-specific cancer risk using hpv whole-genome sequences in 3200 women. *J Natl Cancer Inst.* **108** (9): 108-116. Doi: 10.1093/jnci/djw100
- Muñoz, N., Bosch, F. X., de Sanjosé, S., Herrero, R., Castellsagué, X., Shah, K. V., . . . Group, I. A. f. R. o. C. M. C. C. S.** (2003). Epidemiologic classification of human papillomavirus types associated with cervical cancer. *N Engl J Med.* **348** (6): 518-527. Doi: 10.1056/NEJMoa021641
- Muñoz, N., Castellsagué, X., de González, A. B., Gissmann, L.** (2006). Chapter 1: HPV in the etiology of human cancer. *Vaccine.* **24** (Suppl 3): S3/1-10. Doi: 10.1016/j.vaccine.2006.05.115
- Munger, K., & Howley, P. M.** (2002). Human papillomavirus immortalization and transformation functions. *Virus Res.* **89** (2): 213-228.
- Pim, D., & Banks, L.** (2010). Interaction of viral oncoproteins with cellular target molecules: Infection with high-risk vs low-risk human papillomaviruses. *Apmis.* **118** (6-7): 471-493. Doi: 10.1111/j.1600-0463.2010.02618.x
- Rodríguez, A. C., Schiffman, M., Herrero, R., Wacholder, S., Hildesheim, A., Castle, P. E., . . . Burk, R.** (2008). Rapid clearance of human papillomavirus and implications for clinical focus on persistent infections. *Journal of the National Cancer Institute.* **100** (7): 513-517. Doi: 10.1093/jnci/djn044
- Rodríguez, A. C., Schiffman, M., Herrero, R., Wacholder, S., Hildesheim, A., Castle, P. E., . . . Group, P. E. G.** (2008). Rapid clearance of human papillomavirus and implications for clinical focus on persistent infections. *J Natl Cancer Inst.* **100** (7): 513-517. Doi: 10.1093/jnci/djn044
- Roman, A., & Munger, K.** (2013). The papillomavirus E7 proteins. *Virology.* **445** (1-2): 138-168. Doi:10.1016/j.virol.2013.04.013
- Sanchez, G. I., Kleter, B., Gheit, T., van Doorn, L. J., de Koning, M. N., de Sanjosé, S., . . . Quint, W. G.** (2011). Clinical evaluation of polymerase chain reaction reverse hybridization assay for detection and identification of human papillomavirus type 16 variants. *J Clin Virol.* **51** (3): 165-169. Doi: 10.1016/j.jcv.2011.03.013
- Saslow, D., Solomon, D., Lawson, H. W., Killackey, M., Kulasingam, S. L., Cain, J., . . . Pathology, A. S. f. C.** (2012). American Cancer Society, American Society for Colposcopy and Cervical Pathology, and American Society for Clinical Pathology screening guidelines for the prevention and early detection of cervical cancer. *Am J Clin Pathol.* **137** (4): 516-542. Doi: 10.1309/AJCTGD94EVRSJCG
- Scheffner, M., Huibregtse, J. M., Vierstra, R. D., Howley, P. M.** (1993). The HPV-16 E6 and E6-AP complex functions as a ubiquitin-protein ligase in the ubiquitination of p53. *Cell.* **75** (3): 495-505.
- Schiffman, M., Herrero, R., Desalle, R., Hildesheim, A., Wacholder, S., Rodríguez, A. C., . . . Burk, R. D.** (2005). The carcinogenicity of human papillomavirus types reflects viral evolution. *Virology.* **337** (1): 76-84. Doi: 10.1016/j.virol.2005.04.002
- Stanczuk, G. A., Baxter, G. J., Currie, H., Forson, W., Lawrence, J. R., Cuschieri, K., . . . Arbyn, M.** (2017). Defining optimal triage strategies for hrhpv screen-positive women-an evaluation of HPV 16/18 genotyping, cytology, and p16/Ki-67 cytoimmunochemistry. *Cancer Epidemiol Biomarkers Prev.* **26** (11): 1629-1635. Doi: 10.1158/1055-9965.epi-17-0534
- Tornesello, M. L., Duraturo, M. L., Salatiello, I., Buonaguro, L., Losito, S., Botti, G., . . . Buonaguro, F. M.** (2004). Analysis of human papillomavirus type-16 variants in Italian women with cervical intraepithelial neoplasia and cervical cancer. *J Med Virol.* **74** (1): 117-126. Doi: 10.1002/jmv.20154
- Turchinovich, A., Weiz, L., Langheinz, A., Burwinkel, B.** (2011). Characterization of extracellular circulating microRNA. *Nucleic Acids Res.* **39** (16): 7223-7233. Doi: 10.1093/nar/gkr254
- van der Heijden, E., Lopes, A. D., Bryant, A., Bekkers, R., Galaal, K.** (2015). Follow-up strategies after treatment (large loop excision of the transformation zone (LLETZ)) for cervical intraepithelial neoplasia (CIN): Impact of human papillomavirus (HPV) test. *Cochrane Database Syst Rev.* **1**: Cd010757. DOI: 10.1002/14651858.CD010757.pub2
- Van Doorslaer, K.** (2013). Evolution of the papillomaviridae. *Virology.* **445**(1-2): 11-20. Doi: 10.1016/j.virol.2013.05.012
- Vande Pol, S. B., & Klingelutz, A. J.** (2013). Papillomavirus E6 oncoproteins. *Virology.* **445** (1-2): 115-137. Doi: 10.1016/j.virol.2013.04.026
- Vargas-Robles, D., Magris, M., Morales, N., de Koning, M. N. C., Rodríguez, I., Nieves, T., . . . Domínguez-Bello, M. G.** (2018). High rate of infection by only oncogenic human papillomavirus in Amerindians. *mSphere.* **3** (3). Doi: 10.1128/mSphere.00176-18

- Walboomers, J. M., Jacobs, M. V., Manos, M. M., Bosch, F. X., Kummer, J. A., Shah, K. V., . . . Muñoz, N.** (1999). Human papillomavirus is a necessary cause of invasive cervical cancer worldwide. *J Pathol.* **189** (1): 12-19. Doi: [10.1002/\(SICI\)1096-9896\(199909\)189:1<12::AID-PATH431>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9896(199909)189:1<12::AID-PATH431>3.0.CO;2-F)
- Wentzensen, N., Fetterman, B., Castle, P. E., Schiffman, M., Wood, S. N., Stiemerling, E., . . . Kinney, W.** (2015). p16/Ki-67 Dual stain cytology for detection of cervical precancer in HPV-positive women. *J Natl Cancer Inst.* **107** (12): djv257. Doi: [10.1093/jnci/djv257](https://doi.org/10.1093/jnci/djv257)
- Yamada, T., Manos, M. M., Peto, J., Greer, C. E., Munoz, N., Bosch, F. X., Wheeler, C. M.** (1997). Human papillomavirus type 16 sequence variation in cervical cancers: A worldwide perspective. *J Virol.* **71** (3): 2463-2472.
- Yeo-Teh, N. S. L., Ito, Y., & Jha, S.** (2018). High-Risk human papillomaviral oncogenes E6 and E7 target key cellular pathways to achieve oncogenesis. In *Int J Mol Sci.* **19**.
- Zsemlye, M.** (2013). LSIL: Definition and management. *Obstet Gynecol Clin North Am.* **40** (2): 283-289. Doi: [10.1016/j.ogc.2013.03.008](https://doi.org/10.1016/j.ogc.2013.03.008)

Efecto del contenido de Ni en las propiedades ópticas y eléctricas de recubrimientos ZrTiSiNiN depositados por co-sputtering

© Gina Milena Prieto-Novoa, © Estrella Natali Borja-Goyeneche, © Jhon Jairo Olaya-Florez*

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá

Resumen

Películas delgadas de ZrTiSiNiN fueron depositadas sobre sustratos de vidrio y silicio mediante co-sputtering reactivo con magnetron usando blancos de Ti_5Si_2 , Zr. En esta investigación se varió el contenido de Ni en los recubrimientos mediante la adición de cubos de Ni ubicados sobre el blanco de Zr. La morfología superficial, la estructura cristalina y el espesor de las películas fueron evaluadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD) e interferometría respectivamente. La resistividad eléctrica se midió mediante el método de cuatro puntas y sus propiedades ópticas se caracterizaron por espectroscopía ultravioleta / visible (UV/Vis). Con base en los resultados de XRD se observó que el Níquel actúa como refinador de grano al lograr disminuir el tamaño de cristalito de 27 nm hasta 15 nm cuando la concentración de Níquel aumenta de 0 at% a 6,8 at%. Tanto la resistividad eléctrica y el “band gap” óptico de los recubrimientos aumentaron con la disminución del tamaño del cristalito como resultado del aumento de la densidad de límites de grano y del efecto de confinamiento cuántico.

Palabras clave: ZrTiSiNiN; Propiedades ópticas; Resistividad eléctrica; Sputtering.

Effect of Ni content on the optical and electrical properties of ZrTiSiNiN thin films deposited by co-sputtering

Abstract

Thin films of ZrTiSiNiN have been deposited onto a glass and silicon substrates by reactive magnetron co-sputtering of pure Ti_5Si_2 , Zr alloy targets. In this investigation was located Ni pieces on Zr target in order to change the Ni amount in the films. The surface morphology and crystalline structure of the films were investigated by scanning electronic microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD) and interferometry respectively. The electrical resistivity was measured by the four-point probe method and their optical properties were characterized by ultraviolet/visible (UV/Vis) spectroscopy. XRD results showed that nickel works as a grain refiner because the crystallite size is reduced from 27 nm to 15 nm when the Ni concentration increases from 0 to% to 6.8 to%. Both the electrical resistance and the optical “band gap” of the coatings increased with the decrease in crystallite size because of the increase in the density of grain boundaries and the quantum confinement effect.

Key words: ZrTiSiNiN; Optical properties; Electrical resistivity; Sputtering.

Introducción

Con el rápido desarrollo de la tecnología, la demanda de películas multifuncionales y de alta calidad se encuentra en crecimiento. Los materiales usados en sistemas microelectromecánicos (MEMS) y microoptoelectromecánicos (MOEMS) combinan un buen comportamiento mecánico junto con propiedades electrónicas y ópticas deseadas para satisfacer los requerimientos de su uso (Crone, 2008).

Los recubrimientos multicomponentes de nitruros metálicos de transición están atrayendo un interés considerable, la aleación de diferentes componentes acarrea una mejora en la funcionalidad de los recubrimientos por medio del ajuste de su microestructura (Lind, *et al.*, 2011; Sangiovanni, 2013). En particular, con la adición de Zr a la estructura de TiN la resistencia a la corrosión y al desgaste y la dureza del recubrimiento mejoran gracias a la formación de capas

estables de óxido en la superficie y a un mecanismo de fortalecimiento de solución sólida respectivamente (Lin, *et al.*, 2010; Wang, *et al.*, 2000). Al dopar los recubrimientos de (Ti,Zr)N con un elemento insoluble, como lo es el Si, las propiedades como la dureza y la resistencia a la corrosión mejoran notablemente (Ebrahimi, 2012) debido a la formación de nanocompositos duros, en los cuales una fase dura amorfa de SiNx se forma en los límites de grano de (Ti,Zr)N (Saladukhin, *et al.*, 2015a). Otra forma de obtener nanocompositos duros es mediante la adición de una fase metálica blanda al recubrimiento de nitruro (Musil, *et al.*, 2014), fase que puede ser metálica como el Ni. Este

*Correspondencia:

Jhon Jairo Olaya-Florez; jjolaya@unal.edu.co

Recibido: 19 de febrero de 2019

Aceptado: 3 de junio de 2019

Editor: Román Castañeda

elemento no interactúa químicamente con el nitrógeno y se puede ubicar en los límites del núcleo de los nitruros, actuando como un refinador de grano (Belov, *et al.*, 2014; Zhang, *et al.*, 2005).

Pocos son los trabajos previos relacionados con la síntesis y caracterización del recubrimiento multicomponente ZrTiSiNiN. Se conoce el trabajo donde se estudia la microestructura y resistencia a la corrosión del recubrimiento (Zr, Si, Ti)N-Ni (Borja-Goyeneche & Olaya-Florez, 2018). Otros trabajos reportan las propiedades microestructurales y mecánicas del recubrimiento cuaternario TiZrSiN (Saladukhin, *et al.*, 2015; Kirik, *et al.*, 2012; Pogrebñjak, *et al.*, 2012). En el presente trabajo se fabrican por co-sputtering reactivo recubrimientos multifásicos de ZrTiSiNiN variando el contenido de Ni, con el objetivo de proporcionar información sobre el efecto del contenido de Ni sobre las propiedades eléctricas y ópticas del recubrimiento. Los resultados de esta investigación constituyen un aporte importante que puede ser usado como referencia para otros autores.

Materiales y métodos

Se fabricaron películas delgadas de ZrTiSiNiN con la técnica de co-sputtering DC-RF y depositados a temperatura ambiente sobre sustratos de vidrio y silicio (100) los cuales fueron previamente limpiados con acetona e isopropanol en ultrasonido y secados con nitrógeno. La cámara de vacío se encuentra conectada a una bomba turbo molecular y una rotativa con que se alcanza una presión base de $9,5 \times 10^{-4}$ Pa. Se usaron blancos de Zr y Ti_5Si_2 con pureza del 99,95% los cuales se conectaron a una fuente DC y RF respectivamente. Sobre el área de mayor erosión del blanco de Zr se ubicaron cubos de Ni de tamaño $3 \times 3 \times 3$ mm y pureza del 99,99%, la cantidad de estos cubos se varió de 0 a 4 con el fin de aumentar el contenido de Ni en el recubrimiento. Se estableció un tiempo de deposición de 1 hora, tiempo necesario para obtener recubrimientos con espesores de $1 \mu\text{m}$ aproximadamente. En la figura 1 se muestra un diagrama esquemático del sistema usado para la fabricación de los recubrimientos y en la tabla 1 se resumen los parámetros de fabricación empleados.

Los recubrimientos producidos se caracterizaron por medio de diferentes técnicas analíticas. Para el análisis elemental y de morfología superficial se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) usando un equipo TESCAN VEGA3 con un sistema de microanálisis por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés) con un voltaje de aceleración de 15 keV. El estudio de la microestructura se llevó a cabo por difracción de rayos X (XRD, por siglas en inglés) empleando un sistema Panalitical en modo Bragg-Brentano con radiación Cu-K α (35 mA, 40 kV) con una velocidad de escaneo de $0,02^\circ/\text{s}$ y usando un detector tipo centelleante. Los espesores de las películas se obtuvieron mediante interferometría con el microscopio óptico 3D Bruker ContourGT-K. La rugosidad de los recubrimientos

fue determinada con el perfilómetro Dektak 150 Surface Profiler. Las propiedades ópticas fueron estudiadas por espectroscopía (UV/Vis) con el espectrofotómetro Cary 5000 UV-VIS-NIR. La resistividad eléctrica de los recubrimientos se midió usando el método convencional de cuatro puntas (FPP, por sus siglas en inglés) en configuración lineal y a temperatura ambiente.

Resultados y discusión

Composición química elemental. En la tabla 2 se muestra la composición química de los recubrimientos ZrTiSiNiN fabricados por co-sputtering reactivo. Se puede observar que el porcentaje de concentración atómica de Ni en los recubrimientos es directamente proporcional con la cantidad de cubos de Ni usados en la deposición, logrando una variación entre 0 – 6,8 at% Ni. Con el aumento de la concentración de Ni, las concentraciones de Si y Ti permanecen aproximadamente constantes, mientras que la concentración de Zr disminuye, lo que podría indicar que los átomos de Ni entran a la solución sólida de (Ti,Zr,Si)N por sustitución de los átomos de Zr para formar la solución sólida (Ti,Zr,Si,Ni)N.

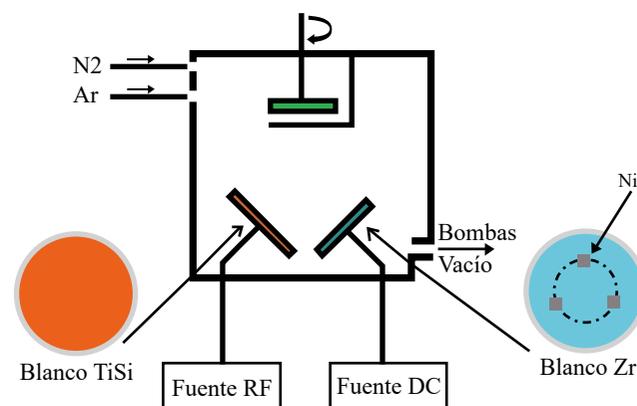


Figura 1. Diagrama esquemático sistema de deposición.

Tabla 1. Parámetros deposición películas de ZrTiSiNiN

Parámetro	Valor
Presión base (Pa)	$9,5 \times 10^{-4}$
Presión de trabajo (Pa)	0,4
Flujo N_2 (sccm)	2
Flujo Ar (sccm)	14
Tiempo deposición (h)	1
Potencia DC (W)	200
Potencia RF (W)	170
Distancia sustrato-blancos (m)	$10,2 \times 10^{-2}$
Temperatura sustrato ($^\circ\text{C}$)	28 (ambiente)
Cantidad cubos de níquel	0,1,2,3,4

Tabla 2. Composición elemental de las películas ZrTiSiNiN fabricadas

# Cubos de Ni	Nombre muestra	Zr (at%)	Si (at%)	Ti (at%)	Ni (at%)
0	ZrTiSiN-0Ni	72,3±0,2	11,8±0,4	15,8±0,3	0
1	ZrTiSiN-1Ni	68,8±0,7	12,7±0,5	16,6±0,2	2,6±0,2
2	ZrTiSiN-2Ni	66,2±0,5	12,6±0,4	16,5±0,2	4,0±0,3
3	ZrTiSiN-3Ni	65,1±0,4	12,8±0,4	16,8±0,3	5,4±0,1
4	ZrTiSiN-4Ni	62,0±0,5	13,2±0,2	17,6±0,2	6,8±0,3

Espesor. Con el fin de obtener películas delgadas con un mismo espesor, todos los recubrimientos se fabricaron con un mismo tiempo de deposición. Para el presente trabajo se manejó un tiempo de deposición de 1 hora para obtener recubrimientos de aproximadamente 1 μm . El espesor medido para cada recubrimiento se puede observar en la tabla 3.

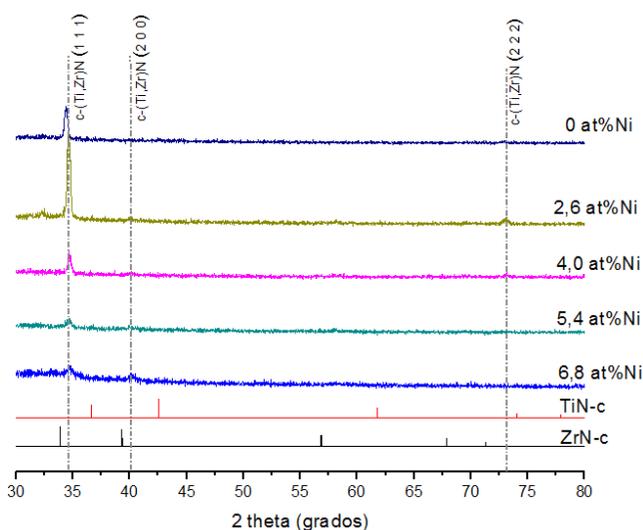
Caracterización microestructural. La figura 2 muestra los patrones XRD de las películas de ZrTiSiNiN depositadas sobre vidrio en función de la concentración de Ni, adicionalmente también se grafican los picos de referencia para ZrN (JCPDS 78-1420) y TiN (JCPDS 87-0633). Se puede observar que los picos de los patrones DRX de los recubrimientos producidos se localizan entre los picos del ZrN y TiN, con valores 2θ de $34,76^\circ$, $40,15^\circ$ y $73,13^\circ$, correspondiendo con los planos (111), (200) y (222) de la fase (Ti,Zr)N con estructura cristalina FCC. Estos valores concuerdan con la tarjeta JCPDS 89-5214 y trabajos previos donde estudian recubrimientos de TiZrN (Kaliaraj, *et al.*, 2015; Chinsakolthanakorn, *et al.*, 2012) y TiZrSiN (Uglov, *et al.*, 2015; Saladukhin, *et al.*, 2015b), ambos depositados por co-sputtering reactivo.

En el patrón XRD obtenido no se observan picos de Si, Ni o de sus compuestos, indicando que éstos podrían estar en forma amorfa dentro del recubrimiento. En el caso del Si, éste reacciona con el N formando una fase amorfa a-SiNx, justificando así la ausencia de este elemento en el patrón DRX. Para el caso del Ni, la ausencia de sus picos puede deberse a la formación de una fase amorfa a-SiNx(Ni) (Zhang, *et al.*, 2005), o a la baja concentración de Ni presente en el recubrimiento ya que éste podría ser observado por DRX si supera una concentración de 39,8 at% (Wang, *et al.*, 2013).

Los recubrimientos depositados sobre vidrio muestran una variación en la orientación preferencial en plano (111), cuya intensidad depende de la concentración de Ni, indicando que la cristalinidad del recubrimiento depende de la concentración de Ni en éste. En el recubrimiento fabricado sin Ni se observa el pico del plano (111) de la fase c-(Ti,Zr)N, sin embargo al aumentar la concentración de Ni a 2,6 at% se presenta una mejora en la cristalinidad del recubrimiento debido al aumento de las intensidades de los picos, lográndose apreciar una orientación mixta con tres picos correspondientes a los planos (111), (200) y (222) de la fase c-(Ti,Zr)N. Al seguir aumentando la concentración

Tabla 3. Espesores películas de ZrTiSiNiN

Nombre Muestra	Espesor (μm)
ZrTiSiN-0Ni	1,21±0,01
ZrTiSiN-1Ni	1,19±0,01
ZrTiSiN-2Ni	1,18±0,01
ZrTiSiN-3Ni	1,19±0,01
ZrTiSiN-4Ni	1,20±0,01

**Figura 2.** Patrón de difracción de rayos X de películas de ZrTiSiNiN en función de la concentración de Ni. En la parte inferior picos de referencia para ZrN-c (JCPDS 78-1420) y TiN-c (JCPDS 87-0633).

de Ni hasta un máximo de 6,8% se observa una disminución progresiva en la intensidad de los picos y un aumento su anchura, indicando una disminución de la cristalinidad de los recubrimientos.

La concentración de Ni en el recubrimiento tiene efecto importante sobre el tamaño de cristalito, el cual fue determinado a partir del pico (111) usando la fórmula Scherrer (Scherrer, 1918). En la figura 3a se grafica el tamaño de cristalito en función de la concentración de Ni, en donde se muestra una disminución del tamaño del cristalito desde 27 nm hasta 15 nm cuando la concentración de Ni aumenta desde 0 hasta 6,8 at%. Estudios previos sobre el efecto de

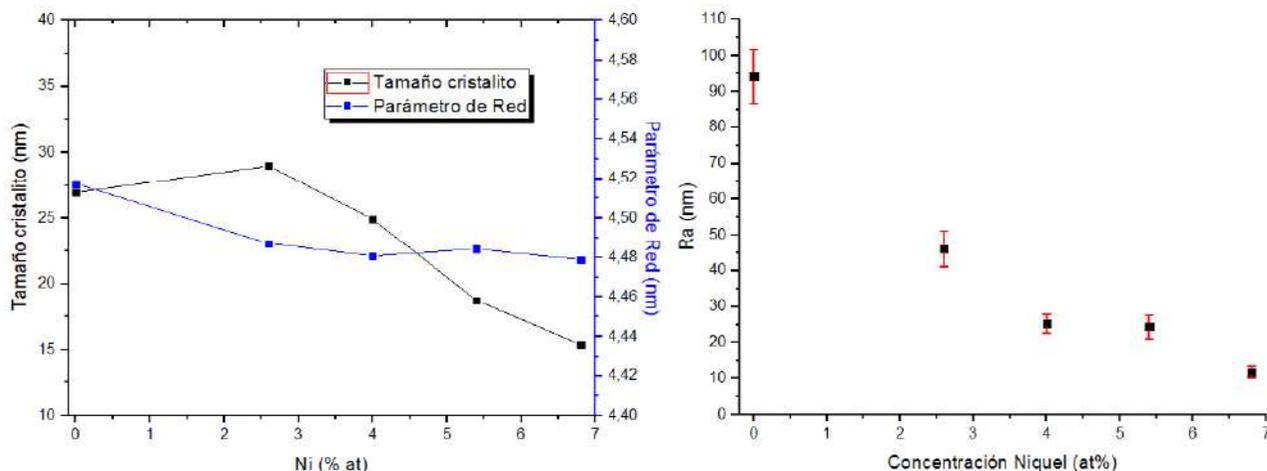


Figura 3. a) Tamaño de cristalito y parámetro de red de recubrimientos de ZrTiSiNiN en función de la concentración de Ni. **b)** Rugosidad promedio de recubrimientos de ZrTiSiNiN en función de la concentración de Ni.

la adición de Ni en recubrimientos de TiN (Akbari, *et al.*, 2006), nc-TiN/a-SiNx (Zhang, *et al.*, 2005) y nc-CrAlN/a-SiNx (Wang, *et al.*, 2013) han demostrado que el níquel funciona como un refinador de grano, en donde sus átomos forman una fase amorfa intergranular que impide el crecimiento del grano, al igual que lo hace el Si al generar la fase amorfa a-SiNx.

Además de observarse cambios en la amplitud y ancho de los picos del patrón de difracción de los recubrimientos fabricados, también se presentó un corrimiento del pico (111) hacia ángulos 2θ mayores con la adición de Ni, en comparación con el recubrimiento sin Ni. Este corrimiento indica una disminución en el parámetro de red, tal como se puede observar en la figura 3a, efecto que puede deberse por la sustitución de átomos de Zr por átomos de menor tamaño en este caso por átomos de Ni o Ti. Debido a que en el presente estudio la máxima concentración de Ni lograda fue de 6,8 at%, no se logra observar grandes cambios en el parámetro de red en función de la concentración de Ni. Sin embargo, la dependencia del parámetro de red con la concentración de Ni se logra observar claramente en trabajos previos en los que la concentración de Ni es alta (Lindahl, *et al.*, 2018; Zhang, *et al.*, 2005).

Morfología superficial y rugosidad. Imágenes SEM de la morfología superficial de los recubrimientos ZrTiSiNiN con diferentes concentraciones de Níquel se representan en la figura 4. Se puede observar que el número y tamaño de los defectos superficiales en los recubrimientos disminuye con el aumento del contenido de Ni. La morfología superficial presentada por los recubrimientos fabricados coincide con la reportada en trabajos previos (Pilloud, *et al.*, 2003), en donde recubrimientos de ZrN fabricados por sputtering muestran una morfología superficial con defectos tipo nodular, los cuales son propios de recubrimientos duros fabricados por sputtering (Panjan, *et al.*, 2012) y que, principalmente, se generan en el proceso de fabricación por contaminación de partículas extrañas en la superficie del sustrato.

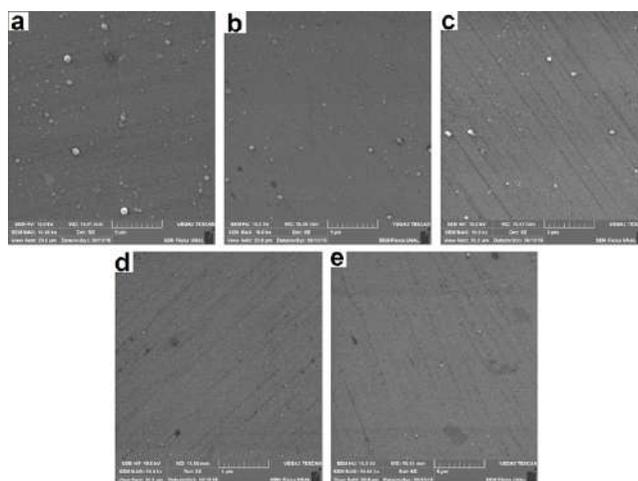


Figura 4. Imágenes SEM de la morfología superficial de los recubrimientos ZrTiSiNiN con diferentes concentraciones de Níquel: a) 0 at% b) 2,6 at% c) 4,0 at% d) 5,4 at% e) 6,8 at%. Aumento de 10kX.

La disminución de defectos superficiales conlleva a una disminución en la rugosidad superficial de los recubrimientos, tal y como se muestra en la figura 3b, en donde se grafica la rugosidad promedio de los recubrimientos de ZrTiSiNiN en función de la concentración de Ni. Se observa que la rugosidad de los recubrimientos disminuye con la adición de Ni, pasando de 94 nm a 12 nm cuando la concentración de Ni aumenta de 0 at% a 6,8 at%. Este mismo efecto del Ni sobre la rugosidad del recubrimiento se observó en recubrimientos de CrNiN fabricados por sputtering (Tan, *et al.*, 2015).

Caracterización óptica. Los espectros de reflectancia, transmitancia y absorbancia óptica de los recubrimientos de ZrTiSiNiN con diferentes concentraciones de Ni y depositados sobre vidrio son mostrados en la figura 5. Se puede observar que la totalidad de la radiación electromagnética

que incide sobre los recubrimientos es absorbida, ya que la suma de la transmitancia y la reflectancia no superan el 3%. Esta alta absorbancia puede deberse a una alta densidad en defectos intrínsecos del material (puntuales o lineales), defectos que son propios de los recubrimientos duros como los nitruros (Mayrhofer, *et al.*, 2006) y cuya densidad aumenta con la adición de elementos aleantes y el espesor del recubrimiento. En nuestro caso, al fabricar recubrimientos multicomponentes (5 componentes) y con un alto espesor ($>1\mu\text{m}$), la densidad de defectos intrínsecos es alta y con ella la absorbancia del recubrimiento, ya que estos defectos actúan como centros de absorción. Es por esta razón que en la literatura se encuentran estudios relacionados con propiedades ópticas en recubrimientos con espesores que en su mayoría no superan los 300nm.

Para longitudes de ondas mayores a 1400 nm el aumento en la concentración de Ni afecta la transmitancia y absorbancia de los recubrimientos de ZrTiSiNiN, mientras que para longitudes menores no se observa un efecto claro. Para longitudes de onda mayores a 1400 nm, la transmitancia y

absorbancia tienen un comportamiento similar al del tamaño de cristalito con la adición de Ni, en donde al disminuir el tamaño de cristalito la transmitancia aumenta y la absorbancia disminuye. Si la longitud de onda es menor solo se observa que la transmitancia disminuye y la absorbancia aumenta cuando la concentración de Ni pasa de 0 at% a 2,6 at%, después se mantienen aproximadamente constante independientemente del contenido de Ni en el recubrimiento.

Con el aumento de la concentración de Ni la reflectancia óptica disminuye en todo el rango de longitudes de onda estudiadas (300 nm-2500 nm). Esta disminución en la reflectancia puede deberse a la disminución de la rugosidad superficial de los recubrimientos, disminución que se logró con el aumento de la concentración de Ni. Estudios previos han demostrado que las superficies rugosas causan una mayor dispersión de la luz, lo que conduce a una mayor reflectancia (Lee, *et al.*, 2012).

Para calcular la energía de la banda prohibida (band gap óptico) se usa la relación de Tauc (Tauc, 1974):

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_{\text{gap}})^n, \quad (1)$$

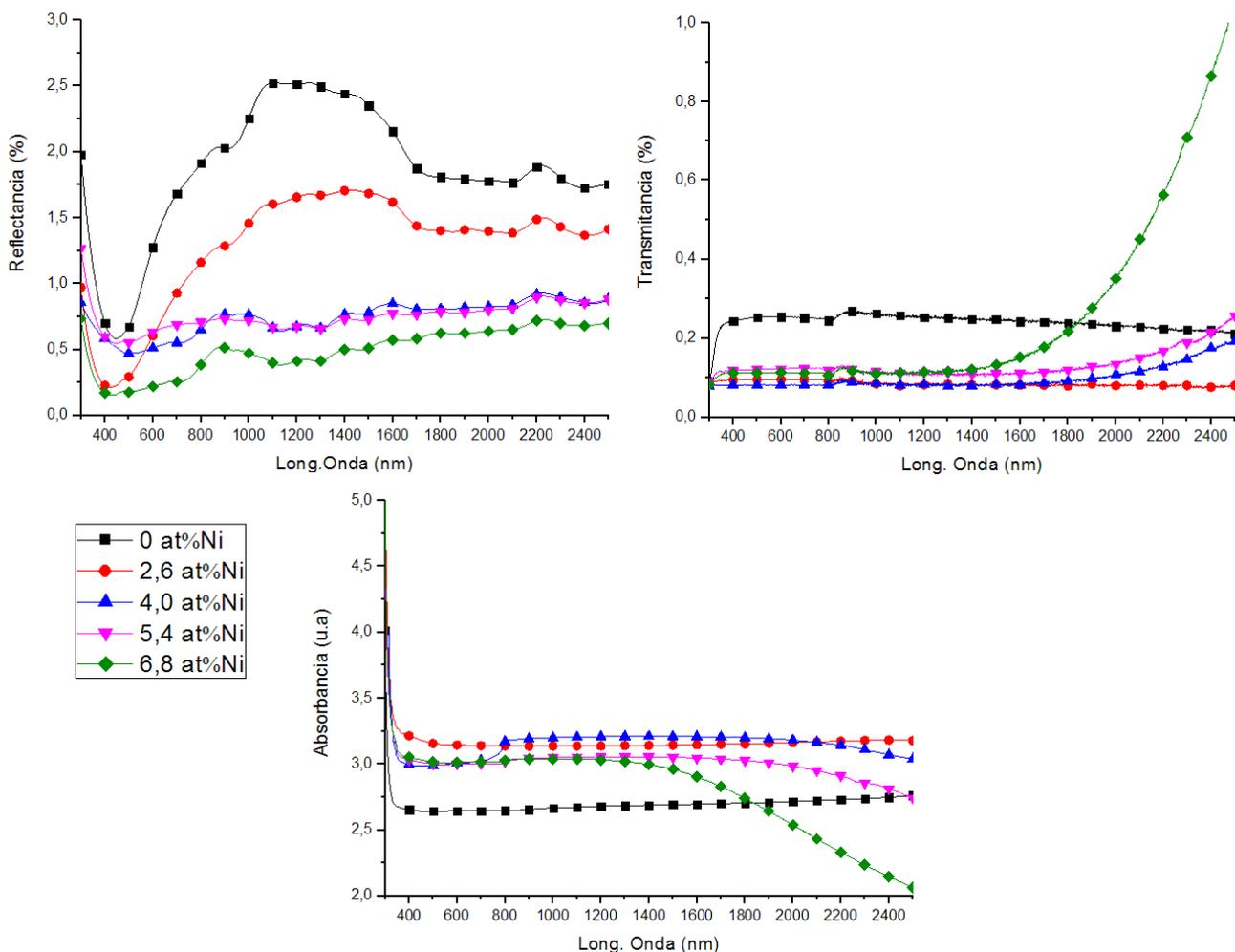


Figura 5. Reflectancia, Transmitancia y Absorbancia en función de la longitud de onda para recubrimientos de ZrTiSiNiN con diferentes concentraciones de Ni.

donde α es el coeficiente de absorción, A es una constante, h es la constante de Planck, ν es la frecuencia del fotón, E_{gap} es el band gap óptico y n es el exponente que caracteriza la transición electrónica. Para este trabajo se usó $n = 1/2$ para analizar el caso de las transiciones directas permitidas, y se halló el coeficiente de absorción con la relación $\alpha = 2.303 A/t$, siendo A la absorbancia de la película y t es su espesor (Mathew, *et al.*, 2008). Así, el E_{gap} se obtiene hallando el cruce por cero de la extrapolación lineal de la gráfica $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$, como se puede observar en la figura 6a.

Los valores de energía de la banda prohibida E_{gap} en función de la concentración de Ni son mostrados en la figura 6b. Se puede observar que el comportamiento del E_{gap} es inversamente proporcional al presentado por el tamaño del cristalito (Figura 3a), cuando el tamaño del cristalito es mínimo el E_{gap} es máximo, y cuando el tamaño de cristalito es máximo el E_{gap} es mínimo. Para una concentración de 2,6 at% Ni se observó el máximo valor para el tamaño del cristalito (27 nm) y el mínimo valor para el E_{gap} (3,7 eV), mientras que para la concentración de 6,8 at% Ni se observó el mínimo valor para el tamaño del cristalito (15 nm) y el máximo valor del E_{gap} (4,1).

El aumento de E_{gap} con la disminución del tamaño del cristalito puede deberse al efecto del tamaño cuántico de las nanoestructuras del recubrimiento ZrTiSiNiN. A medida que disminuye el tamaño de los materiales a escala nanométrica se produce un confinamiento del movimiento de los electrones y huecos, conduciendo a la discretización de sus niveles de energía y un aumento en la diferencia de energía entre los estados llenos y vacíos (Singh, Goyal, & Devlal, 2018; Smith & Nie, 2010), es decir que el ancho de la banda prohibida aumenta al igual que lo hace su energía E_{gap} . Trabajos previos han demostrado este mismo comportamiento que relaciona el tamaño de cristalito y el E_{gap} en películas delgadas de SnS (Jain & Arun, 2013), TiO₂ (Avinash, *et al.*, 2016) y CdIn₂Se₄ (Sudha, *et al.*, 2016).

Caracterización eléctrica. Las curvas de voltaje en función de la corriente obtenidas a temperatura ambiente para recubrimientos de ZrTiSiNiN con diferentes concentraciones de Ni se muestran en la figura 7a. Se observa que todos los recubrimientos a temperatura ambiente presentan un comportamiento eléctrico lineal óhmico, cuya pendiente representa la resistencia del material.

A partir de los datos obtenidos con el método de cuatro puntas y aplicando los factores de corrección correspondientes se halla la resistividad eléctrica a temperatura ambiente de los recubrimientos ZrTiSiNiN. Las resistividades obtenidas se encuentran entre el rango de $2,88 \times 10^4 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ a $3,14 \times 10^5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ para una variación del contenido de Ni entre 0 at% y 6,8 at%, respectivamente.

Las resistividades obtenidas en el presente trabajo superan por cuatro órdenes de magnitud los valores de resistividades reportados en el trabajo de (Lin, *et al.*, 2016), en donde obtuvieron recubrimientos de TiZrN con resistividad eléctrica promedio de $126 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ mediante sputtering DC con magnetrón desbalanceado. La alta resistividad que presentaron los recubrimientos de ZrTiSiNiN, en comparación con los de TiZrN, se debe a que tanto los átomos de Si como de Ni actúan como impurezas las cuales aumentan la dispersión de electrones conductores libres y disminuyen su camino libre medio, por lo tanto, la resistividad eléctrica del material aumenta. Trabajos previos sobre películas delgadas de ZrSiN (Sandu, *et al.*, 2007; Pilloud, *et al.*, 2006) han reportado resistividades eléctricas del mismo orden de magnitud que las halladas en el presente trabajo.

Las resistividades en función del contenido de Ni se muestran en la figura 7b, en donde se observa, como era de esperarse, el aumento de la resistividad eléctrica con el aumento de la concentración de Ni en el recubrimiento. La resistividad eléctrica en materiales nanométricos está influenciada principalmente por los límites de grano y en un menor grado por imperfecciones de la red como vacancias

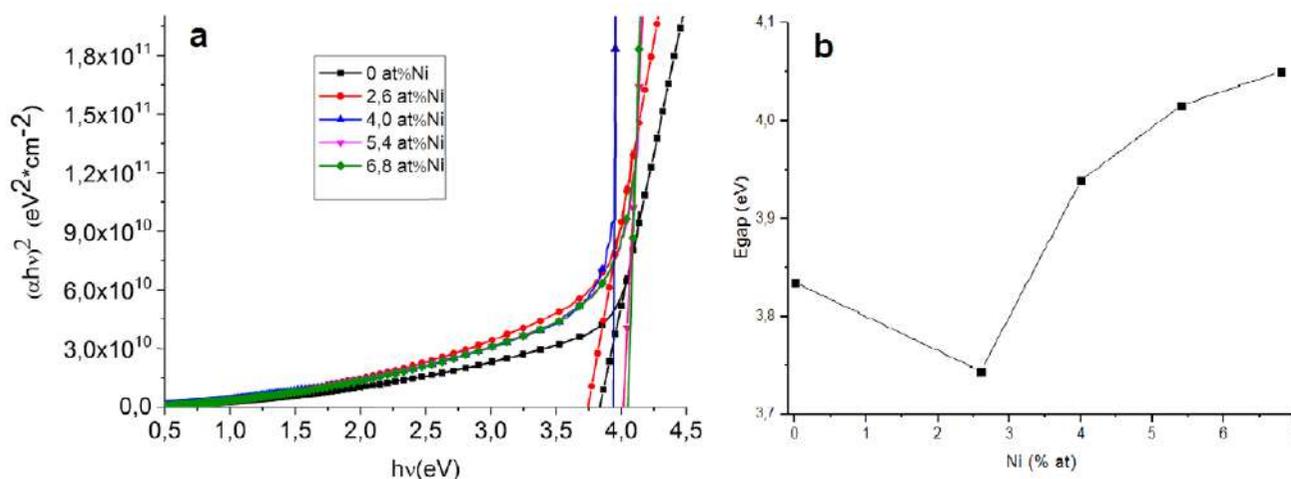


Figura 6. a) Cálculo de la banda de energía prohibida E_{gap} para recubrimientos de ZrTiSiNiN con diferentes concentraciones de Ni. **b)** Energía de la banda prohibida E_{gap} en función de la concentración de níquel de recubrimientos de ZrTiSiNiN.

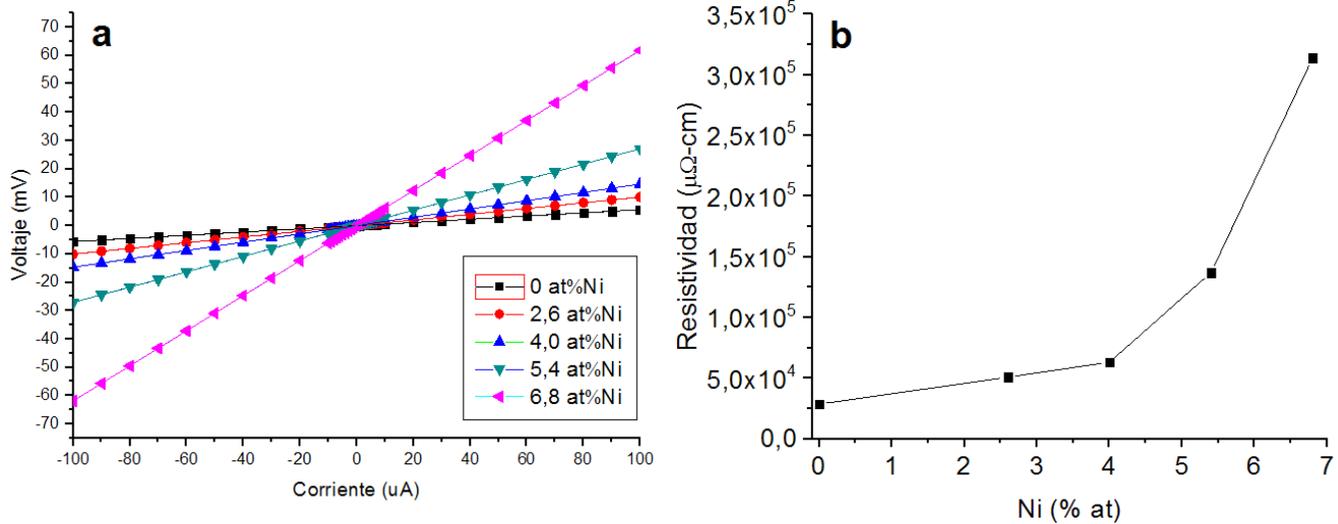


Figura 7. a) Corriente vs Voltaje para recubrimientos de ZrTiSiNiN con diferentes concentraciones de Ni. **b)** Resistividad eléctrica en función de la concentración de níquel de recubrimientos de ZrTiSiNiN.

y dislocaciones (Vemuri, *et al.*, 2010). Los límites de grano actúan como centros de dispersión adicionales para los electrones de conducción (Marom, *et al.*, 2006), por lo tanto, con la disminución del tamaño de cristalito el volumen del límite de grano aumenta, conllevando un incremento en la resistividad eléctrica.

Conclusiones

Se estudió la influencia de la adición de Ni en las propiedades ópticas y eléctricas de los recubrimientos de ZrTiSiNiN depositados sobre vidrio y silicio mediante la técnica de co-sputtering reactivo. La concentración de Ni se varió desde 0 at% hasta 6,8 at%, rango en el que se observó que al aumentar la concentración de Ni el tamaño de cristalito disminuyó desde 27 nm hasta 15 nm, corroborando el efecto del Ni como refinador de grano.

Al aumentar la concentración de Ni en los recubrimientos la resistividad eléctrica también aumentó desde $2,88 \times 10^4 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ hasta $3,14 \times 10^5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, este aumento en la resistividad puede deberse a que los átomos Ni adicionados actúan como impurezas que disminuyen el camino libre medio de los electrones generando un aumento en la resistividad eléctrica del recubrimiento.

Se observó que la totalidad de la radiación electromagnética que incide sobre los recubrimientos de ZrTiSiNiN es absorbida. Esta alta absorción se debe a que se fabricaron recubrimientos duros multicomponente con espesores mayores a $1 \mu\text{m}$, lo que conllevó una alta densidad de defectos intrínsecos, defectos que se comportan como centros de absorción.

El "band gap" óptico de los recubrimientos fabricados aumentó de 3,8 eV a 4,1 eV cuando el contenido de Ni incrementó desde 0 at% hasta 6,8 at%. Este valor de E_{gap} es inversamente proporcional al tamaño del cristalito del recubrimiento y es debido al confinamiento cuántico.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero recibido para llevar a cabo esta investigación por parte del Llamado Nacional para Jóvenes Investigadores e Innovadores 2016 de Colciencias. Esta investigación fue financiada por la Universidad Nacional Colombia a través del proyecto 37935.

Contribución de los autores

Gina Milena Prieto-Novoa, estudiante encargada de realizar la caracterización de los recubrimientos y la redacción del artículo; Estrella Natali Borja-Goyeneche, estudiante encargada de fabricar los recubrimientos del artículo; Jhon Jairo Olaya-Florez, docente encargado de liderar y asesorar la fabricación y caracterización de los recubrimientos, al igual que la escritura del artículo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Akbari, A., Riviere, J. P., Templier, C., & Le Bourhis, E. (2006). Structural and mechanical properties of IBAD deposited nanocomposite Ti-Ni-N coatings. *Surface and Coatings Technology*, **200** (22-23 SPEC. ISS.), 6298-6302. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.11.046>
- Avinash, B. S., Chaturmukha, V. S., Jayanna, H. S., Naveen, C. S., Rajeeva, M. P., Harish, B. M., ... Lamani, A. R. (2016). Effect of particle size on band gap and DC electrical conductivity of TiO₂ nanomaterial (p. 20426). <https://doi.org/10.1063/1.4946477>
- Belov, D. S., Blinkov, I. V., & Volkhonskii, A. O. (2014). The effect of Cu and Ni on the nanostructure and properties of arc-PVD coatings based on titanium nitride. *Surface and Coatings Technology*, **260**: 186-197. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2014.09.069>

- Borja-Goyeneche, E. N., & Olaya-Florez, J. J.** (2018). A microstructural and corrosion resistance study of (Zr, Si, Ti)N-Ni coatings produced through co-sputtering. *DYNA*. **85** (207): 192-197. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.73304>
- Chinsakolthanakorn, S., Buranawong, A., Witit-Anun, N., Chaiyakun, S., & Limsuwan, P.** (2012). Characterization of nanostructured TiZrN thin films deposited by reactive DC magnetron co-sputtering. *Procedia Engineering*. **32**: 571-576. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1310>
- Crone, W. C.** (2008). A Brief Introduction to MEMS and NEMS. In Springer-Verlag (Ed.), *Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.111.3275&rep=rep1&type=pdf>
- Ebrahimi, F.** (2012). *Nanocomposites New Trends and Developments*. <https://doi.org/10.5772/3389>
- Jain, P., & Arun, P.** (2013). Influence of grain size on the band-gap of annealed SnS thin films. *Thin Solid Films*. **548**: 241-246. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.09.089>
- Kaliaraj, G. S., Vishwakarma, V., Ramadoss, A., Ramachandran, D., & Rabel, A. M.** (2015). Corrosion, haemocompatibility and bacterial adhesion behavior of TiZrN-coated 316L SS for bioimplants. *Bulletin of Materials Science*. **38**(4): 951-955. <https://doi.org/10.1007/s12034-015-0949-1>
- Kirik, G. V., Kozak, C., & Opielak, M.** (2012). Protective coatings based on Zr-Ti-Si-N their physical and mechanical properties and phase composition. *Przegląd Elektrotechniczny*. **88** (10 A): 319-321. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84867220104&partnerID=ZOTx3y1>
- Lee, C. H., Guo, F. G., & Chu, C. C.** (2012). The Thickness Dependent of Optical Properties, Resistance, Strain and Morphology of Mo Thin Films for The Back Contact of CIGS Solar Cells. *Chinese Journal of Physics*. **50** (2): 311-321.
- Lin, Y.-W., Huang, J.-H., & Yu, G.-P.** (2010). Effect of nitrogen flow rate on properties of nanostructured TiZrN thin films produced by radio frequency magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. **518** (FEBRUARY 2005): 7308-7311. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.04.099>
- Lin, Y.-W., Lu, C.-W., Yu, G.-P., & Huang, J.-H.** (2016). Structure and Properties of Nanocrystalline (TiZr) x N 1-x Thin Films Deposited by DC Unbalanced Magnetron Sputtering. *Journal of Nanomaterials*. **2016**: 1-12. <https://doi.org/10.1155/2016/2982184>
- Lind, H., Forsén, R., Alling, B., Ghafoor, N., Tasnádi, F., Johansson, M. P., ... Odén, M.** (2011). Improving thermal stability of hard coating films via a concept of multi-component alloying. *Applied Physics Letters*. **99** (9): 91903. <https://doi.org/10.1063/1.3631672>
- Lindahl, E., Ottosson, M., & Carlsson, J. O.** (2018). Doping of metastable Cu₃N at different Ni concentrations: Growth, crystallographic sites and resistivity. *Thin Solid Films*. **647** (June 2017): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.12.010>
- Marom, H., Ritterband, M., & Eizenberg, M.** (2006). The contribution of grain boundary scattering versus surface scattering to the resistivity of thin polycrystalline films. *Thin Solid Films*. **510** (1-2): 62-67. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.155>
- Mathew, S., Menon, C. S., & Sudarsanakumar, C.** (2008). Effect of thickness on the absorption spectra of GaPcCl, SnPcO and AlPcOH thin films. *Optoelectronics and Advanced Materials, Rapid Communications*. **2** (6): 349-352.
- Mayrhofer, P. H., Mitterer, C., Hultman, L., & Clemens, H.** (2006, November 1). Microstructural design of hard coatings. *Progress in Materials Science*. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2006.02.002>
- Musil, J., Zeman, P., & Baroch, P.** (2014). *Hard Nanocomposite Coatings. Comprehensive Materials Processing* (Vol. 4). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00416-7>
- Panjan, P., Čekada, M., Panjan, M., Kek-Merl, D., Zupanič, F., Čurković, L., & Paskvale, S.** (2012). Surface density of growth defects in different PVD hard coatings prepared by sputtering. *Vacuum*. **86** (6): 794-798. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2011.07.013>
- Pilloud, D., Dehlinger, A. S., Pierson, J. F., Roman, A., & Pichon, L.** (2003). Reactively sputtered zirconium nitride coatings: structural, mechanical, optical and electrical characteristics. *Surface and Coatings Technology*. **174-175**: 720-724. <https://doi.org/10.1016/S0257-8972>
- Pilloud, D., Pierson, J. F., & Pichon, L.** (2006). Influence of the silicon concentration on the optical and electrical properties of reactively sputtered Zr-Si-N nanocomposite coatings. *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*. **131** (1-3): 36-39. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2006.03.017>
- Pogrebniak, A. D., Shpak, A. P., Beresnev, V. M., Kolesnikov, D. A., Kunitiskii, Y. A., Sobol, O. V., ... Grudnitskii, V. V.** (2012). Effect of Thermal Annealing in Vacuum and in Air on Nanograin Sizes in Hard and Superhard Coatings Zr-Ti-Si-N. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. **12** (12): 9213-9219. <https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6777>
- Ramana, C. V., Smith, R. J., & Hussain, O. M.** (2003). Grain size effects on the optical characteristics of pulsed-laser deposited vanadium oxide thin films. *Physica Status Solidi (A) Applied Research*. **199** (1): 5-7. <https://doi.org/10.1002/pssa.200309009>
- Saladukhin, I. A., Abadias, G., Michel, A., Uglov, V. V., Zlotski, S. V., Dub, S. N., & Tolmachova, G. N.** (2015). Structure and hardness of quaternary TiZrSiN thin films deposited by reactive magnetron co-sputtering. *Thin Solid Films*. **581**: 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.020>
- Saladukhin, I. A., Abadias, G., Michel, A., Uglov, V. V., Zlotski, S. V., Dub, S. N., & Tolmachova, G. N.** (2015). Structure and hardness of quaternary TiZrSiN thin films deposited by reactive magnetron co-sputtering. *Thin Solid Films*. **581**: 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.020>
- Sandu, C. S., Medjani, F., & Sanjinés, R.** (2007). *OPTICAL AND ELECTRICAL PROPERTIES OF SPUTTERED Zr-Si-N THIN FILMS: FROM SOLID SOLUTION TO NANOCOMPOSITE*. *Rev. Adv. Mater. Sci* (Vol. 15). Retrieved from http://phys.mech.nw.ru/e-journals/RAMS/no_31507/sandu.pdf
- Sangiovanni, D. G.** (2013). *Transition Metal Nitrides Alloy Design and Surface Transport Properties using Ab-initio and Classical Computational Methods*. Linköping University. Retrieved from <https://liu.diva-portal.org/smash/get/diva2:617410/FULLTEXT01.pdf>
- Sherrer, P.** (1918). Estimation of size and internal structural of colloidal particles by mean of Rontgen rays. *Göttinger Nachrichten Math. Phys.* **2**: 98-100.
- Singh, M., Goyal, M., & Devlal, K.** (2018). Size and shape effects on the band gap of semiconductor compound nanomaterials. *Journal of Taibah University for Science*. **12**(4): 470-475. <https://doi.org/10.1080/16583655.2018.1473946>

- Smith, A. M., & Nie, S.** (2010). Semiconductor nanocrystals: structure, properties, and band gap engineering. *Accounts of Chemical Research*. **43** (2): 190-200. <https://doi.org/10.1021/ar9001069>
- Sudha, D., Dhanapandian, S., Manoharan, C., & Arunachalam, A.** (2016). Structural, morphological and electrical properties of pulsed electrodeposited CdIn₂Se₄ thin films. *Results in Physics*. **6**: 599-605. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2016.09.004>
- Tan, S., Zhang, X., Zhen, R., Tian, Z., & Wang, Z.** (2015). Effect of Ni content on CrNiN coatings prepared by RF magnetron sputtering. **120**: 54-59.
- Tauc, J.** (1974). *Amorphous and Liquid Semiconductors*. Springer US.
- Uglov, V. V., Abadias, G., Zlotski, S. V., Saladukhin, I. A., Skuratov, V. A., Leshkevich, S. S., & Petrovich, S.** (2015). Thermal stability of nanostructured TiZrSiN thin films subjected to helium ion irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. **354**: 264-268. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2014.12.043>
- Vemuri, R. S., Bharathi, K. K., Gullapalli, S. K., & Ramana, C. V.** (2010). Effect of Structure and Size on the Electrical Properties of Nanocrystalline WO₃ Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*. **2** (9): 2623-2628. <https://doi.org/10.1021/am1004514>
- Wang, D.-Y., Chang, C.-L., Hsu, C.-H., & Lin, H.-N.** (2000). Synthesis of (Ti, Zr)N hard coatings by unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coatings Technology*. **130** (1): 64-68. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00675-7](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00675-7)
- Wang, Y. X., Zhang, S., Lee, J. W., Lew, W. S., & Li, B.** (2013). Toughening effect of Ni on nc-CrAlN/a-SiN_x hard nanocomposite. *Applied Surface Science*. **265**: 418-423. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.11.022>
- Zhang, S., Sun, D., Fu, Y., Pei, Y. T., & De Hosson, J. T. M.** (2005). Ni-toughened nc-TiN/a-SiN_x nanocomposite thin films. *Surface and Coatings Technology*. **200** (5-6): 1530-1534. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.080>

Efectos de la temperatura en la resonancia ferromagnética: estudio comparativo para diferentes materiales

● Carlos A. Mercado^{1,*}, ● Jorge A. Otalora², ● Omar J. Suarez¹

¹Departamento de Física, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia

²Institute of Metallic Materials at the Leibniz Institute for Solid State and Materials Research, Dresden, Alemania

Resumen

En este trabajo se estudió teóricamente el efecto de la temperatura sobre la frecuencia de resonancia ferromagnética de una partícula magnética anisotrópica; se analizaron los materiales FePt, Co y Ni. El sistema se modeló empleando la ecuación de movimiento de Landau-Lifshitz-Bloch (LLB); se calculó el tensor de susceptibilidad magnética, el cual brinda información de la potencia de absorción y frecuencia de resonancia del sistema. Se encontró que la frecuencia de resonancia experimentó un corrimiento hacia valores más bajos a medida que se incrementaba la temperatura del material. En los materiales de anisotropía más alta, la resonancia se presenta para los campos más bajos. Además, se observó en todos los materiales una disminución en la absorción de energía a medida que aumentó la temperatura. Se pudo concluir que la temperatura y la anisotropía cristalina ejercen una marcada influencia en los valores de campo y en la frecuencia de resonancia, así como en la absorción de energía.

Palabras clave: Resonancia ferromagnética; Ecuación de Landau-Lifshitz-Bloch; Anisotropía cristalina.

Effects of temperature on the ferromagnetic resonance of particles: Comparative study for different materials

Abstract

In this work, we studied from a theoretical approach, the effect of temperature on the frequency of ferromagnetic resonance of an anisotropic magnetic particle; we analyzed the materials FePt, Co, and Ni. Using the Landau-Lifshitz-Bloch (LLB) equation of motion, we calculated the magnetic susceptibility tensor, which provides information on the absorption power and ferromagnetic resonance of the system. We found that the resonance frequency underwent a shift toward the lower frequency values as the temperature of the material increased. In materials with high anisotropy, the resonance is presented to lower fields. Furthermore, we observed in all materials a decrease in energy absorption as the temperature increased. We concluded that the temperature and the crystalline anisotropy have a strong influence on field values and resonance frequency, as well as on energy absorption.

Key words: Crystalline anisotropy; Ferromagnetic resonance; Landau-Lifshitz Bloch equation.

Introducción

El estudio de las llamadas nanoestructuras magnéticas suscita gran interés debido a sus propiedades físicas, entre las cuales se destacan los bajos puntos de fusión, la fotoluminiscencia debida a efectos cuánticos, y el superparamagnetismo en algunos materiales como el hierro (Fe), el cobalto (Co) y el níquel (Ni), y a sus diversas aplicaciones tecnológicas (Lu, *et al.*, 2004; Gupta, *et al.*, 2005; Sun, 2000; Cowburn, *et al.*, 1999; Dormann, *et al.*, 2007; Landeros, *et al.*, 2009; Cisternas & Vogel, 2015), por ejemplo, los dispositivos de alta frecuencia, los filtros de información, las guías de onda, los cabezales de lectura en discos duros, las memorias magnéticas de acceso aleatorio (*magnetoresistive random-access memory*, MRAM), las MRAM de torsión de espín, y los osciladores de torsión de espín, entre otros (Philip, *et al.*, 2008; Philip, *et al.*, 2003).

Las propiedades magnéticas de nanoestructuras ferromagnéticas como las películas delgadas, los nanohilos, y los nanotubos, entre otras, se han estudiado exhaustivamente tanto de forma experimental (Nielsch, *et al.*, 2005; Schellekens, *et al.*, 2013) como teórica (D Albuquerque & Castro, *et al.*, 2002; García del Muro & Solans, 1997; Suarez O. J., *et al.*, 2009; Suarez, *et al.*, 2012). Su estudio teórico generalmente se ha abordado a partir del régimen de temperatura. A temperatura cero la dinámica de la magnetización se ha investigada mediante el uso de las ecuaciones dinámicas de Landau-Lifshitz (LL) y Landau-Lifshitz-

*Correspondencia:

Carlos A. Mercado; camv5120@gmail.com

Recibido: 10 de junio de 2019

Aceptado: 22 de julio de 2019

Editor: Jairo Roa Rojas

Gilbert (LLG) (Landau & Lifshitz, 1935; Mayergoyz, *et al.*, 2009). En el caso de la temperatura finita, la dinámica magnética se ha modelado mediante el uso de la ecuación de Landau-Lifshitz-Bloch (LLB) (Garanin, 1991; Garanin, 1997), con resultados confiables en los fenómenos que se presentan a distintas temperaturas y escalas de tiempo ultrarrápidas. Por ejemplo, el método se ha convertido en una herramienta indispensable para la caracterización de la demagnetización ultrarrápida inducida por láser (Sultan, *et al.*, 2012), el movimiento de la pared de dominio impulsado térmicamente a través del efecto espín-Seebeck (Hinzke & Nowak, 2011), el efecto de torsión de giro a temperaturas elevadas (Haney & Stiles, 2009; Schieback, *et al.*, 2009), la grabación magnética asistida por calor (McDaniel, 2012), la dinámica ultrarrápida en materiales ferrimagnéticos (Atxitia, *et al.*, 2012; Suarez, *et al.*, 2015), y el caos determinista en partículas magnéticas (Suarez, *et al.*, 2017).

En el área de la demagnetización ultrarrápida inducida por láser, se ha demostrado que la ecuación LLB describe adecuadamente la dinámica en materiales como el Ni y el gadolinio (Gd). La característica principal de la ecuación LLB, que la hace idónea para la dinámica de magnetización ultrarrápida, es que presenta un término de relajación longitudinal que proviene de la fuerte interacción magnón-fonón.

Uno de los efectos más estudiados para entender la dinámica de magnetización de partículas magnéticas ha sido la resonancia ferromagnética (RFM). Esta técnica se ha utilizado para medir parámetros de disipación, la relación giromagnética y la constante de anisotropía en películas delgadas (Farle, 1998; Ellis, *et al.*, 2012) y en sistemas de válvula de espín, compuestas de iridio-manganeso (IrMn), Co, rutenio (Ru) y níquel-hierro (NiFe). Los modelos teóricos se han elaborado con la aproximación de temperatura cero mediante las ecuaciones LL y LLG. En estos estudios se ha observado que la dependencia angular del campo de resonancia muestra un acoplamiento antiferromagnético y campos de anisotropía unidireccionales, lo cual hace que el sistema presente un comportamiento que se ajusta casi a la perfección, en comparación con los resultados experimentales (Tarazona-Coronel, *et al.*, 2014). Asimismo, en múltiples estudios teóricos realizados a temperatura cero se han contrastado sus modelos con los experimentales, con muy buenos resultados (Curiale, 2008; Anaya-Calvo, 2013; Forzani, *et al.*, 2016).

En estudios más completos se han analizado los efectos de la temperatura finita. Por ejemplo, en la caracterización de películas delgadas de Ni₅₀Fe₅₀ depositadas sobre sustratos de Si(001), se observó mediante el uso de la RFM que el campo de resonancia como función del ángulo del campo en el plano exhibe simetría uniaxial en todas las muestras, con un ligero corrimiento hacia valores menores a medida que disminuye la temperatura. Este comportamiento está asociado con las variaciones térmicas de la magnetización en el plano, lo que a su vez induce una disminución en la anisotropía de superficie en el sistema (Díaz de Sihues, *et*

al., 2006). En estudios teóricos recientes también se han reportado los efectos de la temperatura en la resonancia ferromagnética. Empleando la ecuación LLB, los autores determinaron el espectro de absorción como función de la temperatura en una partícula magnética de material hierro-platino (FePt) y encontraron que la frecuencia de resonancia y el campo aplicado presentaban un corrimiento hacia valores menores de frecuencia con el aumento de la temperatura (Ostler & Ellis, 2014).

En este trabajo se hizo un estudio teórico sistemático de la resonancia de partículas magnéticas de diferentes materiales (FePt, Co y Ni) a temperatura finita y en presencia de un campo magnético externo. Se escogieron dichos materiales porque se conocen todos los parámetros que se requieren para la modelación bajo la aproximación de campo medio. Son muy pocos los estudios analíticos reportados en las bases de datos sobre nanoestructuras magnéticas en los que se consideran las variaciones de temperatura; ello nos motivó a llevar a cabo diversos estudios en esta línea de trabajo, la cual es un nicho importante de investigación.

El documento está organizado de la siguiente manera: en una primera sección se presenta el modelo teórico, en la siguiente se muestran y analizan los resultados obtenidos y en la última se presentan las conclusiones.

Modelo teórico

Se estudió una partícula magnética anisotrópica asumida como un monodominio, a temperatura finita en presencia de un campo magnético aplicado con dos componentes: una componente constante, \mathbf{H}_0 , y una componente dependiente del tiempo, $\delta\mathbf{h}(t)$. La evolución temporal del vector de magnetización a temperatura finita se modeló mediante la ecuación de Landau-Lifshitz-Bloch (LLB):

$$\dot{\mathbf{m}} = -\gamma \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}} + \frac{\gamma \alpha_{\parallel}}{m^2} (\mathbf{m} \cdot \mathbf{H}_{\text{eff}}) \mathbf{m} - \frac{\gamma \alpha_{\perp}}{m^2} (\mathbf{m} \times \mathbf{m} \times \mathbf{H}_{\text{eff}}), \quad (1)$$

donde \mathbf{m} representa el vector de magnetización normalizado ($\mathbf{m} = \mathbf{M}/M_s$); M_s es la magnetización de saturación de la partícula a temperatura cero absoluto; α_{\parallel} y α_{\perp} son los parámetros de disipación longitudinal y perpendicular, respectivamente; γ representa la relación de radio giromagnética de un electrón libre, y \mathbf{H}_{eff} representa el campo magnético efectivo del sistema. Este campo contiene todas las contribuciones de campo que sean consideradas en un sistema particular de estudio.

En este caso, el campo efectivo utilizado se expresa de la siguiente forma:

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_{Ap} + \mathbf{H}_{AN} + \frac{1}{2\gamma_{\parallel}} \left(1 - \frac{m^2}{m_e^2}\right), \quad (2)$$

donde \mathbf{H}_{Ap} representa el campo magnético aplicado, y \mathbf{H}_{AN} es el campo de anisotropía definido de la forma:

$$\mathbf{H}_{AN} = \frac{-(m_x \hat{\mathbf{x}} + m_y \hat{\mathbf{y}})}{\gamma_{\parallel}}. \quad (3)$$

El último término en la ecuación (2) es un campo de temperatura, el cual siempre se encuentra presente en el campo efectivo debido a que es un término que aparece en la deducción de la ecuación LLB. En las ecuaciones (2) y

(3) $m_e(T)$ es la magnetización de equilibrio, y $\tilde{\chi}_{\parallel}$ y $\tilde{\chi}_{\perp}$ son las susceptibilidades magnéticas paralela y perpendicular, las cuales son funciones de la temperatura. Los parámetros $\tilde{\chi}_{\parallel}$, $\tilde{\chi}_{\perp}$ y m_e se toman desde la aproximación de campo medio. La magnetización de equilibrio se obtiene a partir de la ley de Curie-Weiss: $\mathcal{M} = B[\beta(\mathcal{M}J_0 + \mu M_0)]$, donde μ es el momento magnético atómico, J_0 la intensidad del campo de intercambio, y $\beta = 1/k_B T$ siendo k_B la constante de Boltzmann (Garanin, 1997).

La función $B(y) = \coth(y) - 1/y$ representa la función de Langiven, la cual describe la magnetización para materiales como el Ni y FePt, mientras que para Co, la magnetización se modela con la función de Brillouin: $B(y) = (\frac{2s+1}{2s}) \coth(\frac{2s+1}{2s}y) - (\frac{1}{2s}) \coth(\frac{1}{2s}y)$, con valor de espín $S=1/2$ (Moreno, et al., 2016).

Los parámetros de disipación longitudinal y perpendicular dados en la ecuación (1) son funciones de la temperatura, que en la aproximación de campo medio se definen como:

$$\alpha_{\parallel} = \alpha \frac{2T}{3T_c} \quad (4)$$

$$\alpha_{\perp} = \alpha \left(1 - \frac{T}{3T_c}\right) \quad (5)$$

donde α es el coeficiente de disipación a temperatura cero. Las susceptibilidades magnéticas paralela y perpendicular son dadas por las expresiones:

$$\tilde{\chi}_{\parallel}(T) = \left(\frac{\mu}{J_0}\right) \frac{\beta J_0 B' \ln_{\mu_0=0}}{1 - \beta J_0 B' \ln_{\mu_0=0}} \quad (6)$$

$$\tilde{\chi}_{\perp}(T) = \frac{M_e m_e(T)}{2K(T)}, \quad (7)$$

donde $K(T) = K_0 m_e^{\eta}(T)$, siendo $K_0 = K(T=0)$ la constante de anisotropía a temperatura cero y η un exponente de escala específico para cada material.

Se hizo aquí un estudio comparativo de la resonancia ferromagnética a temperatura finita en tres materiales: FePt, Co y Ni. En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros utilizados para las simulaciones, así como las correspondientes expresiones para el cálculo de la intensidad del campo de intercambio (J_0) en la aproximación de campo medio.

Análisis y resultados

Se estudió una partícula magnética con anisotropía uniaxial a lo largo del eje z; el campo externo aplicado tuvo una componente constante, $\mathbf{H}_z = \mathbf{H}_0 \parallel \hat{z}$, aplicada a lo largo del eje fácil y una componente armónica dependiente del tiempo, $\delta\mathbf{h}(t)$, aplicada de forma perpendicular a este con

la condición $|\delta\mathbf{h}(t)| \ll |\mathbf{H}_z|$. Cerca de la resonancia, el campo $\delta\mathbf{h}(t)$ suministra energía suficiente al sistema como para compensar las pérdidas de energía asociadas con la interacción de los momentos magnéticos y el medio circundante, lo cual mantiene la magnetización en un estado dinámico. Dada la excitación del campo dependiente del tiempo, la magnetización puede escribirse como $\mathbf{M} = \mathbf{M}_0 + \delta\mathbf{m}$, donde $\mathbf{M}_0 = M_0 \mathbf{m}$ representa la magnetización de equilibrio y $\delta\mathbf{m}$ representa la parte dinámica de la magnetización, con la condición $|\delta\mathbf{m}| \ll |\mathbf{M}_0|$.

Empleando la ecuación LLB, se determinó la evolución temporal del vector de perturbación $\delta\mathbf{m}$, el cual se escribe finalmente en forma matricial como $\delta\dot{\mathbf{m}} = \tilde{\chi}\delta\mathbf{h}$, donde $\tilde{\chi}$ es un tensor en variable compleja llamado “tensor de susceptibilidad magnética”, el cual es dado como $\tilde{\chi} = \gamma\mu_0 M_0 \mathbf{m} \mathbf{A}^{-1}$, donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, y \mathbf{A} es una matriz 2×2 cuyas componentes están dadas por:

- $A_{xx} = \Omega_0 - \frac{i\Omega\alpha_{\perp}}{m^2}$
- $A_{yx} = i\Omega + \frac{\gamma\alpha_{\parallel}}{m^2}(H_z + \zeta)$
- $A_{xy} = -i\Omega - \frac{\gamma\alpha_{\parallel}}{m^2}(H_z + \zeta)$
- $A_{yy} = \Omega_0 - \frac{i\Omega\alpha_{\perp}}{m^2}$,

donde $\Omega_0 = \gamma(H_z + \frac{m(T)}{\tilde{\chi}_{\perp}})$ y $\zeta = \frac{1}{2\tilde{\chi}_{\perp}}(1 - \frac{m^2}{m_c^2})$, siendo Ω_0 la frecuencia natural del sistema. La parte imaginaria de una componente del tensor de susceptibilidad magnética brinda información sobre la absorción energética que presenta el sistema. La componente x de dicho tensor, en nuestro caso, viene dada por la expresión:

$$\tilde{\chi}_{xx} = \frac{\gamma\mu_0 M_s m(T) ((\Omega_0^2 - \Omega^2) + 2i\Omega\Gamma) (\Omega_0 - \frac{i\Omega\alpha_{\perp}}{m(T)})}{(\Omega_0^2 - \Omega^2)^2 + 4\Omega^2\Gamma^2}$$

donde $\Gamma = \frac{\Omega_0\alpha_{\perp}}{m(T)} - \gamma\alpha_{\parallel} \left(\frac{H_z}{m(T)} + \xi\right)$.

En las Figuras 1 y 2 se presentan gráficos de la componente x de la parte imaginaria del tensor de susceptibilidad magnética como función del campo constante H_z y la frecuencia Ω , respectivamente, para los materiales a) FePt, b) Co y c) Ni, a diferentes temperaturas. En los diferentes materiales la resonancia se obtiene para diferentes valores del campo aplicado H_z y la frecuencia del campo dependiente del tiempo.

En la Figura 1 se observa que en materiales con anisotropías más altas, el efecto de la resonancia empieza a evidenciarse a frecuencias y campos más altos, como son los

Tabla 1. Parámetros utilizados para la caracterización del sistema (Anaya-Calvo, 2013; Ostler & Ellis, 2014; Garanin, 1991).

Material	Parámetros					
	M_s (J/Tm ³)	T_c (K)	K_0 (J/ m ³)	μ (Am ²)	η	J_0
FePt	$1,05 \times 10^6$	660	$8,2 \times 10^6$	$3,23 \mu_B$	2,1	$3k_B T_c$
Co	$1,42 \times 10^6$	1360	$5,3 \times 10^5$	$1,72 \mu_B$	3	$k_B T_c$
Ni	$4,8 \times 10^5$	630	$5,3 \times 10^3$	$0,61 \mu_B$	3	$3k_B T_c$

casos del FePt (Figura 1a) y del Co (Figura 1b), donde las frecuencias que se requieren para que se presente el efecto de la resonancia son del orden de 10^2 GHz y 10 GHz. El Ni presenta la menor anisotropía, por lo cual la resonancia se presenta a partir de frecuencias mucho más bajas, del orden de los 10^0 GHz (Figura 1c). El efecto de la temperatura juega un papel importante en la resonancia ferromagnética. Al mantener fija la frecuencia Ω , y al aumentar paulatinamente la temperatura del material, la magnitud del vector de magnetización va disminuyendo, al igual que la anisotropía, por lo que para evidenciar el efecto de la resonancia se requieren valores cada vez más altos del campo H_z . La absorción de energía para los diferentes materiales también se ve afectada por la temperatura.

A medida que la temperatura aumenta, la absorción para cada material disminuye, como se evidencia en la altura de los picos de resonancia. En la Figura 1b, para el Co a bajas temperaturas se observa un comportamiento un poco diferente: la absorción desde $T/T_C = 0$ aumenta hasta una temperatura del orden de $4,5 T_C$, a partir de la cual empieza

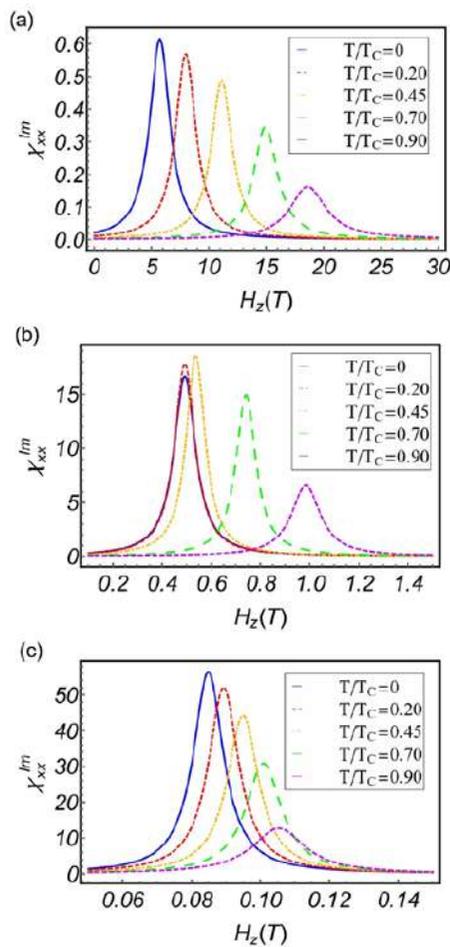


Figura 1. Componente x de la parte imaginaria del tensor de susceptibilidad magnética como función del campo aplicado H_z para diferentes temperaturas. Las figuras se realizaron para: (a) FePt a 600 GHz, (b) Co a 30GHz y (c) Ni a 3 GHz.

a disminuir. Este comportamiento se debe al modelo que se emplea para describir la magnetización de equilibrio, m_e . Con este modelo, m_e permanece casi constante hasta una temperatura de $0,4 T_C$, disminuyendo muy poco hasta una temperatura de $0,5 T_C$, lo cual hace que el factor $\Omega_0/m(T)$ en el denominador del tensor de susceptibilidad se vea fuertemente afectado.

En la Figura 2 se muestra el gráfico de la componente x de la parte imaginaria del tensor de susceptibilidad como función de la frecuencia y para diferentes temperaturas. Se puede evidenciar que la frecuencia de resonancia para los diferentes materiales disminuye a medida que aumenta la temperatura del sistema, pero dicha disminución se presenta de manera más marcada en materiales con mayor anisotropía.

En la Figura 3 se muestran los gráficos de la componente x de la parte imaginaria del tensor de susceptibilidad como función de la amplitud de campo H_z a una frecuencia Ω de

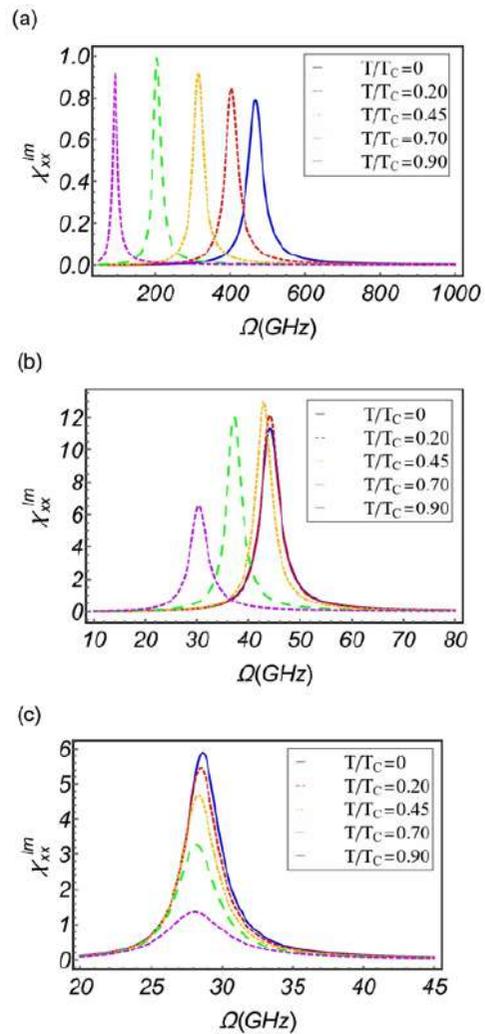


Figura 2. Componente x de la parte imaginaria del tensor de susceptibilidad magnética como función de la frecuencia para diferentes temperaturas. Las figuras se realizaron para un campo aplicado fijo de 1T en (a) FePt, (b) Co y (c) Ni.

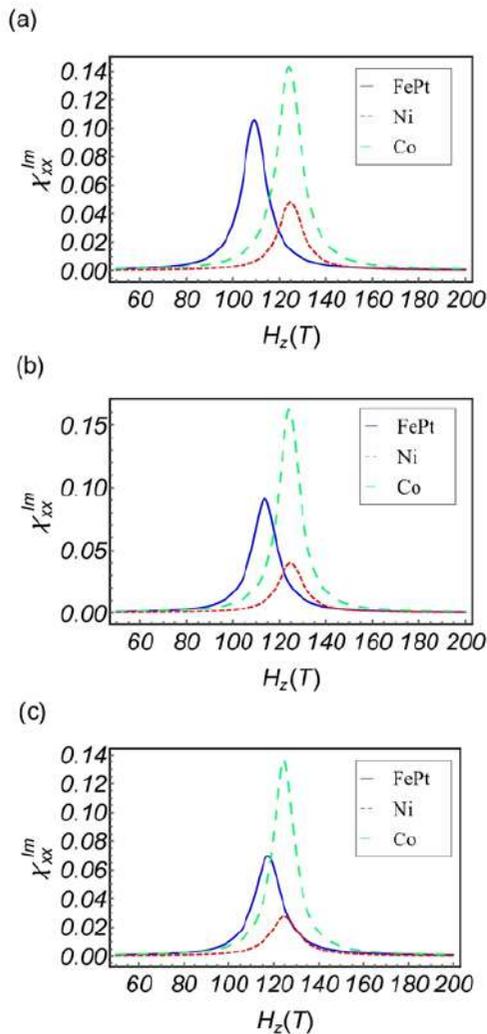


Figura 3. Componente x de la parte imaginaria del tensor de susceptibilidad magnética como función del campo aplicado para los tres materiales. Las figuras se realizaron para: (a) $T = 0$, (b) $T = 0.4T_c$ y (c) $T = 0.7T_c$, todos a una frecuencia Ω de 3500GHz.

3500GHz para diferentes temperaturas. En este caso de frecuencias altas para los materiales Ni y Co, se presentan campos de resonancia mucho más altos que los que presenta el material FePt, el cual posee mayor campo de anisotropía.

La absorción de energía en cada material es diferente: en los materiales Ni y Co se observó que la absorción de energía es diferente en los regímenes de bajas y altas frecuencias. Con bajas frecuencias, como en el caso de la Figura 1, estos materiales presentan mucha más absorción que el material FePt, pero en el régimen de altas frecuencias, la absorción de energía disminuye sustancialmente, como se observa en la Figura 3. Además, en el régimen de altas frecuencias (Co, Ni), con el aumento de la temperatura en el material FePt el campo de resonancia cambia apreciablemente hacia valores más altos, lo que no se presenta en los materiales Co y Ni, con los cuales estos campos cambian muy poco.

Conclusiones

Se analizó teóricamente la resonancia ferromagnética de una partícula magnética anisotrópica a temperatura finita, específicamente con los materiales FePt, Co y Ni. El estudio se hizo empleando la ecuación de Landau-Lifshitz-Bloch. Se encontró que la temperatura tiene un efecto importante en los valores de campo y frecuencia de resonancia. En el régimen de baja frecuencia con el aumento de la temperatura en los tres materiales se presentó un corrimiento en el campo de resonancia hacia valores más altos, acompañado con una disminución en la absorción de energía. En el régimen de alta frecuencia para los materiales Co y Ni, el campo de resonancia no cambió mucho con el aumento de la temperatura, en tanto que en el material FePt el campo resonante aumentó sustancialmente.

En materiales con alta anisotropía el efecto de la resonancia se evidencia solo con valores altos de campo y frecuencia, como es el caso del material FePt. En los materiales con anisotropía más baja, Co y Ni, la resonancia empieza a observarse a valores bajos de campo y frecuencia. En el caso de los materiales Co y Ni se observaron dos regímenes de resonancia a bajas y altas frecuencias. A altas frecuencias en estos materiales se requieren campos resonantes muy altos, incluso más altos que el requerido en el caso del material FePt, que posee una alta anisotropía. Una buena comprensión de los efectos de la temperatura y de la anisotropía cristalina en las propiedades resonantes de sistemas magnéticos es crucial para todas las potenciales aplicaciones tecnológicas en que se requiera la inyección y la absorción de energía.

Agradecimientos

Carlos A. Mercado agradece a la Universidad de Sucre por permitir el uso de equipos de cómputo para la realización de los gráficos y las figuras del artículo.

Contribución de los autores

Carlos A. Mercado: escritura, revisión y elaboración de tablas y figuras del manuscrito. Omar J. Suarez y Jorge A. Otálora: escritura, revisión y corrección del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Anaya-Calvo J. (2013). Transporte térmico y caracterización RAMAN de nanohilos semiconductores de silicio y silicio-germanio. (Tesis Doctoral). Programa de Doctorado en ciencias Físicas, Universidad de Valladolid. Doi: 10.13140/RG.2.1.4775.1760
- Atxitia U., Nieves P., and Chubykalo-Fesenko O. (2012). Landau-Lifshitz-Bloch equation for ferrimagnetic materials. *Phys. Rev. B* **86**: 104414. Doi: 10.1103/PhysRevB.86.104414
- Cisternas E. & Vogel E. E. (2015). Improving information storage by means of segmented magnetic nanowires. *J. Magn. Magn. Mater.* **388**: 35-39. Doi: 10.1016/j.jmmm.2015.04.020

- Cowburn R. P., Koltsov D. K., Adeyeye A. O., Welland M. E., and Tricker D. M.** (1999). Single-Domain Circular Nanomagnets. *Phys. Rev. Lett.* **83**: 1042. Doi: 10.1103/PhysRevLett.83.1042
- Curiale C. J.** (2008). Nanohilos y nanotubos magnéticos. Preparación, caracterización microestructural y estudio de las propiedades eléctricas y magnéticas. (Tesis Doctoral). Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo. Fecha de consulta: 28 de mayo de 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/43694407_Nanohilos_y_nanotubos_magneticos_Preparacion_caracterizacion_microestructural_y_estudio_de_las_propiedades_electricas_y_magneticas
- d'Albuquerque e Castro J., Altbir D., Retamal J. C., and Vargas P.** (2002). Scaling Approach to the Magnetic Phase Diagram of Nanosized Systems. *Phys. Rev. Lett.* **88**: 237202. Doi: 10.1103/PhysRevLett.88.237202
- Díaz de Sihues M., Silva P.J., Fermín J.R., Azevedo A., Rezende S.M., and De Aguiar F.M.** (2006). Efecto de la temperatura en la resonancia ferromagnética del Ni₅₀Fe₅₀/Si(001). *Rev. Mex. Fis.* **S52** (3): 143-146. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X2006000900041
- Dormann J. L., Fiorani D., and Tronc E.** (2007). Magnetic Relaxation in Fine-Particle Systems. *Advances in Chemical Physics* (Wiley, Hoboken, NJ), pp. 283-494. Doi: 10.1002/9780470141571.ch4
- Ellis M. O. A., Ostler T. A., and Chantrell R. W.** (2012). Classical spin model of the relaxation dynamics of rare-earth doped permalloy. *Phys. Rev. B* **86**: 174418. Doi: 10.1103/PhysRevB.86.174418
- Farle, M.** (1998). Ferromagnetic resonance of ultrathin metallic layers. *Rep. Prog. Phys.* **61**: 755. Doi: 10.1088/0034-4885/61/7/001
- Forzani L., Gennaro A.M., Bonin C.J., and Koropeccki R.R.** (2016). Propiedades magnéticas de nanohilos de níquel en matrices de alúmina porosa. Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales SAM-CONAMET. Fecha de consulta: 1 de junio de 2019. Disponible en: <http://conferencias.unc.edu.ar/index.php/sam2016/sam-conamet2016/paper/viewFile/3030/1272>
- Garanin, D. A.** (1991). Generalized Equation of motion for a ferromagnet. *Physica. A* **172**: 470. Doi: 10.1016/0378-4371(91)90395-S
- Garanin, D. A.** (1997). Fokker-Planck and Landau-Lifshitz-Bloch equations for classical ferromagnets. *Phys. Rev. B* **55**: 3050. Doi: 10.1103/PhysRevB.55.3050
- García del Muro y Solans, M.** (1997). Propiedades magnéticas de materiales nanoestructurados: vidrios metálicos recristalizados y partículas pequeñas de hexaferrita. (Tesis Doctoral). Departamento de Física, Universidad de Barcelona. Fecha de consulta: 2 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/1799>
- Gupta A. K., and Gupta M.** (2005). Synthesis and surface engineering of iron oxide nanoparticles for biomedical applications. *Biomaterials.* **26** (18): 3995-4021. Doi: 10.1016/j.biomaterials.2004.10.012
- Haney, P. M. & Stiles M. D.** (2009). Magnetic dynamics with spin-transfer torques near the Curie temperature. *Phys. Rev. B* **80**: 094418. Doi: 10.1103/PhysRevB.80.094418
- Hinzke, D. & Nowak U.** (2011). Domain Wall Motion by the Magnonic Spin Seebeck Effect. *Phys. Rev. Lett.* **107**: 027205. Doi: 10.1103/PhysRevLett.107.027205
- Landau, L. D. & Lifshitz, E. M.** (1935). On the Theory of the Dispersion of Magnetic Permeability in Ferromagnetic Bodies. *Phys. Z. Sowjetunion.* **8**: 153, reproducido en *Collected Papers of L. D. Landau*, editado por D. ter Haar (Pergamon, New York), p. 101 (1965). Doi: 10.1016/B978-0-08-036364-6.50008-9
- Landeros P., Suarez O. J., Cuchillo A., and Vargas P.** (2009). Equilibrium states and vortex domain wall nucleation in ferromagnetic nanotubes. *Phys. Rev. B* **79**: 024404. Doi: 10.1103/PhysRevB.79.024404
- Lu A.H., Schmidt W., Matoussevitch N., Bönnemann H., Spliethoff B., Tesche B., Bill E., Kiefer W., and Schüth F.** (2004). Nanoengineering of a Magnetically Separable Hydrogenation Catalyst. *Angewandte Chemie International Edition.* **43** (33): 4303-4306. Doi: 10.1002/anie.200454222
- Mayergoyz I. D., Bertotti G., and Serpico C.** (2009). *Nonlinear Magnetization Dynamics in Nanosystems.* Napoli, Italia: Elsevier Science. Fecha de consulta: 1 de junio de 2019. Disponible en: <https://www.elsevier.com/books/nonlinear-magnetization-dynamics-in-nanosystems/mayergoyz/978-0-08-044316-4>
- McDaniel, T. W.** (2012). Application of Landau-Lifshitz-Bloch dynamics to grain switching in heat-assisted magnetic recording. *J. Appl. Phys.* **112**: 013914. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.4733311>
- Moreno R., Evans R. F. L., Khmelevskiy S., Muñoz M. C., Chantrell R. W., and Chubykalo-Fesenko O.** (2016). Temperature-dependent exchange stiffness and domain wall width in Co. *Phys. Rev. B* **94**: 104433. Doi: 10.1103/PhysRevB.94.104433
- NienschK., Castaño F. J., Ross C. A., and Krishnan R.** (2005). Magnetic properties of template synthesized cobalt/polymer composite nanotubes. *J. Appl. Phys.* **98**: 034318. Doi: 10.1063/1.2005384
- Ostler, T. A. & Ellis, M. O. A.** (2014). Temperature-dependent ferromagnetic resonance via the Landau-Lifshitz-Bloch equation: Application to FePt. *Phys. Rev. B* **90**: 094402. Doi: 10.1103/PhysRevB.90.094402
- Philip J., Shima P. D., and Raj B.** (2008). Nanofluid with tunable thermal properties. *Applied Physics Letters.* **92**: 043108. Doi: 10.1063/1.2838304
- Philip J., Jaykumar T., Kalyanasundaram P., and Raj B.** (2003). A tunable optical filter. *Measurement Science & Technology.* **14**: 1289-1294. Doi: 10.1088/0957-0233/14/8/314
- Schieback C., Hinzke D., Kläui M., Nowak U., and Nielaba P.** (2009). Temperature dependence of the current-induced domain wall motion from a modified Landau-Lifshitz-Bloch equation. *Phys. Rev. B* **80**: 214403. Doi: 10.1103/PhysRevB.80.214403
- Schellekens A. J., Deen L., Wang D., Kohlhepp J. T., Swagten H. J. M., and Koopmans B.** (2013). Determining the Gilbert damping in perpendicularly magnetized Pt/Co/AlOx films. *Appl. Phys. Lett.* **102**: 082405. Doi: 10.1063/1.4794538
- Suarez O. J., Nieves P., Laroze D., Altbir D., and Chubykalo-Fesenko O.** (2015). Ultrafast relaxation rates and reversal time in disordered ferrimagnets. *Phys. Rev. B* **92**: 144425. Doi: 10.1103/PhysRevB.92.144425

- Suarez O. J., Laroze D., Martínez-Mardones J., Altbir D., and Chubykalo-Fesenko O.** (2017). Chaotic dynamics of a magnetic particle at finite temperature. *Phys. Rev. B* **95**: 014404. Doi: 10.1103/PhysRevB.95.014404
- Suarez O. J., Vargas P., and Vogel E. E.** (2009). Energy and force between two magnetic nanotubes. *J. Magn. Magn. Mater.* **321**: 3658-3664. Doi: 10.1016/j.jmmm.2009.07.009
- Suarez, O. J., Pérez, L. M., Laroze, D., and Altbir, D.** (2012). Magnetostatic interactions in cylindrical nanostructures with non-uniform magnetization. *J. Magn. Magn. Mater.* **324**: 1698-1705. Doi: 10.1016/j.jmmm.2011.12.032
- Sultan M., Atxitia U., Melnikov A., Chubykalo-Fesenko O., and Bovensiepen U.** (2012). Electron- and phonon-mediated ultrafast magnetization dynamics of Gd(0001). *Phys. Rev. B* **85**: 184407. Doi: 10.1103/PhysRevB.85.184407
- Sun, S.** (2000). Monodisperse FePt nanoparticles and ferromagnetic FePt nanocrystal superlattices. *Science* **287**, 1989. Doi: 10.1126/science.287.5460.1989
- Tarazona-Coronel H. S., Landauro C. V. and Quispe-Marcatoma J.** (2014). Resonancia ferromagnética en válvulas de espín: el caso del sistema IrMn(150Å) / Co(50Å) / Ru(32Å) / NiFe(50Å). *Revista de Investigación de Física*. **17**: 141702101. https://www.researchgate.net/publication/326391354_Resonancia_ferromagnetica_en_valvulas_de_espin_el_caso_del_sistema_IrMn150ACo50ARu32ANiFe50A

Humboldt y el rayo del Catatumbo: ¿mito o realidad?

Horacio Torres-Sánchez

Profesor Emérito de la Universidad Nacional de Colombia

Resumen

Este artículo presenta a la comunidad académica internacional los resultados de varios años de investigación sobre el fenómeno del rayo, dentro del grupo de investigación PAAS-UN de la Universidad Nacional de Colombia, específicamente sobre el llamado rayo del Catatumbo. Este fenómeno meteorológico se presenta desde la zona sur del lago de Maracaibo en Venezuela hasta la cuenca inferior del río Catatumbo y más allá, en Colombia, de donde procede su nombre. El fenómeno tiene un interés histórico por saber cómo el explorador prusiano Alexander von Humboldt supo de su actividad en sus exploraciones a finales del siglo XVIII y un interés científico porque hoy en día se sabe que la región del Catatumbo presenta la mayor actividad de rayos del mundo.

Palabras clave: Rayo; Alexander von Humboldt; Catatumbo.

Humboldt and the Catatumbo's Lightning

Abstract

This article presents to the international academic community the results of several years of research on the phenomenon of lightning, within the PAAS-UN research group of the National University of Colombia, specifically the so-called Catatumbo's lightning. This meteorological phenomenon occurs from the southern area of Lake Maracaibo in Venezuela to the lower basin of the Catatumbo River and beyond, in Colombia, where its name comes from. The meteorological phenomenon has a historical interest associated to Prussian traveler Alexander von Humboldt who learned of his activity during his explorations at the end of the 18th century, and a scientific interest, as it the Catatumbo region is considered to have the highest lightning activity in the world.

Key Words: Lightning; Alexander von Humboldt; Catatumbo

Introducción

El rayo del Catatumbo es un fenómeno meteorológico que se presenta desde la zona sur del lago de Maracaibo en Venezuela hasta la cuenca inferior del río Catatumbo y más allá, en Colombia, de donde procede su nombre. De acuerdo con resultados de investigaciones recientes es la zona de mayor actividad de rayos del mundo.

Se afirma recurrentemente que el naturalista y explorador prusiano Alexander von Humboldt (1769-1859) lo describió como “*explosiones eléctricas que son como fulgores fosforescentes...*” ¿Qué tanto de mito o de realidad tiene esta afirmación de Humboldt?

Para responder esta pregunta me he basado, fundamentalmente, en los escritos de Humboldt incluidos en el *Viage a las regiones equinociales del nuevo continente, 1799-1804*, Vols. I, II, III, IV, V, escrito originalmente en francés por Humboldt en París, entre 1804 y 1827. Asimismo, existe una traducción de los originales por el venezolano Lisandro Alvarado de 1941 a 1956, a partir de “Humboldt et Bonpland. *Voyages dans les régions équatoriales du nouveau continent fait dans les années 1799 a 1804*”.

El título de sus escritos: “regiones equinociales” es algo confuso, pues el equinoccio es el momento del año en que el Sol forma un eje perpendicular con el ecuador y en el que la duración del día es igual a la de la noche en toda la Tierra. Los equinoccios son el instante (o la fecha, en un sentido más general) en que suceden determinados cambios estacionales, opuestos para el hemisferio norte y el hemisferio sur. Por tanto, creo que, aunque el título de sus escritos es algo confuso, Humboldt se refería a la región tropical del continente americano.

El viaje. El mapa de la figura 1 representa el itinerario de Humboldt entre 1799 y 1804, lo cual nos servirá de referencia para conocer en donde estuvo presente Humboldt con respecto a la región del Catatumbo.

Aportes de Humboldt a la ciencia física. Humboldt no aportó nada a la física del electromagnetismo. Tal como si lo hicieron, por ejemplo, Franklyn, Volta, Oersted,

Correspondencia:

Horacio Torres-Sánchez; htorres@gmail.com

Recibido: 6 de septiembre de 2019

Aceptado: 11 de septiembre de 2019

Editor: Alberto Gómez

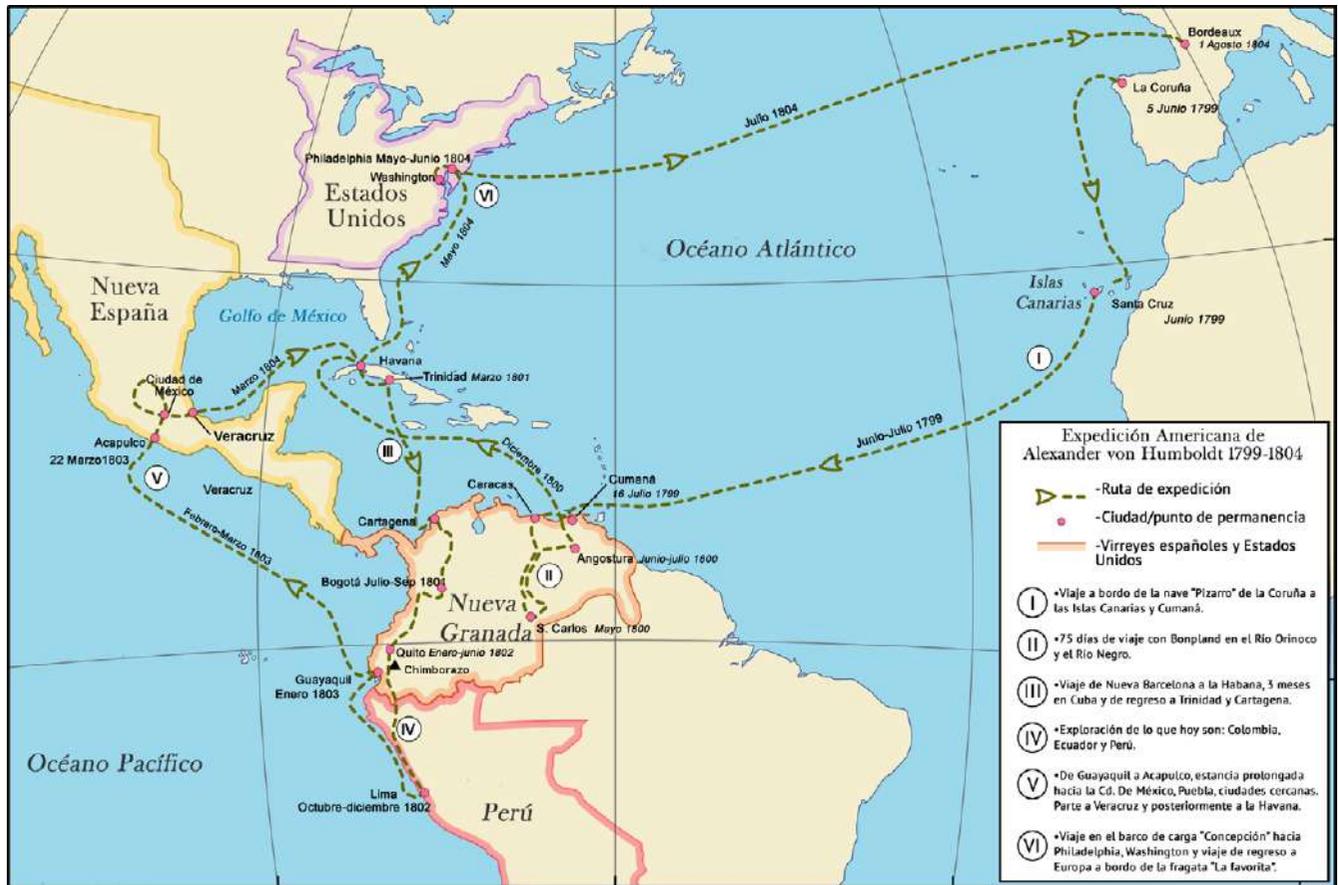


Figura 1. Itinerario de Humboldt en su viaje a la región tropical de América. Tomado de: <https://www.eje21.com.co/2019/08/humboldt-y-su-periplo-cientifico-por-america/>

Faraday, Coulomb, Maxwell o Jean-Baptiste Boussingault, informador de Humboldt en sus expediciones en el ejército de Bolívar, descubridor de la fijación del nitrógeno en los suelos, fundamental para el entendimiento de la función de un rayo para formar óxidos de nitrógeno a partir del nitrógeno atmosférico y posteriormente nitratos.

Sin embargo, Humboldt aportó observaciones, descripciones, mediciones, diferencias comparativas en fenómenos naturales, pero, como muy bien lo explicita en uno de sus escritos: "Lejos estoy de buscar la causa física de estas diferencias...". El gran aporte de Humboldt es su pensamiento, su manera de trabajar que relacionaba todo con todo, lo que hoy en día conocemos como interdisciplinariedad, ya que fue geógrafo, astrónomo, humanista, naturalista, explorador y muy interesado en los avances de la época sobre electricidad.

Humboldt tuvo mucho interés en las nuevas explicaciones sobre el fenómeno de la electricidad, cuando escribió: "He reunido en esta obra las experiencias de Gimnotos sobre la acción Eléctrica" (Tomo I, pg. xxxiv). Humboldt se refiere a un ensayo que publicó en 1796: *Sobre la irritación de la fibra muscular y nerviosa, y sobre la acción química que sostiene la vida de los animales y*

plantas, basado en las investigaciones de Galvani y Volta. Los gimnotos son peces eléctricos (similares a las anguilas), abundantes en América meridional.

Para la época de Humboldt, el contexto de las investigaciones sobre el fenómeno electromagnético era:

- En 1752, Benjamín Franklin (1706-1790) demostró la naturaleza eléctrica de los rayos.

- En 1776, Charles Agustín de Coulomb (1736-1806) inventó la balanza de torsión con la cual midió con exactitud la fuerza entre las "cargas eléctricas" y corroboró que dicha fuerza era proporcional al producto de las "cargas" individuales e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Hoy en día Coulomb es la unidad de medida de carga eléctrica.

- Desde 1775, Alejandro Volta (1745-1827) se dedicó a la investigación sobre el fenómeno eléctrico. Se inspiró en los estudios del físico Italiano Luigi Galvani (1737-1798) sobre las corrientes nerviosas-eléctricas en las ancas de ranas. Y de allí tomó Humboldt el modelo para su ensayo sobre Gimnotos.

- Los grandes desarrollos sobre el fenómeno electromagnético como el descubrimiento del electromagnetismo con Oersted en 1819, las leyes del Electromagnetismo

de Maxwell (1865), el descubrimiento del electrón de Thompson en 1897, la Transmisión de energía eléctrica de Tesla en 1890 y los principios generales sobre la física del rayo por Wilson en 1920, se dieron mucho después del viaje de Humboldt al Nuevo Mundo.

• Sin embargo, en su libro *Cosmos* (1874), Humboldt ya reconocía los avances del electromagnetismo de Oersted, Faraday y Gauss.

Mediciones eléctricas de Humboldt en América tropical.

De acuerdo con la época de su viaje (1799-1804), el instrumento que utilizó Humboldt para medir la electricidad atmosférica fue el electrómetro. Humboldt le llama en sus escritos *Electrómetro de Volta*: “*Tanteé al punto la electricidad atmosférica con el electrómetro de Volta*”. (Vol. II, pg. 221)

Uno de los modelos de electrómetro o electroscopio está constituido por dos hojuelas de oro suspendidas de una varilla metálica BB' (figura 2), terminada en su parte superior por una esfera metálica B, y fija por medio de un tapón aislador en el cuello de una campana de vidrio C. Las dos varillas c, d que se ven a uno y otro lado de las hojuelas a, b sirven para aumentar la sensibilidad del aparato, y la capsulita que se nota en el fondo de la campana está destinada a contener una cierta cantidad de cloruro de calcio con objeto de que se mantenga seco el aire interior.

Sus planes de correlación y sus excelentes observaciones sin buscar la causa física de las diferencias encontradas.

En sus escritos Humboldt planeaba conocer los fenómenos físicos, incluido el eléctrico: “*He tratado reunir en un solo plan el conjunto de los fenómenos físicos que presenta la parte del nuevo continente, comprendida en la zona tórrida, desde el nivel del mar del Sur hasta la cumbre de la más elevada montaña de los Andes; a saber: la vegetación, los animales, las relaciones geológicas, la cultura del sol, la temperatura del aire, los límites de las nieves perpetuas, la constitución química de la atmósfera, su tensión eléctrica, su presión barométrica, la disminución de la gravitación, la intensidad del color azulado celeste, la debilidad de la luz durante su paso por las capas sobrepuestas al aire, las refracciones horizontales y el calor del agua hirviendo en diferentes alturas*”. (Tomo I, pg. xxxij).

En estas afirmaciones, es importante hacer precisiones conceptuales sobre el fenómeno eléctrico, cuando se afirma en uno de sus libros: “*La superficie radiante del globo, y la carga eléctrica de las bajas regiones de la atmósfera, que varía según la naturaleza del suelo y el yacimiento de los continentes y los mares...*” (Traducción del libro de Humboldt por L. Alvarado, Tomo II, pg 239). En la época de Humboldt se hablaba de “fluido eléctrico” o “fuego eléctrico”, no de “carga eléctrica”, pues este concepto aparece a finales del siglo 19 cuando Thompson descubre el electrón en 1897. Este puede ser un error de traducción.

En otro de sus escritos Humboldt hizo excelentes observaciones de correlación entre los rayos y el movimiento solar cuando escribe: “*Según la latitud de Cumanacoa, el sol*

pasa por su zenit la primera vez el 16 de abril y la segunda el 27 de agosto. Por lo que acabamos de exponer se advierte que estos dos pasos coinciden con el principio de las lluvias y de las grandes explosiones eléctricas...” (Tomo II, pg. 53).

En nuestra investigación sobre rayos en la zona tropical hemos hecho campañas de medición multianual y hemos encontrado correlación con el fenómeno meteorológico de desplazamiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) (2002). Por ejemplo, en la figura 3 se presenta la variación multianual en la ciudad de Bogotá, Colombia, localizada en la región andina y la ciudad de la Habana, Cuba, localizada en la región Caribe. Mientras Bogotá presenta un comportamiento bimodal, en la Habana es monomodal, de acuerdo con el desplazamiento de la ZCIT. Interesante lograr una explicación del comportamiento de la actividad de rayos en función con el movimiento solar.



Figura 2. Electroscopio para determinar la naturaleza de la electricidad. Tomado de: <http://www.librosmaravillosos.com/laelectricidadysusmaravillas/index.html>

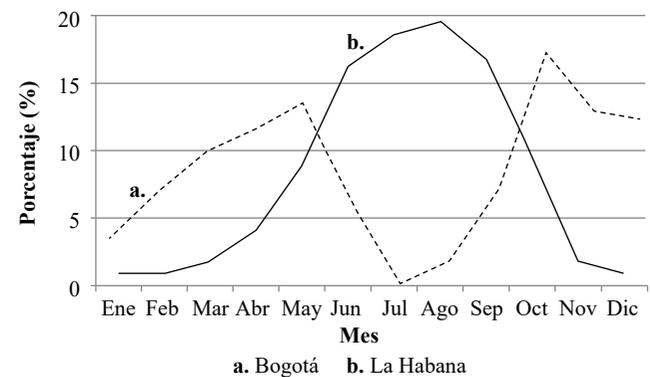


Figura 3. Comportamiento bimodal y monomodal de la actividad de rayos en el trópico. (Tomado de Torres, 2002)

Así mismo, Humboldt hizo excelentes observaciones de correlación entre temblores-viento-rayos-temperatura-sol y medición de polaridad, cuando escribe: “Algunos minutos antes del primer sacudimiento ocurrió un viento violentísimo seguido de una lluvia eléctrica de goterones. Tanteé al punto la electricidad atmosférica con el electrómetro de Volta. Las bolillas se apartaban 4 líneas; la electricidad pasó con frecuencia del positivo al negativo, como sucede durante las tormentas, y en el Norte de Europa, y aun a veces con la caída de la nieve”. (Traducción del libro de Humboldt por L. Alvarado, pg. 221, Vol. II).

Sin embargo, no tuvo el interés de profundizar en estas observaciones y plantear hipótesis sobre tales fenómenos, cuando escribe: “Lejos estoy de buscar la causa física de estas diferencias en las únicas modificaciones de la carga eléctrica del aire: debo, no obstante, añadir que algo al Este de La Guaira, de la parte de Macuto, distante de las casas y a más de cien toesas de distancia de las rocas de gneis, he podido apenas obtener, durante varios días, algunas débiles señales de electricidad positiva, cuando a las mismas horas de la tarde, con el mismo electrómetro de Volta armado de una mecha fumante, había observado en Cumaná una separación de 1 - 2 líneas de las bolillas de saúco. Expondré más abajo las variaciones regulares que a diario experimenta la tensión eléctrica del aire en la zona tórrida, las cuales indican una sorprendente correlación entre las variaciones de la temperatura y la altura del sol”. (Traducción del libro de Humboldt por L. Alvarado, pgs. 267-268, Vol. I).

Así mismo hizo observaciones entre el fenómeno eléctrico y los volcanes y temblores: “El 4 de noviembre tuvimos un violento temblor de tierra, que felizmente no causó mayor perjuicio. Me admiró ver que la inclinación magnética disminuyó en 1,1^o durante ese acontecimiento”. (Traducción del libro de Humboldt por L. Alvarado, pg. 417, Vol. II). Es interesante observar que hoy en día se está trabajando en la predicción de los movimientos de tierra (geología) con la medición de fenómenos electromagnéticos.

El rayo del Catatumbo, piratas e independencia. Anecdóticamente el rayo del Catatumbo frustró en 1595 un ataque del pirata inglés Francis Drake a la ciudad de Maracaibo y fue narrado en un bello episodio en la obra épica “La Dragontea”, de Lope de Vega, en la que relata cómo la luminosidad desplegada por el relámpago le permitió a un vigía divisar las naves de Drake y alertar a la guarnición, que logró repeler el ataque nocturno.

Además, durante la guerra de independencia, el rayo del Catatumbo sirvió de faro para la fuerza naval del Almirante neogranadino José Prudencio Padilla, quien logró derrotar a los navíos españoles el 24 de julio de 1823 en la batalla naval del lago de Maracaibo.

Humboldt y el rayo del Catatumbo. “¿Qué cosa es el fenómeno luminoso conocido con el nombre de farol de Maracaybo que todas las noches se ve del lado del mar como en lo interior del país, por ejemplo en Mérida, donde el señor

de Palacio lo ha observado durante dos años? La distancia de más de 40 leguas a que se distingue la luz ha hecho creer que podría ser el efecto de una tempestad o de explosiones eléctricas que tuviesen lugar diariamente en una garganta de montañas y aun se asegura que se oye el ruido del trueno cuando se aproxima uno al farol. Otros pretenden vagamente que esto es un volcán de aire y que terrenos asfálticos parecidos a los de Mena, causan exhalaciones inflamables y tan constantes en su aparición. El sitio en que este fenómeno se presenta es un país montañoso e inhabitado en las orillas del río Catatumbo, cerca de su unión con el río Sulia. La posición del farol es tal que, situado casi en el meridiano de la boca de la laguna de Maracaybo, dirige a los navegantes como un fanal”. [Humboldt, Alejandro, y Bonpland, Aimé, *Viage*, Vol. 2, Lib. V, Cap. XVI, p. 390, nota.]

Con un análisis de su recorrido y sus escritos, es fácil conocer la relación de Humboldt con el rayo del Catatumbo, pues no se trasladó al occidente de Venezuela ni observó directamente el “rayo del Catatumbo” ni hizo medición alguna, según sus escritos.

Lo más próximo que estuvo de este fenómeno atmosférico fue primero en Caracas (a 700 km), en Cumaná (a 820 km) y luego, en su recorrido por el río Magdalena, estuvo a más de 200 km del lago de Maracaibo en línea recta. Esto parece indicar que tomó información de Manuel Palacio-Fajardo (así lo describe en el Vol. 2 de su *Viage*), de Boussingault y de Agustín Codazzi.

Manuel Palacio Fajardo, prócer de la Independencia, al que se refiere Humboldt en sus escritos, escribió en 1817: “Entramos a San Antonio de Cúcuta en donde el Congreso de la República había promulgado la Constitución. Nos quedamos allí [Cúcuta] hasta el 5 de mayo y durante las tres noches que pasamos en esta ciudad volvimos a ver, hacia el norte, la luz del “farol” del río Catatumbo. Esta luz lejana no tiene la apariencia de rayos ni en ella se distingue los centelleos y el zig-zag del relámpago; es como un vapor luminoso, muy fugaz que abarca un gran espacio y aparece y desaparece con suficiente rapidez para hacer creer que es permanente”

Jean-Baptiste Joseph Dieudonné Boussingault fue un notable científico francés creador de la química orgánica y la agronomía experimental que realizó numerosas observaciones barométricas y botánicas. En Santa Fé de Bogotá se incorporó al ejército de Bolívar y viajó ampliamente por el norte del subcontinente sudamericano después de 1822.

En las *Cartas Americanas* de Humboldt publicadas por la Fundación Biblioteca Ayacucho (1989, 308 páginas), se tienen las notas sobre Humboldt escritas por Boussingault:

“...Humboldt se interesaba vivamente en nuestra expedición*. No solo íbamos a recorrer los lugares que él había visitado hacia veinte años, sino que pensábamos quedarnos (do modo que) muchas observaciones hechas por el debían ser completadas y ampliadas”.

Boussingault había sido alistado por el botanista Antonio Zea, enviado a Europa por Bolívar en misión política. Entre otras cosas, Zea debía reunir jóvenes instruidos

y emprendedores para fundar en Santa Fe de Bogotá, capital de la nueva república, establecimientos científicos particularmente destinados a formar ingenieros civiles y militares. Boussingault partió con Roulin, Rivero y algunos más.”

Aporte de Boussingault a la ciencia: fijación del N_2 . El nitrógeno (N), se encuentra formando parte de la atmósfera, integrando un 78% de la misma. Es un elemento bastante inerte, no reacciona fácilmente con otros compuestos, así que antes de ser aprovechado por la mayoría de los seres vivos, debe pasar por un proceso de fijación, el cual está definido como su combinación con oxígeno o hidrógeno.

La fijación natural (abiótica) generalmente ocurre por procesos químicos espontáneos, como la oxidación que se produce por la acción de los rayos, que forma óxidos de nitrógeno a partir del nitrógeno atmosférico y posteriormente nitratos.

Hoy en día se conoce científicamente que los rayos, cuando fijan el nitrógeno al impactar en el suelo son un verdadero banquete para las plantas, que se refleja rápidamente en un vigor y crecimiento extraordinarios.

Agustín Codazzi: informante del rayo del Catatumbo. Agustín Codazzi, en su libro *Resumen de la Geografía de Venezuela* (1841), relata sobre el rayo del Catatumbo:

“En los lugares en que desemboca el Catatumbo, parece que se acumulan más frecuentemente los chubascos, y allí el trueno y los relámpagos asustan continuamente al navegante: parece que la materia eléctrica está concentrada en aquellos parajes, en los cuales se observa todas las noches un fenómeno luminoso que es como un relámpago que de tiempo en tiempo enciende el aire. Desde la mar se mira como si estuviese sobre la isla de Toas, que está casi en el meridiano de la barra de Maracaibo: pasa sobre las bocas del Catatumbo y sirve de guía a los marinos”.

“Un relámpago continuado que parece surgir en la región pantanosa del río Zulia, Catatumbo y sus alrededores”.

Certezas sobre el rayo hoy en día. En toda actividad de ciencia y tecnología es demostrable que no hay verdades

absolutas sino certezas temporales. Un ejemplo de ello han sido los parámetros del rayo medidos por Berger entre la década de 1950 y 1970, que han servido como base para el desarrollo de las grandes investigaciones de rayos en el mundo, y en normalización internacional, que hoy son cuestionados con rigurosidad por mediciones directas de parámetros del rayo en la misma zona templada donde fueron medidos hace más de 50 años, así como por mediciones en zona tropical.

Las cinco certezas que influyen la actividad de rayos en una zona como el Catatumbo (Torres, 2015) son:

- Vientos. La actividad de rayos permanentes es ocasionada por la circulación de sistemas de vientos, cuyas nubes de tormenta transportan cargas eléctricas en su interior.

- Orografía. El sistema montañoso de la región que interactúa con el sistema de vientos, produciendo concentración de nubes de tormenta y facilidad para generar rayos por el fenómeno de convección.

- Suelo. Material sobre la superficie del terreno. La superficie está ligada a otro factor que tiene que ver con los cambios por actividad humana.

- Subsuelo. La posibilidad de la existencia de algún agente causal en el subsuelo, por ejemplo, fuentes geomagnéticas o radiactivas que pueden producir cargas iónicas en el entorno.

- Cambios por actividad humana. Se refiere al termino de efecto isla por calentamiento urbano.

De acuerdo con las investigaciones realizadas en Colombia (Torres, 2015) y discutidas ante la comunidad académica internacional y mediciones satelitales de la NASA, el Catatumbo es la región de mayor actividad de rayos del mundo, con los siguientes sitios localizados en la región colombiana (Tabla 1):

Graficando estos puntos que hoy en día tenemos certezas sobre su actividad para la región del Catatumbo, se tiene el mapa de la figura 4.

Tabla 1. Máxima densidad de rayos en Suramérica. (Adaptado de Torres, 2016)

Rango Global	Densidad Rayos/km ²	Lat (°)	Long (°)	Sitio más cercano en Suramérica	País
1	232	9,75	-71,65	Lago Maracaibo	Venezuela
4	172	7,55	-75,35	Cáceres	Colombia
7	139	8,85	-73,05	El Tarra	Colombia
11	124	5,75	-74,95	Norcasia	Colombia
18	114	8,45	-74,55	Majagual	Colombia
25	106	8,15	-76,85	Turbo	Colombia
46	95	11,15	-72,95	Barrancas	Colombia
74	88	-17,25	-65,05	Chimoré	Bolivia
78	88	10,35	-70,95	El Corozo	Venezuela
136	77	10,45	-70,35	Santa Rosa	Colombia

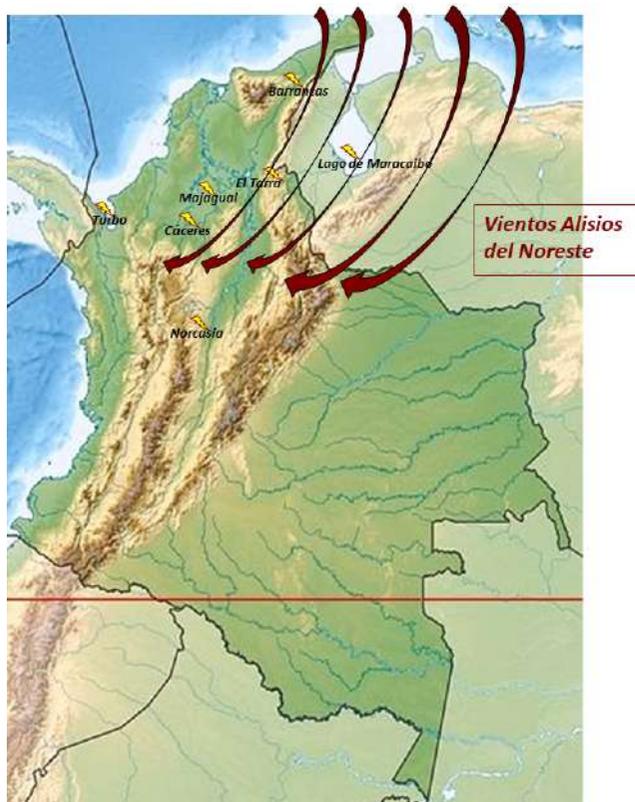


Figura 4. Actividad de rayos en la zona de Catatumbo (Elaboración propia)

Conclusiones

Si bien Humboldt no visitó directamente la zona del Catatumbo, sus informantes lograron una excelente descripción del rayo del Catatumbo. Solo faltó que Humboldt planteara una explicación física, científica, que ya estaba latente en sus observaciones escritas:

- “Otros pretenden vagamente que esto es un volcán de aire”, es decir los vientos alisios del Noreste.
- “[...] podría ser el efecto de una tempestad o de explosiones eléctricas que tuviesen lugar diariamente en una garganta de montañas”. El estrechamiento de las montañas (orografía) es una explicación que junto con otros factores (vientos, suelo y subsuelo) dan explicación sobre la actividad de rayos en la región del Catatumbo.
- “[...] que varía según la naturaleza del suelo y el yacimiento de los continentes y los mares”. Los otros factores involucrados: el suelo y el subsuelo.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar

Referencias

- Humboldt A.** Viage a las regiones equinocciales del nuevo continente, 1799-1804, Vols. I, II, III, IV, V. 797 páginas. Escrito en París, del año 1804 a 1827.
- Humboldt et Bonpland.** Des voyages dans les régions équatoriales du nouveau continent fait dans les années 1799 a 1804, traducidos por el venezolano Lisandro Alvarado de 1941 a 1956.
- Agustín Codazzi.** (1841) Resumen de la Geografía de Venezuela, Fournier, Paris, pp. 20, 464 y 466.
- Torres, H.** (2002). El Rayo, Mito, Ciencia y Tecnología, ISBN: 958-70-1213-5, Unibiblos, Bogotá.
- Torres, H.** (2015). El rayo en el trópico, certezas temporales de investigación sobre el fenómeno del rayo. ISBN 978-958-775-454-4 Colección apuntes maestros, Ed. UN, Bogotá, Colombia.
- Albrecht, R, et. al.** (2016) “Where are the lightning hotspots on Earth?”, Bull. Amer. Meteor. Soc. doi: 10.1175/BAMS-D-14-00193.1.
- Torres, H.** (2018). El enigma del electromagnetismo bajo la lupa ISBN 978-620-2-15081-1. Editorial Académica Española EAE Publishing LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH& Co. KG.

GEOGRAFIA DE LAS PLANTAS

CUADRO FISICO DE LAS REGIONES ECUATORIALES

FEDERICO ALEJANDRO, BARON DE HUMBOLDT

CON UN PREFACIO DE: FRANCISCO JOSE DE CALDAS

Levantado sobre las observaciones y medidas hechas en los mismos lugares desde 1799 hasta 1803, y dedicado con los sentimientos del más profundo reconocimiento, al ilustre patriarca de los botánicos,

D. JOSE CELESTINO MUTIS

Por Federico Alejandro, Barón de Humboldt.

Traducido del francés por D. Jorge Tadeo Lozano, individuo de la real expedición botánica de Santa Fe de Bogotá; con un prefacio y algunas notas, por D. Francisco José de Caldas, individuo de la misma expedición, catedrático de matemáticas del Colegio Real de Nuestra Señora del Rosario, y encargado del Observatorio Astronómico de esta capital.

Los capítulos que a continuación se transcriben, son tomados de la nueva edición del Semanario de la Nueva Granada publicado en París en el año de 1849. Consideramos de grande importancia esta nueva publicación dentro de nuestra Revista, por cuanto el tema vuelve a tomar importancia con los estudios que actualmente se adelantan en el país, sobre su clima y la distribución geográfica de las plantas y animales.

P R E F A C I O

Es preciso no confundir esta obra sabia con ese montón de escritos que inundan la república de las letras, que no contienen sino ideas comunes y trilladas, escritos miserables que parecen en el momento mismo de su nacimiento, y que no dejan tras de sí sino el oprobio de sus autores. La *Geografía de las plantas*, obra original, llena de observaciones importantes, de miras vastas y filosóficas, en un estilo digno de la majestad de su objeto, es un cuadro grandioso de los Andes equinociales. Las plantas, los animales, los meteoros, la agricultura de los pueblos del Ecuador, el hombre mismo, se presentan nivelados a los ojos del filósofo. Ocho escalas puestas a los lados del inmenso *Chimborazo*, contienen todas las producciones de la naturaleza y del cultivo, con todos los fenómenos que presenta la atmósfera y el cielo bajo de la línea. Sobre un corte vertical de esta famosa montaña y de todo el continente meridional de la América, están señalados el término de la nieve permanente, la región de la arena y la esterilidad, la esfera de los musgos, de las gramas, de los arbustos, de los árboles y de las selvas colosales. Cada planta, cada ser organizado, ocupa aquí el lugar que le señaló la naturaleza. ¡Cuántos objetos reunidos en un espacio tan corto! ¡Cuántas ideas, cuántos conocimientos se amontonan en este cuadro verdaderamente filosófico!

Su autor, para darle más realce y contraste, ha puesto al lado del *Chimborazo* la cima inflamada de *Cotopaxi*, la del pico de *Teyde*, del *Mont-perdu*, del *Monte-Blanco*, el pico de *Orizaba*, la del *Etna*

y del *Vesubio*. Estos dos volcanes tan celebrados y tan famosos en la antigüedad, tan estudiados por los sabios del último siglo, y tan temidos de los pueblos que tienen la desgracia de existir en su vecindad, aparecen aquí como unos pigmeos despreciables al lado de nuestras montañas. Las ciudades principales del virreinato (Santa Fe, Quito, Popayán, Cuenca, Loja, Jaén), las minas de plata de Hualgayoc en el Perú, las de Europa, la nieve perpetua a 51° de latitud, la sal gema y los huesos fósiles de la llanura de Bogotá, las conchas petrificadas, el límite de la vegetación en Nueva España, etc., etc., adornan los contornos de este corte de la América del Sur.

La quina, este bello producto de los Andes, más precioso que el oro y que la plata que abrigan sus entrañas, y como ha dicho uno de nuestros compatriotas más ilustrado (1), *este árbol de la vida*, ha merecido al autor atenciones particulares. Señalando a cada planta un punto sobre el perfil del *Chimborazo*, la quina ocupa una zona de 1200 toesas de altura perpendicular. A 1500 toesas tira una línea paralela al horizonte que constituye el término superior, y a las 300 toesas otra que hace el inferior

(1) D. José Ignacio Pombo, del comercio de Cartagena, y hoy prior de este consulado, en un manuscrito intitulado: *Noticias varias sobre las quininas oficiales, sus especies, virtudes, usos, comercio, acopios, su extracto y descripción botánica*. Esta obra llena de erudición y de gusto, abraza cuanto se puede desear sobre los plátanos, acopios, envases y comercio de esta preciosa corteza. El autor la ha sabido embellecer con reflexiones y con hechos que siempre se leerán con gusto y con aprovechamiento. ¡Ojalá vea la luz pública cuanto antes! ¡Ojalá se estudie y profundice por nuestros compatriotas!



del género *cinchona*. De una sola ojeada conoce el observador los lugares que producen estos árboles, y aquellos de que se hallan desterrados.

Esta obra nos toca muy de cerca, son nuestras producciones, somos nosotros mismos los objetos de que trata. Merece, pues, un lugar distinguido en nuestro Semanario, y que nuestros compatriotas la tengan en su lengua propia. El autor la escribió en francés, en la ciudad de Guayaquil, y la consagró al *ilustre patriarca* de los botánicos D. José Celestino Mutis. Este sabio mantuvo el original inédito hasta su muerte, y ahora se publica en una traducción fiel y conforme al manuscrito del autor.

El barón de Humboldt, rodeado de una vegetación abundante, de todos los animales que pueblan nuestros bosques, llevando su atención hacia los fósiles, a la forma y dirección de nuestras montañas, a los ríos, a los valles, a los meteoros, a la temperatura, a la geografía, a la astronomía, en una palabra, a cuanto le presentaba el cielo y la tierra, pasando con la rapidez que exigía su largo viaje, es preciso que se hayan escapado a su penetración muchos objetos, y que haya incurrido en algunas equivocaciones. Nosotros que hemos viajado dentro del virreinato, por orden y a expensas de la Real Expedición Botánica de Santa Fe y de D. José Ignacio Pombo (1), que hemos visitado muchos lugares que nos son comunes con Humboldt, en una palabra, que hemos seguido de cerca los pasos de este viajero ilustre, con los mismos objetos y con la *Geografía de las plantas* en la mano, parece que nos hallamos autorizados (2) para advertir al público lo que hemos notado sobre esta producción interesante del *mártir voluntario del galvanismo*. No es el prurito de escribir, no es la necia vanidad de exagerar los descuidos de los hombres grandes la que nos obliga a poner algu-

(1) Este ciudadano patriota y desinteresado apoyó con todas sus fuerzas mi viaje a la provincia de Quito. Libros, instrumentos, recomendaciones, dinero, todo cuanto podía esperar un hijo de un padre generoso, recibí yo de su mano. No se crea que solicité, ni que pedí estos bienes. Sin conocerme, sin haberme escrito jamás, me llenó de beneficios. Con el placer más completo de mi corazón le pago este tributo de mi reconocimiento.

(2) Tanto más cuanto ha muchos años que reunimos materiales y observaciones para una obra intitulada *Fitografía del Ecuador*, trabajando sobre un plan más vasto, y tal vez más útil al comercio, a la agricultura y a la medicina vegetal. Como a Humboldt, la quina ha llamado toda nuestra atención. Bajando y subiendo los Andes en todos sentidos, desde los 4° 30' lat. S. hasta 5° 25' lat. N., hemos podido fijar irrevocablemente los términos, no sólo del género *cinchona* como lo ha hecho el autor de esta obra, sino también los de todas las especies que lo constituyen. Las plantas que cultivamos, las que sirven en las artes y para restablecer nuestra salud, son las que nos han merecido la preferencia. Humboldt se limita a las alturas, y nosotros, después de establecer los términos precisos a que está reducida cada especie bajo del Ecuador, nos atrevemos a señalar la latitud hasta donde extiende su existencia, y por decirlo así, a fijar los trópicos de todas las plantas que hemos sujetado a nuestro examen. Establecemos principios y leyes generales sobre la geografía de la vegetación, y creemos haber hecho dar un paso a esta ciencia, que por confesión de Humboldt se hallan todavía en la cuna. A pesar de los esfuerzos que hemos hecho para perfeccionar nuestra *Fitografía*, aún nos restan verificar muchas observaciones y un viaje a los Andes de Quindío. Si las circunstancias, si mi fortuna me lo permiten, si llego a completar mis conocimientos en este ramo importante de la botánica, los presentaré al público como un testimonio del amor que profeso a mi país y a mis conciudadanos.

nas notas. El amor a la verdad, el deseo de ilustrar algunos puntos de física y de historia natural de nuestros países, son los motivos que nos mueven. Respetando las luces, los vastos conocimientos y los grandes talentos de este viajero extraordinario, más respetamos la verdad.

Francisco José de Caldas

* * *

GEOGRAFIA DE LAS PLANTAS

PROSPECTO

Las indagaciones de los botánicos se han dirigido por lo general hacia objetos que sólo abrazan una parte muy pequeña de la botánica. Casi exclusivamente se ocupan en el descubrimiento de nuevas especies de plantas, y en su diagnosis fundada en la estructura externa de los caracteres que las distinguen y de las analogías que las unen en clases o familias. Si este conocimiento de las formas en que se presentan los entes organizados es en extremo importante para la historia natural descriptiva; si es la base indispensable de todas las ciencias que tratan de la utilidad medicinal o técnica de los vegetales; si es susceptible de considerarse bajo puntos de vista muy filosóficos, no es menos importante el fijar la atención en la *Geografía de las plantas*, ciencia sublime, de la cual apenas conocemos hasta ahora el nombre, sin embargo de ser una parte integrante de la física del mundo.

Ella es la que considera las plantas bajo la relación de su asociación local en todos los climas. Tan vasta como el objeto que abraza, pinta con rasgos majestuosos la inmensa extensión que ocupan los vegetales, desde la región de las nieves perpetuas hasta el fondo del océano y el interior del globo, donde en oscuras grutas vegetan algunos criptógamos, tan poco conocidos como los insectos a quienes sirven de pasto. El límite superior de la vegetación varía como el de las nieves, según la elevación del polo, o según la oblicuidad de los rayos del sol, e ignoramos hasta dónde se extiende el límite inferior. Pero varias observaciones exactas, hechas sobre la vegetación subterránea en los dos hemisferios, prueban que lo interior del globo se halla animado donde quiera que los gérmenes orgánicos han hallado vacío para extenderse y un alimento análogo a su organización. Las rocas empinadas cubiertas de hielo que distinguimos apenas entre las nubes, no nos ofrecen otras plantas que algunos musgos y otros criptógamos análogos a los que entapizan las bóvedas de las minas y de las cavernas. Así los dos límites opuestos de la vegetación, presentan seres de estructura semejante y cuya fisiología es desconocida.

La *Geografía de las plantas* no se ocupa solamente en clasificar los vegetales según las zonas y diferentes alturas en que se hallan, no se contenta con considerarlos según los grados de presión atmosférica, de temperatura, de humedad, y según

las modificaciones de la carga eléctrica bajo las cuales viven; sino que también distingue entre ellos, como entre los animales, dos clases, que tienen un modo de vivir, y se puede decir, hábitos muy diferentes.

Los unos crecen aislados y esparcidos; tales son: en Europa, el *solanum dulcamara*, el *lychnis dioica*, el *polygonum bistorta*, el *anthericum liliago*, el *crataegus aria*, el *weissia paludosa*, el *polytrichum piliferum*, el *fucus saccharinus*, el *clavaria pistillaris*, el *agaricus procerus*; bajo los trópicos, el *theophrasta americana*, el *lysianthus longifolius*, las *cinchona* y *hevea*. Otras plantas (al modo de las hormigas y de las abejas) reunidas en sociedad, cubren terrenos inmensos, tales son las fresas (*fragaria vesca*), los myrtos (*vaccinium myrtillus*), el *polygonum aviculare*, el *cyperus fuscus*, el *aira canescens*, el *pinus sylvestris*, el *sesuvium portulacastrum*, el *rhizophora mangle*, el *croton argenteum*, el *convolvulus brasiliensis*, el *brathis juniperina*, el *escallonia myrtilloides*, el *bromelia karatas*, el *sphagnum palustre*, el *polytrichum commune*, el *fucus natans*, el *sphaeria digitata*, el *lichen haematomma*, el *cladonia paschalis*, el *thelepora hirsuta*.

Las plantas asociadas son más comunes en las zonas templadas que entre los trópicos, en donde la vegetación por ser menos uniforme es más pintoresca. Desde las márgenes del Orinoco hasta las del Amazonas y del Ucayale, en una extensión de más de quinientas leguas, la tierra se presenta cubierta de selvas tan espesas, que si los ríos no las cruzaran por donde quieran, los monos, habitantes casi exclusivos de estas soledades, podrían lanzándose de rama en rama pasar del hemisferio boreal al hemisferio austral. Mas estos inmensos bosques no presentan el monótono espectáculo que ofrecen las plantas sociales; por el contrario, se observan en cada región formas diversas. En unas partes se ven las mimosas *psychotria* o melástomas, en otras, laureles, cesalpinias, *ficus*, *carolinea* y *hevea*, que entrelazan sus ramas, y en ninguna se observa el predominio exclusivo de un vegetal sobre los otros. No sucede así en la región tropical vecina del Nuevo Méjico y del Canadá. Desde el 17° al 22° de latitud, en todo el país de Anáhuac, cuyas planicies varían de mil quinientos a tres mil metros de elevación sobre el nivel del mar, no se ven sino encinas y una especie de pino semejante al *pinus strobus*. En los valles de Jalapa, situados en el declivio oriental de la cordillera, se halla una selva considerable de liquidambares. Allí la tierra, el clima y la vegetación adquieren el carácter de las regiones de la zona templada, circunstancia que no se observa en ninguna región de la América meridional a la misma altura. La anchura del continente americano cerca del polo boreal y su prolongación hacia el mismo, mayor que la del continente europeo, son sin duda las causas de este fenómeno. Por esto el clima de Méjico es más frío que lo que debería suponerse atendiendo sólo a su latitud y a su elevación sobre el

nivel del mar. Las plantas del Canadá y las de las regiones más septentrionales se han difundido al sur, de modo que las montañas volcánicas de Méjico están cubiertas de la misma especie de pinos que vegeta en las fuentes del Gila y del Misouri.

En Europa, por el contrario, la gran catástrofe que abrió el estrecho de Gibraltar y formó el lecho del Mediterráneo impidió que las plantas de África pasaran a la Europa austral, y por lo mismo muy pocas de ellas se observan al norte de los Pirineos; en tanto que las encinas que coronan las alturas del valle de Tenochtitlan son especies idénticas con las que existen por los 45°; y el pintor que, con el fin de estudiar el carácter de la vegetación, quisiera recorrer estas regiones tropicales, no hallaría ni la hermosura ni la variedad de formas que presentan las plantas equinoxiales, y vería en el paralelo de la Jamaica bosques de encinas de pinos, de *cupressus disticha* y de *arbutus madronno*, con el mismo carácter de uniformidad que las plantas sociales del Canadá, de la Europa y del Asia boreal. Muy interesante sería el marcar en un mapa botánico, los terrenos en donde crecen estos grupos de vegetales de la misma especie. Entonces se vería que ellos se presentan en largas fajas que extendiéndose de un modo irresistible, disminuyen la población de los Estados, separan las naciones vecinas y oponen a su comercio obstáculos más insuperables que las montañas y los mares. Los brezos (*bruyeres*), esta asociación de la *Erica vulgaris*, de la *Erica tetralix*, del líquen *icmadophila* y *haematomma*, se difunden desde la extremidad más septentrional de Jutlandia, por el Holstein y el Luneburgo, hasta los 52° de latitud. De allí se dirigen hacia el occidente, por los arenales graníticos de Munster y de Breda, hasta las costas del océano. Hace muchos siglos que estos vegetales esterilizan la tierra y ejercen un imperio absoluto en aquellas regiones; a pesar de todos los esfuerzos del hombre apenas se les han podido cercenar algunos terrenos para la cultura. Para estos campos cultivados, estas conquistas de la industria, las únicas provechosas para la humanidad, sólo forman pequeños islotes en medio de los brezos, y recuerdan al viajero los oasis de la Libia, en los cuales la fresca verdura sirve de contraste a las arenas del desierto.

Un musgo común a los pantanos de los trópicos y a los de Europa, el *sphagnum palustre*, cubría en otro tiempo mucha parte de la Alemania y hacía que muchos terrenos fueran inhabitables para los pueblos nómades cuyas costumbres nos ha transmitido Tácito. En apoyo de este fenómeno puede citarse un hecho geológico. Los depósitos de turba más antiguos, es decir, en los que se hallan el hidroclorato de sosa y conchas marítimas, provienen de las ulvas y de los fucus, mientras que por el contrario los más comunes y más recientes son restos de *Sphanum* y *mnium serpillifolium*, y su existencia manifiesta cuán abundantes eran en otro tiempo estos criptógamos. Destruyendo los bos-

ques, los pueblos agrícolas han disminuído la humedad de los climas; desecados los cenagales, los vegetales útiles se propagaron en las llanuras que ocupaban exclusivamente los criptógamos tan contrarios a la cultura de las tierras. Aunque es cierto que el fenómeno de las plantas sociales se observa principalmente en las zonas templadas, también los trópicos nos ofrecen algunos ejemplos. En las planicies elevadas de los Andes, a tres mil metros de altura sobre el océano, crecen reunidos el *brathis juniperina*, el *jarava* (género de gramíneas inmediato al *papporophorum*), la *escallonia myrtilloides*, muchas especies de *molina* y sobre todo la *tourettia*, cuya médula sirve de alimento al indio indigente, comida que a menudo le disputan los osos. En los llanos que separan el río de las Amazonas del Chinchipe, se ven reuniones de *croton argenteum*, *bougainvillea* y *godoya*, y en las sabanas del Orinoco las palmeras *mauritia*, algunas sensitivas y las *kyllingias*. En el reino de la Nueva Granada, las *bambusas* y *heliconias* presentan igualmente fajas uniformes que ningún otro vegetal interrumpe, mas estas asociaciones de plantas de la misma especie, no son ni tan extensas ni tan comunes como en los climas de la zona templada.

La geología examina detenidamente la estructura de las costas, los bajíos del océano, y la identidad de los animales que habitan dos continentes vecinos para calcular si estuvieron o no reunidos. La geografía de las plantas suministra materiales preciosos para este género de indagaciones, porque puede hacer reconocer hasta cierto punto, las islas que, reunidas en otro tiempo, se han separado después, y anuncia que la separación del Africa y de la América meridional se hizo antes del desarrollo de los seres organizados. Esta misma ciencia manifiesta cuáles son las plantas comunes al Asia Oriental y a las costas de Méjico y de la California, y si hay algunas que existen en todas las zonas y a todas las alturas sobre el nivel del mar. Auxiliados por la Geografía de las plantas podemos retroceder con alguna certeza hasta el primer estado físico de la tierra, y decidir si, después de haberse retirado las aguas, cuya presencia, abundancia y oscilaciones se descubren en las rocas conchíferas, toda la superficie de la tierra se cubrió de vegetales diversos, o si, conforme a las tradiciones de todos los pueblos, el globo terrestre, restituído a su estado tranquilo, no produjo plantas sino en una sola región, de donde con el transcurso de los siglos y ayudadas por las corrientes del mar, han pasado con marcha progresiva hacia las zonas más remotas de su común y primitiva situación. Ella averigua si en la inmensa variedad de vegetales se halla arbitrio para descubrir algunas formas primitivas, y si su diversidad específica puede ser efecto de la degeneración del prototipo original, en la cual las variedades casuales se han convertido en constantes.

Si yo me atreviera a deducir consecuencias generales de los fenómenos que he observado en los dos hemisferios, diría que los gérmenes de los criptógamos son los únicos que la naturaleza desarrolla espontáneamente en todos los climas. El *dieranum scoparium* y el *polytrichum commune*, la *verrucaria sanguinea* y la *verrucaria limitata* de Scopoli crecen en todas las latitudes, en Europa como en el Ecuador, y no solamente sobre las más altas cadenas de montañas sino también al nivel del mar, siempre que puedan disfrutar de sombra y de humedad.

En las márgenes del Magdalena, entre Honda y la Egipciaca, en un terreno llano en donde el termómetro se sostiene casi constantemente en 28° a 30°, al pie de los *macrocnemum* y de los *ochroma*, los musgos forman una pelusa tan verde y tan hermosa como la que presentan en Noruega. Si otros viajeros han asegurado que los criptógamos son muy raros entre los trópicos, puede explicarse el hecho por la circunstancia de no haber visitado sino costas áridas e islotes cultivados, sin penetrar suficientemente en el interior de los continentes. A todas latitudes se encuentran líquenes de la misma especie, su forma parece tan independiente de la influencia de los climas como la naturaleza de las rocas sobre las cuales viven, mientras que todavía no conocemos ninguna planta fanerógama cuyos órganos sean bastante flexibles para acomodarse a todas las zonas y a todas las alturas, y no es cierto que la *alsina media*, la *fragaria vesca* y el *solanum nigrum* gocen de esta ventaja que hasta aquí sólo parece reservada al hombre y a algunos mamíferos que le rodean. La fresa de los Estados Unidos y la del Canadá difieren de la de Europa. Mr. Bonpland y yo creímos haber visto de estas últimas en el paso del Quindío sobre la Cordillera Central de los Andes entre el Magdalena y el Cauca. En medio de estas selvas solitarias compuestas de *stirax*, de pasifloras arbóreas y de las palmeras que producen la cera, no es posible sospechar que la mano del hombre o las aves hayan podido diseminar allí estas plantas, mas quizá, si hubiéramos logrado ver las flores, habríamos reconocido que eran tan específicamente diferentes del *fragaria vesca* como el *fragaria elatior* difiere del *fragaria virginiana* por caracteres apenas perceptibles. Una cosa podemos afirmar, y es, que en los cinco años en que hemos herborizado en los dos hemisferios, no hemos recogido ninguna planta europea espontáneamente producida por la tierra en la América meridional. Sin embargo, nuestro conocimiento de lo interior de los continentes es todavía tan imperfecto, que la prudencia nos aconseja abstenernos de toda consecuencia general, de miedo de incurrir en el error de los geólogos que construyen el globo entero tomando por modelo las colinas que de más cerca los rodean.

Para decidir el gran problema de la traslación de los vegetales, descendi la *Geografía de las plantas* a lo interior del globo, con el fin de consultar

allí los monumentos antiguos que nos presenta la naturaleza en las petrificaciones, en las maderas fósiles y en las capas de carbón de tierra, que son el sepulcro de la primitiva vegetación de nuestro planeta. Descubriendo frutos petrificados, palmas, helechos arbóreos, scitamineas y la *guadua* (bam-bou) (1) de los trópicos sepultados en las tierras heladas del Norte, considera si estas producciones de las Indias, lo mismo que los huesos de elefante, tapir (danta) y cocodrilo hallados con frecuencia en Europa, pudieron ser transportados a los climas templados por la fuerza de las corrientes en un mundo anegado, o si en otro tiempo estos mismos climas alimentaron aquellos habitantes de los trópicos: pero puede admitirse que ha habido grandes variaciones en la temperatura del aire, sin recurrir a mudanzas en el lugar de los astros, o a movimientos que son poco verosímiles en el eje de la tierra. Si los fenómenos más patentes de la geología nos indican claramente que toda la corteza de nuestro planeta fue primitivamente líquida; si la estratificación y la diferencia de las rocas nos manifiestan que la formación de las montañas y la cristalización de las mayores masas en torno de un núcleo común, no se efectuó al mismo tiempo sobre toda la superficie del globo; no podrá tampoco negarse que la transición del estado líquido al estado sólido ha debido necesariamente dejar en liber-

(1) La *guadua*, esta preciosa producción de los trópicos, que representa con las gramíneas el mismo papel que el elefante respecto de los cuadrúpedos, esta planta colosal y majestuosa, sobre la cual se ha escrito tanto, ha sido hasta hoy absolutamente desconocida de los botánicos. El célebre Mutis, a pesar de haber residido largo tiempo en las selvas ardientes de Mariquita, y a pesar de los esfuerzos que hizo por conocer su fructificación, no la vio hasta 1805. En esta época, por una feliz casualidad, la hallé florida en el valle de Neiva, a orillas del Magdalena. La describí, la diseñé y formé esqueletos completos de esta grama. Sobre estos materiales se delineó la grandiosa lámina que debe enriquecer la *Flora de Bogotá*. Este botánico experimentado y sabio, la reconoció por su género nuevo, y la separó del *tabaxir*, *mambó*, *arundo*, etc., a que se creyó pertenecer. La nombró *bambusa* de la palabra *bambou*, bajo de cuyo nombre se conocía. En nuestras excursiones botánicas, creemos haber reconocido tres especies diferentes en el nuevo género *bambusa*, y ahora presentamos el carácter genérico y específico, reservando una amplia descripción y la historia de esta planta preciosa para el primer fascículo de la *Flora de Bogotá*.

BAMBUSA. FLOR. BOGOT.

Gluma 0.

Calix bi-valvis, alvis muticus, inaequalibus persistentibus; exterior carinata, acuta, interiori pauce longior: interior fornicata, sen calceoli forman aemulans.

Stamina 6, hypogyna: filamenta capillaria, calice longiora, debiles: Antherae incumbentes, basi et apice bifurcae.

Germen oblongum, basi squamulis tribus conspicuis, germine majoribus cinctum: stylis 3, aut stylus profunde 3 fidus: stigmata plumosa, longitudine calicis.

Semen unicum, valva calicis intina tectum.

Culmus procer, 6-8 pollicum diametri, 45-60 pedes altus, erectus, cylindricus, fistulosus, articulatus: coma pyramidalis, apice nutans: e quovis articulo stipulam ovatam, culmum cingentem coriaceam, desciduum profert. Rami, in articulis superioribus, alteri, articulati. Folia alterna, in singulo culminodo, simplicia, vaginantia, et vagina fissill. Flores spicati. Spicae lineares, geminati, terminales.

Habitat in N. R. Granatensis humidis, calidioribus, et temperatis.

Bambusa inermis: Culmus cylindricus inermis.

Bambusa aculeata: Culmus aculeatus.

Bambusa lineata: Culmus lineis longitudinalibus luteis, viridibusque pulchre variegatus.

tad una inmensa cantidad de calórico y aumentar por cierto tiempo la temperatura de una región sin que en ello haya tenido parte alguna el calor del sol, ¿mas podrá acaso admitirse que este crecimiento local de temperatura ha durado el tiempo suficiente para que puedan haberse verificado los fenómenos que de esta manera se pretenden explicar?

Las variaciones observadas en la luz de los astros han podido autorizar la sospecha de que el que ocupa el centro de nuestro sistema ha experimentado también variaciones análogas, y de que el aumento de intensidad de los rayos solares haya sido suficiente en determinadas épocas para elevar la temperatura de las zonas polares, hasta la que actualmente tiene la zona tórrida. Estas variaciones que harían de la Laponia un país habitable para las plantas equinoxiales, para los elefantes y los tapires, ¿son por ventura periódicas?, ¿o son efecto de causas pasajeras perturbadoras de nuestro sistema planetario? Así es que la *Geografía de las plantas* lleva su antorcha luminosa hacia la historia del globo primitivo, sirve de base a la geología, y ofrece a la imaginación del hombre un espectáculo tan interesante como rico.

Los vegetales, tan análogos a los animales por la irritabilidad de sus fibras y por los estimulantes que las excitan, se diferencian esencialmente de ellos por su movilidad. La mayor parte de los animales no dejan a su madre hasta que son adultos, mientras que las plantas, fijadas al suelo desde el momento de su desarrollo, sólo pueden viajar cuando están contenidas en el huevo, cuya estructura favorece estos movimientos. Las corrientes, los vientos y las aves, no son los únicos agentes que sirven para la propagación de los vegetales en la superficie de nuestro planeta: el hombre es el que principalmente se ocupa de esto. Luego que sale de la vida vagabunda, reúne alrededor de sí los animales y las plantas más útiles para su alimento y para su vestuario. Esta transición de la vida errante a la agricultura es tardía en los pueblos del norte. En las regiones equinoxiales, entre el Orinoco y el Amazonas, lo cerrado de las selvas dificulta la cacería y obliga a los salvajes para subsistir a cultivar algunas plantas de *jatropha*, de plátano y de *solanum*. La pesca, los frutos de ciertas palmeras y estos pequeños campos cultivados (si merecen tal nombre las reuniones de un corto número de vegetales), forman la base del alimento de muchos indios de la América meridional. En dondequiera la naturaleza del clima y del suelo que pisa modifican los hábitos del hombre, y sin estas modificaciones sería imposible distinguir los primeros habitantes de la Grecia de los Beduinos pastores, y éstos de los indios del Canadá. Algunas plantas, que son el objeto de la jardinería y agricultura, acompañan al hombre desde un extremo al otro de la tierra. Así, en Europa, ha seguido la viña a los griegos, el trigo a los romanos, el algodón a los árabes; y en América, el

maíz acompañó a los aztecas, las patatas (1) a los peruanos, y la quinoa a los habitantes de la antigua Cundinamarca.

La traslación de estas plantas es evidente, pero su primera patria es tan desconocida como la de las diferentes razas de hombres que hallamos ya habitando todas las porciones del globo en las más remotas épocas de que la tradición nos conserva la memoria. Al oriente y al sur del Mar Caspio, en las orillas del Oxo, en la antigua Cólchida, y principalmente en la provincia de Curdistán, cuyas altas montañas se mantienen perpetuamente cubiertas de nieve (lo que supone más de tres mil metros de elevación), la tierra produce limones, granadas, cerezas, peras y los demás frutos de los árboles frutales que cultivamos en nuestros jardines. Ignoramos si ésta fue su cuna, o si, cultivados en remotos tiempos, se han hecho silvestres con el transcurso de las edades y su existencia sólo prueba en favor de la antigüedad de la agricultura en aquellas regiones. Estas fértiles comarcas, situadas entre el Mar Caspio, el Ponto Euxino y el golfo Pérsico son las que han dotado a la Europa de productos más preciosos. El nogal nos vino de la Persia junto con el durazno; el albaricoque de la Armenia; el Asia Menor nos envió la higuera, el peral, el granado, el olivo, el ciruelo y la morera. Los romanos del tiempo de Catón no conocían todavía ni las cerezas, ni los duraznos, ni las moras. Hesíodo y Homero mencionan ya el olivo cultivado en Grecia y en las islas del Archipiélago. Bajo el reinado de Tarquino el Viejo, no se conocía, sin embargo, todavía este árbol ni en Italia, ni en España, ni en Africa. En el consulado de Apio Claudio, el aceite era muy escaso en Roma, y ya en tiempo de Plinio el olivo había pasado a Francia y a España. La viña que hoy cultivamos con tanta extensión, tampoco es originaria de la Europa: se cría espontáneamente en las riberas del mar Caspio, en Armenia y en Caramania. Del Asia fue transplantada a Grecia y de allí a Sicilia. Los focos la llevaron a la Francia meridional, y los romanos la sembraron en las orillas del Rin. Las especies de *vitis* que se hallan silvestres en la América septentrional y que dieron su nombre (*winenland*) a la primera parte del Nuevo Continente que los europeos descubrieron, son muy diferentes de nuestra *vitis vinífera*.

En uno de los carros que adornaban el triunfo de Lúculo, se veía un cerezo cargado de fruta, y fue el primero de esta especie que llegó a Italia. El dictador había mandado arrancarlo en la provincia del Ponto, después de su victoria sobre Mitridates. En menos de un siglo después, ya el cerezo se había propagado en Francia, Alemania e Inglaterra. De esta manera es que el hombre muda a su arbitrio la vegetación de la superficie del globo, y reúne alrededor de sí las plantas de los climas más apartados. Un pedazo de tierra cultivada en las

(1) Son las papas del Perú, y las turmas del Nuevo Reino de Granada.

colonias europeas de las dos Indias, presenta reunidos el café de la Arabia, la caña dulce de la China, el añil de Africa y muchos otros vegetales procedentes de ambos hemisferios. Esta mezcla de producciones variadas se hace más interesante porque representa a la imaginación del observador la sucesión de acontecimientos que esparcieron la raza humana sobre el globo de cuyas producciones se hizo dueña. Así es que el hombre, inquieto y laborioso, al recorrer las diferentes comarcas de la tierra, ha compelido a cierto número de vegetales a habitar en todos los climas y alturas; mas este imperio sobre los seres organizados no ha podido desnaturalizar su estructura primitiva. La patata cultivada en Chile a 3.600 metros de altura, tiene la misma flor que la que se ha introducido en Siberia, y la cebada con que se alimentaban los caballos de Aquiles, era sin duda la misma que hoy sembramos, porque las formas características de los vegetales y de los animales que nos ofrece la superficie actual del globo parece que no se han mudado desde las épocas más remotas. El ibis sepultado en las catacumbas de Egipto, ave casi tan antigua como las pirámides, es idéntico con el que se observa hoy todavía pescando en las orillas del Nilo. Esta identidad prueba evidentemente que las reliquias colosales de animales fósiles que se encuentran en las entrañas de la tierra, no pertenecen a variedades de las especies que hoy viven, sino a un orden muy diferente del actual y demasiado antiguo para que de él se ocupen las tradiciones.

Cultivando ciertas plantas favoritas con esmero, el hombre las hace dominar sobre las que espontáneamente produce el suelo, mas esta preponderancia tan opuesta a los deseos del botánico, sólo se observa en una porción muy reducida de la tierra en donde la civilización (y con ella la población, su consecuencia necesaria) ha crecido y se ha perfeccionado. En los países inmediatos al ecuador, el hombre es demasiado débil para domar una vegetación que esconde por dondequiera el suelo, sin dejar aparente otra cosa que el océano y los ríos, vegetación que lleva en sí misma cierto sello de majestad agreste, al lado del cual parecen impotentes todos los esfuerzos de la agricultura.

El origen y la primera patria de estos vegetales tan útiles al hombre y que le siguen desde las épocas más remotas, es un secreto tan impenetrable a las indagaciones del naturalista, como la mansión primera de todos los animales domésticos. No sabemos cuál es la patria de las gramíneas que forman el principal alimento de las razas Mongola y Cáucasa, ni qué región produjo espontáneamente los cereales, el trigo, la cebada, la avena y el centeno. Se cree que los romanos no cultivaron esta última gramínea. Algunos aseguran haberse encontrado cebada silvestre en las orillas del Samara en Tartaria, el *triticum spelta* en Armenia, el centeno en Creta, el trigo en Baschiro en Asia, pero estos hechos no parecen bien averiguados, porque es fácil equivocarse creyendo que son plantas

espontáneas las que huyendo del hombre han recobrado su primitiva independencia. Es sabido que las aves que devoran los granos de los cereales los diseminan fácilmente en los bosques. Las plantas que constituyen la riqueza natural de todos los habitantes de los trópicos, como el plátano, el *carica papaya*, el *jatropha manihot* y el maíz, no se han hallado jamás silvestres. Algunas he visto dispersas en las márgenes del Casiquiare y del Ríonegro, mas esto depende de que el indígena salvaje de estas regiones, melancólico y desconfiado, se complace en desmontar y cultivar campos reducidos en los lugares más solitarios, los cuales abandona después con la misma facilidad. El terreno se cubre entonces de maleza, y las plantas que había sembrado, parecen naturales del bosque. La patata, planta bienhechora sobre la cual se funda en mucha parte la subsistencia de la población en los países más estériles de la Europa, está en el mismo caso que el plátano, el maíz y el trigo. De las averiguaciones que hice cuidadosamente en América, resulta que ningún viajero la ha encontrado silvestre, ni en las montañas del Perú, ni en el Reino de la Nueva Granada, donde esta planta se cultivaba con el *chenopodium quinoa* (1). La extensión de la agricultura, sus objetos diversificados según el carácter, según las costumbres, y frecuentemente según las imaginaciones supersticiosas de los pueblos, la influencia del alimento más o menos estimulante sobre la energía de las pasiones, la historia de las navegaciones y de las guerras emprendidas para conseguir producciones del reino vegetal, son otras tantas consideraciones que ligan la *Geografía de las plantas*, con la historia política y moral del hombre.

Estas relaciones bastarían, sin duda, para probar la importancia y extensión de la ciencia cuyos vastos límites describo. Pero el hombre, sensible a las obras de la imaginación, se complace en hermanar la *Geografía de las plantas* con las producciones de la fantasía. La contemplación de la naturaleza, la vista de los campos y de los bosques causa una dulce sensación, muy diferente de la impresión que hace el estudio particular de la estructura de un ente organizado. En éste, el pormenor es el que interesa y alimenta nuestra curiosidad; y en aquélla, son las grandes masas las que agitan nuestra imaginación. ¡Qué efecto tan diferente produce el verdor fresco de un prado rodeado de algunos grupos de árboles esparcidos, y el de un espeso bosque de pinos o de encinas! ¡Qué contraste tan visible entre las selvas de las zonas templadas, y las del ecuador, donde los troncos desnudos de las palmas se elevan sobre los del *cassubium* (2)

(1) El P. Molina, en su historia natural de Chile, asegura que las patatas se producen espontáneamente, pero que son entonces más pequeñas y de sabor algo amargo. Los indios llaman a este *solanum tuberosum silvestre*, *maglia*.

El Dr. Eloy Valenzuela encontró también en la provincia de Pamplona la misma planta. Sería de desear que, cultivándola con esmero, se averiguase si es capaz de perfeccionarse y llegar al estado de las patatas comunes.—A.

(2) Es el *anacardium occidentale* de Linc. Mr. de Jussieu (Antonio Lorenzo) cambió este nombre en el de *cassubium* de

las cuales están entretejidas con bejucos floridos, y representan un pórtico soberbio en los aires! ¿Cuál es la causa psicológica de estas diferentes sensaciones? ¿Es acaso la intensidad o la magia de los colores vegetales, o el tamaño de las masas, o el contorno de las formas, o el hábito de los vegetales los que las causan? ¿Cómo influye este hábito o aspecto de una naturaleza más o menos rica en las costumbres y principalmente en la sensibilidad de los pueblos? ¿En qué consiste el carácter de la vegetación de los trópicos, y cuál es la diferencia de fisionomía que distingue las plantas del África de las del Nuevo Continente? ¿Qué analogía de formas une a los vegetales alpinos de los Andes con los de los Pirineos? Hé aquí un cúmulo de cuestiones importantes que debe resolver la *Geografía de las plantas*... Entre la gran variedad de vegetales que cubren la corteza pétrea de nuestro planeta, se distinguen con facilidad algunas formas generales, a las cuales se reducen casi todas las demás que presentan un conjunto de familias o grupos más o menos análogos entre sí. Tal es la forma de las scitamíneas (*musca, heliconia, estrelitza*), la de las palmas, helechos arbóreos (*arum, pothos, dracontium*), de los ágaves (*yucca, aloe*, algunas *euphorbias pourretia*), de los pinos (*taxus pinus*) y todas las acetosas, de los tamarindos (*mimosa, gleditzia, porteria*) de los bombax (*sterculea, hibiscus, ocroma, cavaniillesia*), de las opuncias (*cactus*), de las gramíneas, la de los bejucos y enredaderas (*vitis, paullinia*), la de las orquídeas (*epidendrum scrapia*), la de las casuarinas (*equisetum*), los musgos, los líquenes. Estas divisiones no tienen relación alguna con las que hace el botánico clasificador, según principios muy diferentes. En aquélla no se atiende a otra cosa que a los grandes contornos que determinan la fisionomía de la vegetación y la analogía de impresión que recibe el contemplador de la naturaleza, mientras que la botánica descriptiva reúne las plantas según la afinidad que presentan las partes más pequeñas pero las más esenciales, cuales son las de la fructificación. En la belleza absoluta de las formas enunciadas, en la armonía y contrastes que nacen de su conjunto, consiste lo que se llama carácter de la naturaleza en tal o tal región. Algunas formas, a la verdad las más bellas (*las de las scitamíneas, palmas, guaduas*), faltan absolutamente en las zonas templadas. Otras, por ejemplo, la de los árboles de hojas pinadas, son muy raras y menos elegantes en ellas; las especies arborescentes, más pequeñas y menos cargadas de flores agradables a la vista; la frecuencia de las plantas sociales de que hemos hablado, y la cultura del hombre, hacen el aspecto de aquellas regiones más monótono. Bajo de los trópicos, por el contrario, se ha complacido la naturaleza en reunir todas las formas, y aunque a primera vista parece que falta la de los pinos, no

Rumphio. Este es el acajou, el *kapamaba* de la India y nuestro *marañón*.

obstante, en los Andes de Quindío y en las selvas templadas de Loja y de Méjico, hay cipreses y pinos. Las formas vegetales, en las inmediaciones del ecuador, son por lo general más majestuosas y admirables, sus masas son mayores, el barniz de las hojas más lustroso, el tejido de la parenquima más laxo y succulento, los árboles más elevados están adornados constantemente con flores más vistosas y más olorosas que las de las herbáceas de las zonas templadas. La corteza quemada de los troncos antiguos, forma un hermoso contraste con el tierno verdor de los pothos y orquídeas, cuyas flores imitan la forma del plumaje de los pájaros que chupan su néctar. No obstante los trópicos no presentan la extensión de prados esmaltados de ranúnculos (1), germaneas que adornan las riberas de los países del Norte. Allí no se conoce aquella dulce sensación de una primavera que despierta la vegetación y rejuvenece a la naturaleza. La mano de Flora, igualmente benéfica para todos los entes, ha reservado para cada región ciertos dones particulares. Un tejido de fibras más o menos laxo, según la presión del aire atmosférico, el grado de calor y de irritabilidad de los órganos, los colores vegetales más o menos intensos según la combinación química de los elementos y la fuerza estimulante de los rayos solares, es lo que caracteriza las diferentes zonas de nuestro globo. La inmensa altura a que se elevan las tierras inmediatas al ecuador, da a los habitantes de los trópicos el espectáculo curioso de vegetales cuyas formas son idénticas con las de la Europa.

El plátano hermosea los valles de los Andes; más arriba campea el árbol benéfico que nos ofrece en su corteza el febrífugo más pronto y más eficaz. En esta región templada de las quinas, y más arriba en la de las escalonias, crecen las encinas, los pinos y otros árboles del género *berberis*, *alnus*, *rubus*, y muchos otros que se creían peculiares a los países del Norte. Así el habitante de las regiones equinoxiales conoce todas las formas vegetales que la naturaleza ha colocado en su país favorecido, y la tierra ostenta a sus ojos un espectáculo tan variado como el que le presenta la bóveda azul del cielo, en la cual no hay constelación que se le oculte.

De tales ventajas no disfrutaban los pueblos de la Europa, porque las plantas lánguidas y enfermizas que el amor de las ciencias o los caprichos de un lujo refinado hace que se cultiven en las estufas, apenas les presentan la sombra de la majestad de las plantas equinoxiales, y aún muchas de sus formas permanecen para ellos desconocidas; pero la cultura y riqueza de sus idiomas, la imaginación y sensibilidad de sus poetas y pintores, les ofrecen un manantial inagotable de compensaciones. Las artes de imitación nos manifiestan el cuadro variado de las regiones ecuatoriales, y en

(1) Las praderías de Quito, Cayambe, Turubamba, Ibarra, Guaca, etc., etc., están cubiertos de una especie de ranúnculo tan abundante, que en algunas partes inutiliza los pastos, y es necesario arrancarlo.

Europa el hombre situado en una costa árida puede, sin embargo, gozar con el pensamiento del aspecto de las más distantes comarcas, y si su alma es sensible a las obras del arte, si su entendimiento ha sido cultivado para poder elevarse a la contemplación de los grandes problemas de física general, desde el fondo de su soledad y sin apartarse de su hogar, se apropia todo lo que el intrépido naturalista ha descubierto recorriendo los aires y el océano, penetrando en las más hondas cavernas, o trepando a las cúspides nevadas. De esta manera es que las luces influyen principalmente sobre nuestra dicha individual, haciéndonos vivir a un tiempo en lo presente y en lo pasado, reuniendo en torno de nosotros cuanto ha producido la naturaleza en los climas más diversos, e iniciando nuestras relaciones con todos los pueblos de la tierra. Fundándonos en los descubrimientos hechos, podemos lanzarnos en el porvenir, y adivinando las consecuencias de los fenómenos observados, fijar para siempre las leyes a que la naturaleza está sujeta. Estas indagaciones nos preparan un cúmulo de goces intelectuales, y, lo que es más, la libertad moral que nos abroquelamos contra los reveses de la fortuna y nos proporciona un abrigo seguro contra toda influencia externa.

* * *

CUADRO FÍSICO DE LAS REGIONES ECUATORIALES FORMADO SOBRE LAS MEDIDAS Y OBSERVACIONES HECHAS EN LOS MISMOS LUGARES, DESDE LOS 10° DE LATITUD BOREAL HASTA LOS 10° DE LATITUD AUSTRAL, EN LOS AÑOS 1799, 1800, 1801, 1802 Y 1803.

El aspecto del suelo y la serie de fenómenos físicos que presenta la atmósfera, varían gradualmente desde el nivel del mar hasta la cima de las más altas montañas. A las plantas que crecen en las llanuras bajas suceden otras de muy diferente especie; las leñosas desaparecen poco a poco para dar lugar a las herbáceas y alpinas, y últimamente no se encuentran sino gramíneas y criptógamos. Ya en la región de las nieves permanentes el reino vegetal está representado sólo por algunos líquenes que cubren las rocas. Las formas de los animales varían también con el aspecto de la vegetación, los mamíferos que habitan en los bosques, las aves que animan los aires y hasta los insectos que roen las raíces de las plantas, todo cambia según la altura del suelo, y aún la naturaleza de las rocas que lo componen varía también para el observador atento que se aleja del nivel del mar. En algunas partes las formaciones recientes que cubren el granito en los llanos no pasan de cierta altura, y esta roca primitiva que sirve de base a las demás y que constituye el interior de nuestro planeta hasta los lugares más profundos a que el hombre ha podido penetrar, se deja ver otra vez.

En otros lugares las formaciones modernas ocultan siempre las rocas cristalinas y a una altura

de más de 4.000 metros sobre el nivel actual del océano, se hallan bancos de conchas y de corales petrificados. Con frecuencia se advierte la cumbre de las montañas más elevadas coronada de pequeños conos de basalto, de roca verde (Grünstein) y de exquisito pórfido, fenómeno que da mucho qué pensar al geólogo, que ve variar las apariencias del suelo según su mayor o menor altura, como el naturalista las plantas y los animales. El aire mismo, esta mezcla de flúidos gaseosos que rodea nuestro planeta y cuya extensión nos es desconocida, nos ofrece también diferencias no menos notables. Si nos alejamos del nivel del océano, la temperatura del aire y su presión disminuyen, mientras que su sequedad y su tensión eléctrica aumentan; el color azul del cielo es más subido en razón de la mayor altura, y ésta influye también sobre la disminución de la gravedad y del grado de calor que adquiere el agua que hierve, como sobre la intensidad de los rayos solares que atraviesan la atmósfera y sobre las refracciones que éstos sufren cuando en ella penetran. El viajero, alejándose así del centro de la tierra, en una proporción mínima en verdad si se compara con el radio de nuestro globo, se halla con sorpresa grande colocado en un mundo nuevo y descubre en el aspecto del suelo y en las modificaciones de la atmósfera mayores alteraciones que si hubiera pasado a otras latitudes. Es cierto que las mismas variaciones se advierten en todas las regiones en que la naturaleza ha formado cadenas de montañas o planicies elevadas sobre el nivel del océano, mas ellas son menos grandes en las zonas templadas que en las inmediaciones del ecuador, en donde las cordilleras se levantan a cinco y seis mil metros de altura y en donde cada región disfruta de un temple uniforme y constante. Contiguos al polo boreal se hallan algunos grupos de montañas casi tan colosales como las del Reino de Quito cuya existencia han explicado algunos por la rotación de la tierra. Citaré entre otros el monte San Elías en la costa de la América opuesta al Asia por los $60^{\circ} 21'$ de latitud boreal, que tiene 5.512 metros de altura, el pico de Buen Tiempo, por los 59° de latitud boreal, con 4.547 metros de altura (1).

En nuestra latitud media de 45° el Monte Blanco se eleva a 4.754 metros. Mas en las regiones boreales, en la zona templada, a 45° , el límite de las nieves permanentes, que es al propio tiempo el límite de toda organización, no pasa de 2.533 metros sobre el nivel del mar. De aquí resulta que la naturaleza no tiene para desarrollar la serie de los cuerpos organizados, sino la mitad del espacio de que puede disponer entre los trópicos, en donde la vegetación no cesa hasta los 4.793 metros de altura vertical. Fuera de esto se ha de considerar que en nuestras latitudes boreales la oblicuidad de los rayos solares y la duración desigual de los días aumentan en tanto grado el calor del aire en las

montañas, que muchas veces no puede percibirse diferencia entre el calor de las llanuras y el que reina a 1.500 metros de altura; y este es el motivo porque muchas plantas crecen al pie de los Alpes y sobre su cumbre. Como han soportado los rigores del frío en lo llano, así los sufrirán en los meses de otoño en las montañas. Por esto es que se ven también algunas plantas alpinas de los Pirineos en los valles inferiores; nada tienen que extrañar en ellos el calor al cual están sujetas por algunos meses en mayores alturas.

No sucede así entre los trópicos, en el vasto espacio de 4.800 metros de extensión vertical que comienza en la superficie del océano y acaba en las nieves permanentes, en donde los climas se suceden como capas sobrepuestas las unas a las otras, en cada una de las cuales la temperatura es casi constante y donde la presión atmosférica, el estado higroscópico del aire, su carga eléctrica, siguen las leyes inalterables y tanto más fáciles de descubrir cuanto que los fenómenos son menos complicados. De semejante orden de cosas resulta que como cada altura entre los trópicos está sujeta a condiciones particulares, también ofrece producciones que varían según la naturaleza de estas circunstancias; y por esto es que en los Andes de Quito, en una faja de 2.000 metros de anchura, se advierte mayor variedad de formas que en una faja situada del mismo modo en el declivio de los Pirineos.

Me he propuesto reunir en un solo cuadro el conjunto de los fenómenos físicos que nos presentan las regiones equinoxiales desde el nivel del mar del sur hasta la cima más elevada de los Andes. Este cuadro indica:

La vegetación. Los animales. Los fenómenos geológicos. La cultura. La temperatura del aire. El límite de las nieves permanentes. La constitución química de la atmósfera. La tensión eléctrica. La presión barométrica. La disminución de la gravedad. La intensidad del color azul del cielo. El grado de extinción que padece la luz al atravesar las capas del aire. Las refracciones horizontales y el calor del agua que hierve, a diferentes alturas.

Para facilitar la comparación de estos fenómenos con los de las zonas templadas, he añadido muchas alturas medidas en diferentes puntos del globo y las distancias desde donde aquéllas pueden divisarse en alta mar, omitiendo, sin embargo, el cálculo de las refracciones terrestres. Puede mirarse este cuadro como el resumen de todas las cuestiones que he estudiado en el curso de mis viajes en los trópicos, y él presenta el resultado de un extenso trabajo de que me ocupo actualmente, en el cual se hallarán las explicaciones, que apenas he podido indicar en él. Me atrevo a pensar que este ensayo no solo será interesante en sí mismo por los objetos que comprende, sino porque sugerirá en el ánimo de los que se ocupan de física general algunas comparaciones y combinaciones favorables al progreso de esta ciencia, que constituye uno de los más hermosos ramos del saber humano

(1) Viaje al Estrecho de Fuca, por don Dionisio Galeano y don Cayetano Valdés, página 65. — H.

y en cuyo estudio no puede adelantarse sino examinando primero en detalle y después en conjunto los diversos fenómenos y las distintas producciones con que nos brinda la superficie del globo, porque, en este grande encadenamiento de causas y efectos, ningún hecho es fecundo si se le considera solo y aislado. El equilibrio general que reina en medio del cúmulo de perturbaciones aparentes, está fundado en la concurrencia de innumerables fuerzas mecánicas y de atracciones químicas que se contrapesan las unas a las otras y por tanto, si es menester considerar cada serie de hechos separadamente para averiguar las leyes particulares a que están sujetos, no es menos importante para el estudio de la naturaleza, que es el gran problema de la física general, el reunir todos los conocimientos que tratan de las modificaciones de la materia.

Llegué además a lisonjearme de que este cuadro no sólo haría nacer ideas nuevas de comparación en el entendimiento de las personas que se propusieran estudiar todos sus detalles, sino que sería también capaz, hablando a la imaginación, de procurarles algunos de los placeres que produce la contemplación de una naturaleza tan majestuosa como benéfica. En efecto, esa multitud de formas vegetales que se ostentan en el declivio de una de las cordilleras, esa variedad de estructura que se adapta al clima de cada altura y a su presión barométrica; ese manto de nieve perpetua que establece un dique inexpugnable a la vegetación, pero que en el ecuador se encoge, dejando un espacio de 2.300 metros de extensión mayor que en nuestros climas; esos fuegos volcánicos que se abren paso, ya por entre colinas bajas como en el Vesubio, o por alturas cinco veces mayores como en el Coto-paxi; esas conchas petrificadas que aparecen en las puntas de las montañas más elevadas como recuerdo de las grandes catástrofes que ha sufrido nuestro planeta; en fin, esas altas regiones del aire por entre las cuales ha penetrado un físico aeronauta animado del intrépido valor que inspira el celo más noble por las ciencias, he aquí objetos capaces de entretener nuestra imaginación y de elevarnos a las más sublimes contemplaciones. Quise así que un cuadro físico de las regiones equinoxiales se dirigiera al entendimiento y a la imaginación a la vez, a fin de que, no solamente interesara a los que se ocupan del estudio de las ciencias físicas, sino que inspirara gusto por el mismo estudio a los que no saben de cuántos placeres se privan no cultivando sus facultades mentales. No ignoro que este cuadro es bien imperfecto, y por lo mismo sólo lo presento como un ensayo, trabajado en medio de un cúmulo de ocupaciones heterogéneas y halagado por la idea de que el público lo recibirá con la misma indulgencia que mis otros escritos. Si las empresas nuevas que preparo me dejan tiempo, espero que podré ir mejorándolo sucesivamente, porque con las cartas botánicas acontece lo que con las que llamamos exclusivamente

geográficas y es que no se consigue que sean exactas sino a proporción que se aumenta el número de buenas observaciones.

Por la primera vez hice el diseño de este cuadro en el puerto de Guayaquil, por febrero de 1803, cuando de regreso de Lima por mar me preparaba a salir para Acapulco. Envié entonces una copia del primer bosquejo a Santa Fe de Bogotá, a M. Mutis, que me honra con su amistad. Nadie mejor que él podía juzgar de la exactitud de mis observaciones, y aún darles mayor extensión, comprendiendo en ellas las que él mismo ha hecho por espacio de cuarenta años en sus viajes en el territorio granadino. Este gran botánico, no obstante la distancia a que se halla de Europa, ha seguido los progresos de la física y observado con constancia los vegetales de los trópicos a todas las alturas; ha herborizado en las tierras bajas de Cartagena, en las orillas del Magdalena y sobre las colinas de Turbaco cubiertas de *gustavia augusta*, de *anacardium caracolí* y de *nectandra sanguinea*; ha vivido largo tiempo en la alta planicie de Pamplona, en los llanos de Mariquita y en los de Ibagué, cuyo cielo sereno y clima delicioso me han dejado los más agradables recuerdos; ha subido a las cumbres nevadas de los Andes, en cuyas inmediaciones vegetan el *escallonia myrtilloides*, el *wintera granatensis* y el *befaria*, que por la continua abundancia de sus flores debería llamarse la rosa alpina de estas comarcas. Ningún botánico ha estado en el caso de reunir mayor número de observaciones interesantes sobre la geografía de las plantas, que Mutis, por la multitud de medidas barométricas que ha practicado y que le han permitido apreciar con certeza la altura a que crecen las diversas plantas de la zona tórrida. Mr. Haenke, compañero del desgraciado Malaspina en sus navegaciones, debe haber hecho gran número de observaciones análogas a las mías. Este botánico infatigable vive hace más de diez años en la cadena elevada de los Andes de Cochabamba que liga las montañas del Potosí con las del Brasil. MM. Sesse y Mociño, que han traído a Europa las riquezas vegetales de Méjico, no habrán dejado tampoco de observar la variedad considerable de plantas que viven en el suelo de N. España, desde las costas de Yucatán y de Veracruz, hasta la cima nevada de Sitlaltepetl (pico de Orizaba) y de Popocatepec. Mi residencia en Méjico y en los Estados Unidos y otras circunstancias particulares me privaron de sacar el partido que habría deseado de los consejos de estos sabios distinguidos.

El diseño que hice en Guayaquil ha sido ejecutado en París en mayor escala por Mr. Schaenberger, que hace muchos años me honra con su amistad. Pero como sus ocupaciones no le permitieron poner este bosquejo en estado de poder grabarse, se encargó de darle la última mano Mr. Turpin, que disfruta de una reputación merecida como botánico y como pintor, y que ha dibujado esta geografía de las plantas con el buen gusto que carac-

teriza todas sus obras. Un dibujo como este, que por su naturaleza está sujeto a escala, no es susceptible de una ejecución pintoresca, porque lo que demanda una exactitud geométrica, deja de producir en pintura efectos agradables a la vista. Aunque no debería representarse la vegetación sino en masas semejantes a las que se advierten en una carta militar, he creído, sin embargo, que podría tomarme la libertad de dibujar un bosque de scitámíneas y de palmeras ostentando sus elevadas copas. Adviértese con facilidad en el cuadro el límite de cada región, las palmas se pierden poco a poco entre los demás árboles; éstos ceden su lugar a las plantas herbáceas, que insensiblemente dejan el campo libre a las gramíneas y criptógamos. Algunas personas de gusto delicado hubieran preferido quizá que todas las observaciones aparecieran cerca de las escalas que presenta el margen del cuadro, mas como en un trabajo de esta especie es preciso conciliar en lo posible (lo que no es fácil), dos intereses opuestos, que son el efecto agradable y la exactitud, toca al público el decidir si hemos conseguido vencer en parte las dificultades que se encuentran en la ejecución de obra semejante. El cuadro de las regiones ecuatoriales comprende los fenómenos físicos que presentan la superficie del globo y la atmósfera, desde los 10° de latitud boreal hasta los 10° de latitud austral. En razón de la grande diferencia que se nota, no sólo en las producciones de la tierra, sino también en los fenómenos meteorológicos, entre los 10° y los 23° de latitud (1), no creí que podía extender la zona del cuadro más cerca de los límites de los trópicos.

Resulta de mis operaciones geodésicas practicadas en Méjico, que aún por los 19° de latitud boreal el límite de las nieves permanentes no difiere sino de 200 metros del que se observa en el ecuador, puesto que alcanza a los 4.600 metros. En las inmediaciones de las zonas templadas, las corrientes que se establecen en la atmósfera, la dirección que siguen los vientos alisios, según el hemisferio en que soplan y otras causas que dimanen de la configuración de los continentes, dan a las regiones situadas por los 20° y 23° de latitud boreal, en su clima y en su vegetación, un carácter peculiar y distinto de lo que podría esperarse entre los trópicos. A una altura de 3.934 metros se ven todavía pinos en la N. España, y a 1.000 metros bajo el término de la nieve perpetua, hay todavía árboles gruesos hasta de un metro de diámetro, en tanto que por los 5° y 6° de latitud los árboles altos dejan de verse desde la altura de 3.508 metros. En la isla de Cuba el termómetro llega muchas veces al punto de congelación y se mantiene por algunos días y aún en la orilla del mar baja hasta los 7°, mientras que en Veracruz y en Santo Domingo, en latitudes algo más australes, nunca baja de 17°.

(1) En el curso de esta obra, cuando no se advierte lo contrario, se entiende hacerse uso del grado del termómetro centígrado y del metro, conservando sólo las antiguas divisiones del tiempo y de los grados de latitud.

En la ciudad de Méjico se ha visto caer nieve y también en la provincia de Michoacán; en Valladolid mismo, a pesar de que la altura de estas ciudades no excede de 2.264 metros la una y de 1.870 metros la otra, mientras que en el ecuador, hasta 4° de latitud no cae nieve sino en los lugares cuya altura pasa de 4.000 metros. Consideradas estas anomalías de la vegetación y del clima de las regiones que se aproximan a la zona templada, sería muy aventurado pretender reunir en un mismo cuadro los fenómenos que se presentan en toda la extensión de los trópicos. Luego que se sale fuera del 10° grado de latitud boreal o austral, ni el suelo ni la atmósfera tienen el carácter de las regiones ecuatoriales. Estas las he representado en un corte vertical que en dirección del este al oeste pasa por la cordillera alta de los Andes. Por un lado se distingue al occidente el nivel del mar del sur, que en estos parajes merece su nombre de océano Pacífico, porque desde el 12° de latitud austral hasta el 5° de latitud boreal, no turban su tranquilidad los vientos impetuosos, mas esta circunstancia sólo se advierte dentro de aquellos límites. Desde esta costa occidental hasta el pie de la cordillera, existe una llanura muy extensa de norte a sur, pero cuya anchura no excede de veinte a treinta leguas del occidente al oriente, éste es el terreno que forma el valle del Perú, el cual presenta al norte del cuarto grado y medio de latitud austral una vegetación tan rica y majestuosa, como árida y desnuda de plantas al sur de este paralelo. Allí el suelo cubierto de arenas graníticas, de conchas y de sal gema, manifiesta por dondequiera las señales de haber estado cubierto por las aguas del océano. En este valle, desde las colinas de Amotape hasta Coquimbo, los habitantes no han visto nunca llover ni tronar, mientras que al norte de estas colinas la lluvia es tan abundante como furiosas y frecuentes las tempestades. He hecho pasar el corte de la cordillera de los Andes por la cumbre más alta, que es el vértice del Chimborazo, situado a 1° 27' de latitud austral y a 0° 19' al occidente de la ciudad de Quito. Los académicos franceses sólo midieron aproximadamente esta altura. M. de la Condamine, que en su viaje ha consignado las más luminosas ideas sobre la geología y la física general, no da al Chimborazo sino como 6.274 metros de altura; el geómetra español don Jorge Juan le asigna 6.586; la diferencia entre estos dos cálculos es de 312 metros y por lo mismo demasiado considerable para no hacer alto en ella. La carta de las costas del Perú de Malaspina, que ha publicado el Depósito Hidrográfico de Madrid, da al Chimborazo 7.496 varas o 6.352 metros de altura. Yo practiqué cerca de la villa de Riobamba, en la grande llanura volcanizada de Tapia, una medida geodésica según la cual la altura del Chimborazo, suponiendo la refracción de $\frac{1}{14}$ del arco, sería de 3.640 metros sobre esta llanura, la cual está, según Mr. Gouilly (que ha calculado con la fórmula de Mr. Laplace mis observaciones baro-

métricas), a 2.896 metros sobre el nivel del mar, de manera que la altura total del Chimborazo llegaría a 6.536 metros; y si se hace uso de la nueva fórmula de refracción que Mr. Laplace ha calculado, mis medidas geodésicas se convierten en 3.648 metros y por tanto la altura total del Chimborazo es de 6.544 metros, número que se aproxima más al resultado de D. Jorge Juan que al de Mr. de la Condamine. Pero no hay que olvidar que este geometra usaba quizás de la fórmula barométrica de Bouguer (1) y no hacía la corrección de la temperatura, y en este caso ha debido hallar una altura inferior a la mía de 180 metros. Además de esto, la diferencia de las suposiciones respecto de la altura del barómetro al nivel del mar, aumenta la divergencia en el cómputo de la elevación absoluta, porque las medidas practicadas en la cordillera de los Andes son necesariamente mitad geométricas y mitad barométricas, y esta complicación dificulta la comparación de dos operaciones calculadas sobre bases y métodos diferentes. Sin embargo las dimensiones considerables de mi base (1.702 metros), las precauciones que tomé para nivelarla y la naturaleza de mis ángulos, me parece que deben inspirar alguna confianza en el resultado de mi medida. La cúspide del Chimborazo es un gran segmento de círculo que tiene mucha semejanza con el aspecto del Monte-Blanco. No me ha sido posible figurarlo con exactitud en la lámina que acompaña esta obra, pero estoy preparando una vista pintoresca de esta montaña colosal cuyos contornos he medido con el sextante, y que algún día publicaré.

Detrás del Chimborazo se divisa en el cuadro un cono de 5.752 metros de elevación, que representa la cima del Cotopaxi. Su volcán y los del Tungurahua y del Sangay son los más activos de la provincia de Quito. Como llevo dicho, esta montaña es cinco veces más elevada que el Vesubio, que no tiene de altura sino 1.197 metros, pero no por esto debe suponerse que el Cotopaxi es el volcán más alto del mundo, el Antisana le precede; en este último nevado se descubren, a la altura de 5.832 metros, muchas bocas de las cuales he visto humear una en el año de 1802. En la realidad el Cotopaxi no se halla tan cerca del Chimborazo como aparece en el diseño. Si se hubieran querido conservar las distancias horizontales exactas, habría debido figurarse, en lugar del Cotopaxi, el volcán del Carguairazo, que se hundió el 19 de julio de 1698, y que está situado en la proximidad del Chimborazo.

(1) Las diferencias notables que se advierten entre las alturas que los académicos franceses y españoles asignan a las mismas montañas, y que son superiores a las que podrían resultar de la incertidumbre de la altura absoluta de la estación de Caraburu, hacen creer que el cómputo de la altura del Chimborazo se ha modificado a consecuencia de las diversas hipótesis del cálculo barométrico. Si por el contrario, como parece indicarlo un pasaje del tratado sobre la figura de la Tierra de Bouguer, la altura absoluta de todas las montañas depende de la medida geodésica de la pirámide de Ilinisa hecha desde Niguas, entonces todavía hay menos que extrañar estas diferencias, como lo manifestaré cuando en otro lugar discuta los errores que pueden cometerse en esta operación complicada.

zo. Mas, fuera de que el Carguairazo, que no ofrece sino las ruinas de su antigua grandeza, es hoy poco interesante, tenía por otra parte un motivo poderoso para preferir el Cotopaxi, cuyos bramidos subterráneos oí en el puerto de Guayaquil, mientras que estaba trabajando el primer bosquejo de mi cuadro. Desde aquel puerto al cráter del Cotopaxi (2) hay cuarenta y dos leguas marinas de distancia, y sin embargo las explosiones se oían como si fueran descargas de artillería. En el año de 1744, los bramidos de este volcán se oyeron hasta Honda y Mompox, a más de doscientas leguas de distancia. En esta proporción, si el Vesubio tuviera la misma intensidad de fuerza volcánica, el estallido de sus erupciones debería alcanzar hasta Dijon o hasta Praga. La altura del humo que despidió el cráter, no está figurada arbitrariamente en el diseño. Para calcularlo me he conformado con el cómputo hecho por Mr. de la Condamine, que juzgó que las llamas en 1738 se elevaron a más de 900 metros sobre el vértice del volcán. Entonces fue que el Cotopaxi arrojó, como otros volcanes del Reino de Quito, inmensa cantidad de aguas cargadas de hidrógeno sulfurado y de arcilla carbonada mezclada con azufre, y peces muy poco alterados por el calor y que forman una especie nueva del género *pimelodus* (*pimelodus cyclopus*).

Parece superfluo indicar aquí que la proyección de la cordillera sólo está sujeta a escala en el sentido vertical, y que la misma escala no puede servir para las distancias horizontales, porque las montañas más altas aparecerían tan bajas, igualando las escalas, que al Chimborazo no le tocarían sino dos líneas de altura en un pliego en folio en el cual se quisiera figurar un terreno de doscientas leguas de largo, y la elevación del Vesubio sería totalmente nula en el mismo diseño; y para representar en la escala que he adoptado respecto de las alturas, no todo el perfil de la América meridional, sino el espacio solamente comprendido entre el mar del sur y el revés oriental de los Andes, sería menester una tira de papel de muchos metros. Tal es la razón porque no pueden igualarse, cuando se figura de perfil una porción considerable del globo, las escalas de altura y las de distancia; y por tanto no es posible dar una idea exacta de la configuración del terreno, pues todo parece más escarpado de lo que es realmente. No me faltarán ocasiones de discutir las ventajas y los inconvenientes de estas proyecciones en mi ensayo sobre la Pasigrafía mineralógica, o en el Atlas geológico que me propongo publicar luego que se terminen los cálculos de mis observaciones astronómicas y medidas geométricas.

En el cuadro se advierte que es menos empinado el lado oriental de los Andes que el occidental, y así es en efecto en la porción de la cordillera que he figurado en el corte, aunque estoy muy distante

(2) El cráter del Cotopaxi tiene cerca de 930 metros, el de Rucupichincha cerca de 1.463 metros de diámetro, el del Vesubio no pasa de 606 metros.

de creer que esta circunstancia sea tan general como lo han sostenido diversos físicos célebres, y entre ellos Buffon. En efecto, si consideramos cuán poco conocida es la cordillera de los Andes en su parte oriental, nos persuadiremos fácilmente de que pueden haberse confundido los ramos laterales de la cordillera con la alta cumbre que separa las inmensas llanuras del Beni, del Puruz y Ucayale, del valle angosto del Perú, y de que debemos ser cautos en decidir de un modo general sobre el declivio más o menos rápido de las pendientes de ambos lados. Cuando atravesé la cordillera de los Andes por el Páramo de Guamaní, en donde existen todavía a la altura de 3.300 metros las ruinas ciclópeas del palacio de los Incas; y cuando bajé hacia el río Amazonas, sabiendo luego de la provincia de Jaén de Bracamoros a Micuipampa, observé que bajo los 3° y 6° de latitud austral las cuevas orientales son más ásperas que las opuestas que caen al mar del sur. Mr. Haenke hizo en la provincia de Cochabamba y en las montañas fértiles de Chiquitos la misma observación. Muchos hechos podrían citarse en el hemisferio boreal que confirmarían el mismo reparo: sábese, por ejemplo, que al oriente de Bogotá, por el páramo de Chingasa, el descenso a los llanos de Casanare es punto menos que imposible.

Para indicar los valles angostos que sin duda se han formado por efecto de los terremotos en los Andes, he figurado una quiebra o barranca profunda en el declive oriental de la cordillera. Algunas de estas grietas son tan hondas, que el Vesubio, el Schneekoppe de Silesia y el Puy de Dome de Auvernia colocados en el fondo, no alcanzarían a igualar con sus cumbres las montañas que sirven de muros a estas maravillosas hendiduras. La de Chota en el Reino de Quito tiene de profundidad perpendicular 1.566 metros, la del río Cutacu en el Perú tiene más de 1.364, y sin embargo el nivel más bajo de estos valles está todavía elevado de otro tanto sobre el del océano. Su anchura no excede muchas veces de 1.200 metros, de manera que el geólogo se imagina ver inmensos filones que la naturaleza dejó de llenar de sustancias metálicas. Mr. Ramond calculó que la grieta de Ordesa, cerca del Mont-Perdú, tenía 896 metros de profundidad media.

A la extremidad más oriental del perfil se ven las costas del océano Atlántico, las llanuras del Pará y del Brasil, y para indicar que esta parte del diseño debería ser mucho más larga que el resto, se ha interrumpido esta inmensa llanura que riegan el Amazonas y el Río-Negro.

Hasta aquí sólo he manifestado los fenómenos geológicos que se descubren en la periferia de mi diseño. Pasemos ahora a lo interior, en donde he querido figurar la geografía de la vegetación equinoccial con toda la extensión que permiten los límites de una sola lámina. Los herbarios que Mr. Bonpland y yo trajimos como resultado de nuestras herborizaciones en los trópicos, encierran más

de seis mil especies, y como al mismo tiempo nos ocupamos de observaciones astronómicas y medidas geodésicas y barométricas, tenemos los datos suficientes para determinar con exactitud la posición de todas estas plantas, la extensión de la zona que cada especie ocupa, el máximo y el mínimo de su elevación, la naturaleza de la roca que les sirve de base y la temperatura en que viven. Conforme a estas observaciones, he situado en el cuadro, sin dejar el compás de la mano, el nombre de las plantas que la naturaleza hace nacer entre dos límites determinados. Cada nombre está escrito según la escala en metros que está al lado del diseño. Cuando la planta ocupa cierta extensión en el declive de la cordillera, el nombre de ella está escrito oblicuamente. Sólo se indica el nombre del género si todas las especies que él comprende crecen a la misma altura. Así es que la *escallonia*, la *wintera*, el *befaria* y el *brathys*, no se hallan en el ecuador sino en alturas considerables, mientras que el *aviccennia*, el *coccoloba*, la *coesalpinia* y *bombax*, aparecen únicamente en lugares poco más altos que el nivel del mar.

El espacio reducido en que he tenido que acumular todos estos resultados, no me ha permitido nombrar sino algunas especies; mas si el público acoge este ensayo con algún favor, lo ampliaré más tarde, publicando mapas especiales para los cuales tengo preparados abundantes materiales: porque me habría sido casi imposible indicar sin confusión en un cuadro general 150 especies de *melastoma*, 58 de *psychotria*, 38 *pasifloras* y más de 400 gramíneas que hemos traído de las regiones ecuatoriales, y de las cuales la mayor parte sin embargo vegetan sólo a cierta altura que la naturaleza les ha designado. Con frecuencia me he visto en la necesidad de repetir en muchos lugares el nombre de un mismo género cuyas especies ya crecen a 500, ya a 3.000 metros de altura. No me he atrevido a introducir en este cuadro un número considerable de géneros nuevos sobre los cuales tenemos todavía alguna incertidumbre que no hemos podido aclarar en el corto tiempo que hace estamos en Europa y por lo mismo sólo designo algunos vegetales curiosos que aparecerán en láminas muy en breve en los primero y segundo fascículos de nuestras *plantas equinoxiales*, tales son el *cusparia febrifuga* (árbol precioso del que se saca el *cortex angusturoe*, género nuevo, de hojas ternadas y alternas); el *matisia cordata* y la palma de cera (*ceroxyton andicola*), que ha sido descrito por Mr. Bonpland en una memoria particular.

A fin de fijar de un punto de vista más general y más digno de la física las ideas que deben tenerse de la estación de los vegetales, he dividido esta carta botánica en regiones, conforme a la analogía de las formas que se observan a diferentes alturas y he hecho grabar el nombre de estas regiones en caracteres más grandes, como se designan las provincias en las cartas ordinarias. Así es que, partiendo de lo interior del globo o de la profun-

didad de las minas hasta las cumbres heladas de los Andes, se ven en primer lugar la *región de las plantas subterráneas*, que contiene criptógamos de estructura singular, que Scopoli estudió el primero y sobre los cuales publiqué en 1790 una obra particular con este título: *Florae fribergensis prodromus, plantas cryptogamicas, prosertim subterraneas, recensens*. Estos criptógamos son específicamente diferentes de los que se hallan en la superficie del globo y parecen ser, como muchos de éstos, independientes del clima y de la latitud. Vegetan en una oscuridad profunda y perpetua, de sus especies están revestidos los muros de las cavernas y los maderos que sirven de apoyo a los trabajos de los mineros. He visto las mismas especies (*boletus ceratophora*, *lichen verticillatus*, *boletus botrytes*, *gymnoderma sinuata*, *bissus speciosa*) en las minas de Alemania, de Inglaterra y de Italia, como en las de la Nueva Granada y de Méjico, y, en el hemisferio austral, en las de Hualgayoc en el Perú.

En el fondo del océano, al mismo nivel que estos criptógamos subterráneos, vegetan en una oscuridad no menos profunda, algunos *fucus* y ciertas especies de *ulva* que salen enredadas en la sonda y cuyo color verde es difícil expliquen los físicos.

Luego que abandonamos esta multitud de vegetales subterráneos para subir a la superficie, nos hallamos de repente trasladados a una región en donde la naturaleza ha sabido reunir las formas vegetales más majestuosas y se ha complacido en agruparlas del modo más agradable; me refiero a la región de las palmeras y scitamíneas, que desde el nivel del océano se extiende hasta 1.000 metros más arriba. Esta es la patria de las *musa*, *heliconia*, *alpinia*, de las liliáceas, las más odoríferas, y de las palmas. En estos climas ardientes vegetan el *theophrasta*, el *plumería*, el *mussaenda*, el *caesalpinia*, el *cecropia peltata*, el *hymenea*, el bálsamo de Tolú y el *cuspare* o quina de Caroni. En las costas áridas del mar, a la sombra de los cocos, del *laurus persea* y del *mimosa inga*, crecen el *allionia*, el *conocarpus*, el *rhizophora mangle*, los *convolvulus littoralis* y *brasiliensis*, el *talinium*, el *avicennia*, el *cactus pereskia* y el *sesubium portulacastrum*.

Algunos de los vegetales de esta región presentan anomalías singulares y excepciones notables a las leyes generales de la vegetación. Las palmeras de la América meridional, como las del Antiguo Continente, no pueden soportar el frío de las montañas elevadas. Una sola presenta el fenómeno extraordinario de vegetar solamente en una altura igual a la del Monte-Cenis, y hasta la del Canigou. El *cerowylon andicola*, única palma alpina que hasta hoy se conoce, crece en los Andes de Quindío y de Tolima, bajo 4° 25' de latitud boreal, desde la altura de 1.860 hasta la de 2.870 metros y su tronco revestido de cierta especie de cera que Mr. Vauquelín acaba de analizar, suele tener más de 54 metros de alto. En la historia de la expedición del almirante Córdova se anuncia haberse encontrado

en ciertas barrancas del estrecho de Magallanes, es decir por los 53° de latitud austral, una palma. Este hecho es singular, sobre todo si se reflexiona en que no es posible confundir las palmas con otros vegetales, excepto con los helechos arbóreos, cuya existencia en aquel estrecho no sería menos curiosa (1). En Europa el *chamaerops* y la palma de dátíl no pasan de los 43° 40' de latitud.

Las scitamíneas, y en particular las especies conocidas de *heliconia*, no crecen a una altura superior a 800 metros. Cerca de la cumbre de la Silla de Caracas hallamos, es cierto, a la altura de 2.150 metros sobre el nivel del mar, una especie de scitamínea de 3 a 4 metros de altura y tan abundante que impedía el paso; pero de su aspecto deducimos, por no haber podido ver la flor, que era una especie nueva de *heliconia* capaz de resistir a la temperatura fría de estas regiones. Las plantas que crecen en los estanques salados me parece que por lo general son menos sensibles a la diferencia de temperatura y de presión barométrica; así es que el *sesubium portulacastrum* que cubre las costas de Cumaná vegetan también abundantemente en la llanura de Perote, al oriente de la ciudad de Méjico, cuya elevación es de 2.340 metros, pero siempre en terrenos impregnados de carbonatos y muriatos de sosa. Después de la región de las palmas y de las scitamíneas, comienza la de los helechos arbóreos y de las *cinchona*. Esta última es más extensa que la de los helechos, que no viven sino en los climas templados entre 400 y 1.600 metros de altura, mientras que las quinás suben hasta 2.900 metros sobre el nivel del mar. Las especies de *cinchona* que resisten mejor el frío, son la *cinchona lancifolia* y la *cinchona cordifolia* de Mutis y las que descienden a un nivel más bajo, son la *cinchona oblongifolia* y la *cinchona longiflora*. He visto árboles bien lozanos de esta última a 740 metros de altura. La famosa quina de Loja, que crece en los bosques de Cajanuma y de Uritucinga, y que es enteramente diversa de la quina anaranjada de Bogotá, vegeta desde los 1.900 a 2.500 metros. Esta especie tiene cierta analogía con la *cinchona glandulifera* de la flora del Perú, pero se diferencia de ella esencialmente. Hasta aquí sólo se ha hallado cerca de Loja, entre el Río-Zamora y el Río-Cachiyaco, en las provincias de Jaén de Bracamoros, en las inmediaciones del pueblo de Sagique, y en un recinto poco extenso del Perú cerca de Huancabamba. La roca que le sirve de base es el esquisto micáceo, y para que se olvide enteramente el nombre inexacto de *cinchona officinalis*, la designaremos con el nombre de *cinchona condaminea*, porque el primero que la dibujó fue el ilustre astrónomo Mr. de la Condamine. Algunos viajeros pretenden haber visto quinás a alturas de 4.600 metros ya cerca

(1) Los viajes posteriores no parece que hayan confirmado la narración del almirante Córdova. Por lo menos, en el viaje de Mr. Dumont d'Urville, que tengo a la vista, sólo se mencionan en el estrecho de Magallanes ciertas hayas (le hêtre antarctique) en forma de parasol. No sería extraño que se hubiese confundido este árbol con una palma. — A.

del límite de la nieve permanente, pero es porque han confundido con la quina el *wintera* y algunas especies de *weinmannia* cuyas cortezas contienen tanino con abundancia y se usan también como febrífugos. Nosotros no hemos visto ningún árbol del verdadero género *cinchona* a una altura superior de 2.900 metros, ni inferior a 700 metros sobre el nivel del mar, porque la quina de Filipinas que ha descrito Cavanilles, y la que se ha descubierto últimamente en el valle de Guines en la isla de Cuba, parece que pertenecen a un género diferente. Del mismo modo que muchos vegetales poco análogos entre sí dan caucho, como unos *ficus*, el *hevea*, un *lobelia*, el *castilloa* y algunos euforbios; que el alcanfor lo producen muchas plantas que no pertenecen al mismo género, por ejemplo en Asia un laurel y en el Perú, en la fértil provincia de Cochabamba, un arbusto didinámico muy común descubierto por M. Haenke, del cual podrían extraerlo; que la cera vegetal pertenece, no solamente al fruto de un mirica, sino también al tronco de una palma: así también el principio febrífugo de la quina existe en plantas que no pertenecen al mismo género; y no hay razón para creer que productos cuyas propiedades químicas son las mismas, no sean elaborados en vegetales de diferente estructura. El cuspare de las llanuras de Caroni cerca de Upatu, es un árbol majestuoso que produce la corteza de angostura y cuyo género es bien diverso de las *cinchonas*, y sin embargo no sería fácil al mejor químico distinguir la infusión del cuspa de la de la quina amarilla de Santa Fe. En las costas del mar del Sur, al occidente de Popayán y cerca de Atacames, vegeta un árbol que participa de las propiedades del *cinchona* y del *wintera* y que sin duda difiere también de ambos géneros. El cuspare de la Guayana, el cuspa de la Nueva Andalucía y la cascarilla de Atacames, vegetan todos tres al nivel del mar y en sus jugos la naturaleza ha preparado un principio análogo al de las verdaderas quinas que vegetan a 2.800 metros.

Me propongo publicar, en la relación de mi viaje a los trópicos, una carta *botánica del género cinchona*, en la cual indicaré los parajes de uno y otro hemisferio en donde crece este árbol interesante. Allí se verá que él se prolonga en la cordillera de los Andes en un espacio de más de setecientas leguas de largo y será fácil seguirlo desde los 20° de latitud austral en el Potosí y la Plata hasta la sierra nevada de Santa Marta bajo los 11° de latitud boreal. Todo el declive oriental de los Andes, al sur de Huanuco, cerca de las minas de Tepuani en las inmediaciones de Apollobamba y de Yuracares, es una selva no interrumpida de quinas, que Mr. Haenke ha podido recorrer hasta cerca de Santa Cruz de la Sierra. Infiérese que este árbol no se extiende más al oriente, porque hasta hoy no se ha descubierto en las montañas del Brasil, que parecen sin embargo ligadas a los Andes del Perú por la cordillera de Chiquitos. Partiendo de La Paz, las *cinchonas* se difunden, por las provincias de

Gualias y Guamalies, a Huancabamba y Loja. Descienden por el oriente a la provincia de Jaén de Bracamoros, y aún alcanzan a coronar las colinas vecinas del río Amazonas, cerca del estrecho famoso de Manseriche. Desde Loja, las quinas se extienden en el Reino de Quito hasta Cuenca y Alausí, crecen y se multiplican al oriente del Chimborazo, pero dejan de verse en la planicie elevada de Riobamba y Quito y en la provincia de Pasto hasta Almaguer. ¿Será por ventura que las grandes catástrofes volcánicas que han devastado estos países han disminuído también las especies vegetales? Aquí hemos notado que en general la vegetación es menos variada que en otras regiones situadas a la misma altura sobre el mar. Al norte de Almaguer, cuya latitud es de 1° 51' 57" según mis observaciones, las quinas vuelven a verse con abundancia en la provincia de Popayán y se continúan sin interrupción por los Andes de Quindío, la vega de Supía, las fértiles colinas de Mariquita, Guaduas y Pampolona, hasta las montañas de Mérida y de Santa Marta, en donde varios manantiales de agua hidrosulfurosa hirviendo se juntan con las aguas heladas de la nieve que se derrite.

La Silla de Caracas y algunas montañas de la provincia de Cumaná (el Tumiriquiri, las inmediaciones del convento de Caripe y la garganta de Guanaguana "*Naguanagua*") tienen de 1.300 a 2.500 metros de altura, y por tanto disfrutan de suficiente frescura para favorecer la vegetación de las *cinchonas*; lo mismo sucede en el Reino del N. España, en donde las planicies altas tienen un clima enteramente semejante al del Alto Perú; y sin embargo ni en Cumaná ni en Méjico se han descubierto hasta aquí *cinchonas*. ¿Dependerá acaso esta anomalía de las pocas montañas de que están rodeadas las sierras de Guamoco y de Santa Marta? La cordillera de los Andes desaparece casi enteramente entre el golfo de Cupica y las bocas del Atrato y el istmo de Panamá es más bajo que el límite inferior de la *cinchona*. ¿Podrá quizás atribuírse a los obstáculos que ha encontrado esta planta en el clima ardiente de estas comarcas para continuar su propagación al norte, o por ventura vendrá un día en que se descubran también las quinas en los hermosos bosques de Jalapa, al oriente de Veracruz, en donde el aspecto del suelo, los helechos arbóreos, las melástomas arborescentes, el clima templado y la humedad del aire, parecen prometer a cada paso al botánico el árbol bienhechor que hasta aquí ha burlado sus esperanzas?

En la región templada de las *cinchona* crecen algunas liliáceas: tales son, por ejemplo, el *cyprura* y el *sisyrinchium*, las *melastoma* de flores moradas, las pasifloras arbóreas tan altas como nuestras encinas del norte, el *bocconia frutescens*, el *thibaudia*, el *fuchsia* y ciertas *alstrameria* hermosísimas. Aquí se levantan majestuosamente en los aires los *macrocnenum*, los *lysianthus* y los cucularios, mientras que la tierra se cubre de *kaehltreutera*, *weissia*, *diceranum*, *tetraphis* y otros musgos siempre verdes.

En los barrancos se esconden el *gunnera*, el *dorstenia*, los *oxalis* y multitud de *arum* desconocidos.

Por los 1.700 metros se hallan el *porlieria hygrometrica* descrito por Ruiz y Pavón, los *citrosma* de hojas y frutos odoríferos, los *eroteum*, los *hypericum baccatum* y *cayenense* y muchas especies de *simplocos*. Pasando 1.200 metros, ya no se encuentran más mimosas de hojas irritables que se cierran al contacto, la frescura de estas altas regiones señalan este límite a su irritabilidad. Desde los 2.600 metros y principalmente a los 3.000 los *acaena*, *dichondra*, *nierembergia*, *hidrocotile*, *nerteria* y *alchemilla* forman un césped espeso. Esta es la región de las *weinmania*, de las encinas, del *vallea stipularis* y de las *spermacocce*. La *mutisia* trepa sobre los más altos árboles.

Las encinas (*quercus granatensis*) no comienzan en las regiones ecuatoriales sino arriba de 1.700 metros. En Méjico bajo los 17° y 22° de latitud, las he visto descender a 800 metros. Estos son los únicos árboles que bajo el ecuador presentan algunas veces el espectáculo de la primavera, porque pierden a la vez todas sus hojas y la tierna verdura de los retoños se junta con la de los *epidendrum*, parásitos que se nutren en sus ramas.

El *cheirosthemon*, género nuevo de las malváceas, cuya monografía interesante se debe a Mr. Cervantes, catedrático de botánica en Méjico, se halla también en estas elevadas regiones; mas este árbol, cuya flor es tan singular, no se ha descubierto todavía en los Andes del Perú. Por mucho tiempo no se conoció sino un solo individuo, en uno de los barrios de la ciudad de Toluca en Méjico, y como este género vegeta espontáneamente en el Reino de Guatemala, es probable que el árbol de Toluca fue plantado por algunos mistecas. Hernández alcanzó a ver reliquias de los jardines de Ixtapalapan que prueban la afición por el cultivo y por las bellezas del reino vegetal de pueblos a quienes estamos acostumbrados a dar el epíteto de bárbaros.

Cerca del ecuador, los árboles corpulentos cuyo tronco tiene más de 20 o 30 metros de altura, no crecen arriba de los 2.700 metros. Desde el nivel de la ciudad de Quito, los árboles son más pequeños y su altura es muy inferior a la que llegan las mismas especies en climas más templados. A los 3.500 metros de altura cesa toda vegetación arbórea, pero abundan los arbustos, tales como los *berberis*, los *duranta Ellisii* y *Mutisii* y una *barnadesia*. Estas son las plantas que caracterizan la vegetación de las planicies de Pasto y de Quito; la de Bogotá se distingue por sus *polymnia* y los *datura* arbórea. Los *castilleja integrifolia* y *fissifolia*, el *columella*, el hermoso *embothryum emarginatum* y el *clusia* de cuatro anteras, son comunes en esta región.

El verde césped que cubre la tierra aparece esmaltado con las corolas doradas de las calceolarias. Estas tienen su zona que comienza a 1° de latitud boreal, y en cuanto al límite austral sin duda lo fijarán los señores Ruiz y Pavón que las han estu-

diado hasta en Chile. Desde 2.800 hasta 3.300 metros, ya en las cumbres de la cordillera, hallamos la región de las wintera y de las escallonia. El clima frío y siempre húmedo de estas alturas que los indígenas llaman páramos, produce arbustos del tronco corto y atezado que se divide en multitud de ramas cubiertas de hojas duras y de un verde lustroso. Suelen encontrarse en estas alturas algunos árboles de quina naranjada, algunos *embotrium* y las *melastomas*, de flores casi purpurinas. La *alstonia*, con cuyas hojas desecadas se prepara un té saludable, el *wintera granatensis* y el *escallonia tubar*, que extiende sus ramas en forma de parasol, se hallan en ciertos parajes formando grupos. A su sombra crecen *lobelias* pequeñas y *swertias quadricornis*. Las plantas arbóreas cesan enteramente, como he dicho ya, a la altura de 3.500 metros. Solamente en la pendiente del volcán de Pichincha, en un valle angosto que principia en el Guagua-Pichincha, he hallado un grupo de singenesias arbóreas cuyos troncos suben a 7 u 8 metros de altura. La región de las plantas alpinas se extiende entre los 2.000 y los 4.100 metros. Abundan en ella las *stachelina*, las gencianas y la *espetelia frailexon* de hojas velludas, con las cuales se abrigan los pobres indios a quienes la noche sorprende en aquellas solitarias regiones. Las *lobelia nana*, *sida pichinchensis*, *ranunculus gusmani*, *ribes frigidum*, *gentiana quitenensis* y multitud de otras especies nuevas, que describiremos en el tratado especial de las plantas equinoxiales, esmaltan la pelusa. Los *molina* son los arbolillos que hemos visto crecer a mayores alturas en el volcán de Puracé, cerca de Popayán, y en el de Antisana.

Las gramíneas se sustituyen a las plantas alpinas a la altura de 4.100 metros, y el término superior de la región que ellas ocupan es por los 4.600 metros. Cubren el suelo las *jarava*, los *stipas*, muchas especies nuevas de *panicum*, de *agrostis*, de *avena* y *dactylis*. Desde lejos parece una alfombra dorada que los habitantes del país llaman pajonal. En esta región cae algunas veces nieve. Pasando los 4.600 metros, desaparecen enteramente las fanerógamas bajo el ecuador. Desde aquí hasta la línea de la nieve permanente, no hay otras plantas que el liquen, que cubre las rocas y que se esconde bajo la nieve misma. En el ángulo de una roca, a poca distancia de la cima del Chimborazo, a 5.554 metros de altura, hallé el *umbilicaria pustulata* y el *verrucaria geográfica*, últimos seres organizados fijados al suelo que vimos a tanta altura.

Tales son los fenómenos principales de la vegetación que presenta el cuadro físico de las regiones ecuatoriales; sería conveniente que poseyésemos uno semejante para la Europa. Las obras clásicas de Pallas, Jacquin, Wulfen, Lapeyrouse, Schranck, Villars, Host y tantos otros naturalistas viajeros, encierran muchos datos que pudieran aprovecharse. Los célebres botánicos que han recorrido los Alpes de Salzburgo, del Tirol y de la Styria, los que han visitado las cumbres elevadas de la Suiza y de la

Saboya, formarán sin duda cartas botánicas mucho más completas que este breve ensayo que ofrezco al público. ¿Quién puede reunir materiales más preciosos para un trabajo de esta naturaleza, que el sabio que ha descubierto en el pico helado de los Pirineos aquella inmensa acumulación de restos de seres orgánicos, y que, tan instruido en geología como en botánica, reúne al arte de observar el don privilegiado de hablar a la imaginación? (1).

Antes he manifestado las causas que impiden que los fenómenos de la geografía de las plantas no sean ni tan variados ni tan constantes bajo los 45° de latitud como bajo el ecuador. Sin embargo, a pesar de este inconveniente, el cuadro físico de los climas templados no dejaría por esto de ser interesante. En el centro se vería el Monte-Blanco, en la cadena elevada de los Alpes, con una altura de 4.775 metros. El declive de esta cadena llega por una parte al océano Atlántico y por la otra al Mediterráneo, en donde los *chamaerops*, las palmeras de dátíl y muchas otras plantas del Monte-Atlas están anunciando la proximidad del Africa. En este cuadro la nieve perpetua bajaría a 2.550 metros de elevación sobre el mar, es decir a una altura en la cual vegetan bajo el ecuador las palmas que producen la cera, las quinas y los más robustos árboles. Así es que la zona que comprende desde el nivel del mar hasta la nieve permanente, es casi la mitad más angosta en nuestros climas que en los trópicos; pero el manto de nieve que oculta las montañas más elevadas en Europa, el Monte-Blanco y el Monte-Rosa, tiene 600 metros más de extensión que el que cubre el Chimborazo. Sobre las rocas escarpadas en que la nieve no puede posarse, vegetan en los Alpes que rodean al Monte-Blanco a más de 3.100 metros de altura, el *androsace chamaejasma* (Jacq.), el *silene acaulis*, que descende hasta 1.500 metros y que Saussure halló a 3.468 metros; el *saxifraga androsacea*, el *cardamine alpina*, el *arabis caerulea* de Jacq. y el *draba hirta* de Villars, que es el *draba stellata* de Wild. También se elevan desde la llanura hasta estas altas regiones, el *myosotis perennis* y el *androsacca carnea*, aunque disminuyendo su porte a proporción de la altura. La última se convierte en uni-flora y se halla de 1.000 a 3.100 metros. En los Pirineos, las regiones altas de 2.400 a 3.400 metros, están adornadas con el *cerastium lanatum*, Lam., la *saxifraga groenlandica*, *saxifraga androsacea*, *aretra alpina* y *artemisia rupestris*. El *cerastium lanatum* no se encuentra abajo de 2.600 m. En los Alpes vegetan de 2.500 a 3.100 m., sobre los montones de piedras y guijarros que rodean las nieves perpetuas, y en los estanques helados, el *saxifraga biflora* (Allion), el *saxifraga oppositifolia*, el *achillea nana*, el *achillea atrata*, el *artemisia glacialis*, *gentiana nivalis*, *ranunculus alpestris*, el *ranunculus glacialis* y el *juncus trifidus*. En la cadena alta de los Pirineos crecen desde los 1.500 hasta 3.000 metros el *poten-*

tilla lupinoides (Wild.), el *silene acaulis*, el *sibbaldia procumbens*, el *carex cúrvula* y *carex nigra* (Allion), el *sempervivum montanum* y el *sempervivum arachnoidcum*, el *arnica scorpioides*, el *androsacca villosa* y el *androsacca carnea*. En los Alpes, entre 2.300 y 2.500 metros, línea de las nieves, crecen, no sobre las piedras sino en una tierra fértil, en praderas humedecidas por el agua de nieve derretida y muy oxigenada, y cubiertas de un césped de *agrostis alpina*, los vegetales que siguen: *saxifraga aspera* y *bryoides soldanella*, *alpina viola biflora*, *primula farinosa*, *primula viscosa*, *alchemilla pentaphyllea*, *salix herbacea*, el cual sube más que ningún otro vegetal leñoso, el *salix reticulata* y el *salix reclusa*. El *tussilago farfara* y el *statice armeria* se dan también desde los lugares más bajos hasta las alturas de 2.600 metros. A esta elevación se encuentran en los Pirineos el *scutellaria alpina*, *senecio persicifolius*, *ranunculus alpestris*, *ranunculus parnassifolius*, *galium pyrenaicum* y el *arctia vitaliana*. Más arriba del límite inferior de las nieves perpetuas, entre 1.500 y 2.005 metros de altura, vegetan en los Alpes de Saboya, el *eriophorum scheuchzeri*, *eriophorum alpinum*, el *gentina purpurea*, *gentiana grandiflora*, *saxifraga stellaris*, *azalea procumbens* y el *tussilago alpina*. A la misma altura en los Pirineos, el *passerina geminiflora*, *passerina nivalis*, *merendera bulbocodium*, *crocus multifidus*, *fritillaria meleagris* y el *anthemis montana*. Más abajo se hallan el *genista lusitanica*, *ranunculus gouani*, *narcissus bicolor*, *rubus saxatilis* y muchas gencianas. El *rhododendrum ferrugineum*, prefiere en general las alturas de 1.500 a 2.500 metros, aunque Mr. Decandolle, a quien soy deudor de estas observaciones sobre los Alpes, lo ha visto también en la cadena del Jura, en el fondo del Creux du Vent, a una altura de 970 metros sobre el nivel del océano.

El *linnaea borealis*, que se halla al nivel del mar, en Suecia, en los Estados Unidos, en Nootka-Sund y también en las inmediaciones de Berlín, vegeta igualmente en los Alpes de la Suiza a 500 y 700 metros de elevación. Se encuentra en el Valés, a orillas del torrente que corre bajo la Cabeza-Negra; en el San Gotardo, donde Haller lo observó el primero; cerca de Ginebra, según Saussure, en la montaña de Voiron; y en Francia en los alrededores de Montpellier, en la Espinosa.

Los árboles cuyo tronco excede cinco metros no se ven en el ecuador a una elevación superior a 3.500 metros. En la Nueva España por los 20° de latitud se halla un pino análogo al *pinus strobus* a la altura de 3.900 metros, y las encinas abundan hasta los 3.100 metros. El naturalista que no se haga cargo de los fenómenos de la geografía de las plantas supondrá que estas montañas cubiertas de elevados pinos no pueden llegar a la altura del pico de Tenerife. Mr. Ramond ha notado en los Pirineos que los dos árboles que más se encumbran, son el *pinus sylvestris* y el *pinus mughos* los hay entre 2.000 y 2.400 metros. El *abies tavifolia* y el *taxus*

(1) Mr. Ramond, autor de las Observaciones hechas en los Pirineos y del viaje al Mont-Perdú.

communis comienzan a 1.400 metros y no desaparecen hasta los 2.000 metros. El *fagus sylvatica* ocupa la región mediana de 600 a 1.800 metros; mas el *quercus robur* que habita la llanura, no se extiende sino hasta los 1.600 metros, acabando así 200 metros más arriba que el límite inferior del *pinus mugho*.

Mr. Ramond (1) me ha comunicado algunas observaciones muy importantes sobre el máximum y el mínimum de altura a que se hallan las diversas especies de un mismo género. Tomando como ejemplo los géneros *primula*, *ranunculus*, *daphne*, *erica*, *gentiana* y *saxifraga*, voy a presentar la tabla de las alturas en que vegetan las especies de estos géneros en los Pirineos.

		Metros
<i>Gentiana</i>	pneumonanthe	0 a 800
	verna	600 a 3.000
	acaulis	1.000 a 3.000
	campestris	1.000 a 2.400
	ciliata	1.200 a 1.800
	lutea	1.200 a 1.600
<i>Daphne</i>	punctata	1.600 a 2.000
	laureola	300 a 2.000
	mezereum	1.000 a 2.000
<i>Primula</i>	cnorum	2.000 a 2.400
	elatior	0 a 2.200
	integrifolia	1.500 a 2.000
<i>Ranunculus</i>	villosa	1.800 a 2.400
	aquatilis	0 a 2.100
	gouani	500 a 2.000
	thora	1.400 a 2.000
	alpestris	1.800 a 2.600
	amplexicaulis	1.800 a 2.400
	nivalis	2.000 a 2.800
	parnassifolius	2.400 a 2.800
<i>Saxifraga</i>	glacialis	2.400 a 3.200
	tridactilides	0 a 40
	geum	400 a 1.600
	longifolia	800 a 2.400
	aizoon	800 a 2.400
	pyramidalis	1.200 a 2.000
	exarata	1.400 a 1.800
	cespitosa	1.600 a 3.000
	oppositifolia	1.600 a 3.400
	umbrosa	1.400 a 1.800
	granulata	1.200 a 1.600
<i>Erica</i>	groenlandica	2.400 a 3.400
	androsacea	2.400 a 3.400
	vagans	0 a 900
	vulgaris	0 a 2.000
<i>Erica</i>	tetralix	500 a 2.400
	arborea	550 a 700

Las saxifragas del Tirol presentan fenómenos análogos a las de los Pirineos. El conde de Sternberg, que ha herborizado en estas montañas y a

(1) Véanse sus observaciones botánicas, página 21 del Viaje al Mont-Perdú, publicado en 1803, y la memoria sobre las plantas alpinas en los Anales de historia natural.

quien debemos una descripción geológica del Baldo, me ha comunicado una noticia interesante relativa al *rhododendrum* y otras plantas alpinas, que me ha parecido conveniente transcribir aquí literalmente para utilidad de los físicos y botánicos.

“La región de los *rhododendrum*, dice Mr. de Sternberg, a menos que sobrevenga alguna circunstancia local, no comienza abajo de los 876 a 974 metros. No los he encontrado a una altura inferior de 100 metros arriba del Wallerse, en Baviera, el cual se levanta a 817 metros sobre el nivel del mar. El *rhododendrum chamaecistus* no baja tanto como el *ferrugineum* y el *hirsutum*, y vegetan igualmente sobre la caliza primitiva como sobre la secundaria en las *Sette communi* y en el Monte-Sumano que tiene 1277 metros de altura. Estos vegetales me han acompañado hasta la altura de 1950 metros.

“La región de los saxifragas alpinas me parece la más dilatada en los Alpes del Tirol. He hallado las saxifraga *cotyledon* y *aizoon*, en el valle de Eiszach, entre Brixen y Botzen, a 360 metros de altura, y he continuado viéndolas hasta la cima de la Grapa, cerca de Bassano, a 1.684 metros. Las *saxifraga aspera* y *androsacea* se encuentran también en la región media; después comienzan las saxifraga *autumnalis*, *mucosa*, *moschata* y *petraea*, y últimamente las *saxifraga burseriana* y *bryoides*, que crecen en la cumbre del Baldo a 2.225 metros. Las primulas, particularmente la *farinosa*, *auricula*, *marginata* y *viscosa*, no aparecen en los Alpes del Tirol bajo 800 metros y sin embargo, por una anomalía singular, la primula *farinacea* crece en la llanura de Ratisbona. Por lo que hace al *ranunculus glacialis* y al *ranunculus sequierii*, no los he visto jamás a una elevación menor de 1950 metros”.

Mas para completar la geografía de las plantas sería preciso formar cuadros, no solamente para las regiones vecinas al polo boreal para los climas templados desde los 40° a los 50° de latitud y para las regiones ecuatoriales, sino también para el hemisferio austral, porque las plantas de Chiloe y de Buenos-Ayres son muy diferentes de las de España y de Grecia. Sería menester también separar los cuadros de cada continente, el Nuevo y el Antiguo. Hay comarcas que podrían suministrar preciosos materiales para la formación de los cuadros de las regiones ecuatoriales del Africa y para las Indias orientales, tales son Madagascar, cuyas altas cumbres graníticas permanecen siempre nevadas, según Commerson, y cuyas costas han sido examinadas con tanto esmero por Mr. du Petit-Thouars, el pico de Adam en Ceilán y la empinada montaña de Ophyr en la isla de Sumatra, a la que Marsden asigna una altura de 3.949 metros. El ilustre Pallas podría dar a conocer la geografía de las plantas en los climas templados de Asia. La de las regiones templadas de los Estados Unidos, queda al cuidado de Mr. Barton, tan distinguido zoologista como botánico y filólogo. Es verdad que las montañas no

son muy elevadas en los Estados Unidos (la más alta no pasa de 2.000 metros (1), pues el cálculo de Cutler y Belknap que atribuye al White Mountain en New Hampshire 3.100 metros parece exagerado) y que no se advierten allí la variedad de los fenómenos que hemos admirado en los Andes elevados del resto del Nuevo Continente; pero en compensación ostentan su diversidad los vegetales arbóreos de las hermosas llanuras de la Carolina, Virginia y Pensilvania. En sólo las encinas hay, en los Estados Unidos, un número tres veces mayor de especies diferentes, que las que ofrecen todos los géneros de árboles de Europa juntos. El aspecto de la vegetación es más variado y más agradable a igualdad de latitud en el Nuevo Continente que en el Antiguo. Los *gleditschia*, tulipanes y magnolias contrastan agradablemente con la verdura opaca de los pinos y de los *thuza*. Aquí parece que la naturaleza se ha esmerado en adornar la tierra que más tarde debía habitar un pueblo enérgico, industrial y digno de gozar *en paz* de todos los bienes que procura la libertad social.

Mas el cuadro físico de las regiones ecuatoriales no ha de comprender solamente lo que dice relación a la geografía de las plantas, sino que puede abrazar todo el conjunto de nuestros conocimientos sobre las cosas que varían en razón de la altura sobre el nivel del mar; y esta consideración me ha decidido a reunir en catorce escalas muchos números que son el resultado de las indagaciones multiplicadas que hasta aquí se han hecho en los diferentes ramos de la física general. Como estas escalas no necesitan explicación, diré dos palabras solamente relativas a su construcción. Las que indican la temperatura, el estado higroscópico y la tensión eléctrica del aire, el color azul del cielo, la geología, la cultura de la tierra y la diversidad de animales según las alturas que habitan, se fundan en las observaciones hechas durante mis viajes y los detalles se hallarán con toda extensión en la *Relación histórica*.

ESCALA DE TEMPERATURA

Esta escala presenta el máximo y el mínimo de calor que el termómetro centígrado indica, de 500 en 500 metros. Estos resultados son el fruto de muchos millares de observaciones hechas en cinco años, algunas de hora en hora. La temperatura media que se indica representa el término medio de todas las observaciones practicadas a tal o tal altura y no el medio entre el máximo y el mínimo. Me he esforzado además en evitar la confusión que resultaría de considerar como efecto de una ley general lo que puede depender solamente de causas locales. Así, por ejemplo, el cuadro indica que al nivel del mar el termómetro no baja de 18° 5 y sin embargo, en La Habana se ha visto a 1° 4 y aun a cero; pero esta anomalía dimana de que esta

(1) Véase el viaje de Mr. Volney, que contiene grandes ideas sobre la construcción del globo en la parte boreal del Nuevo Continente.

ciudad está 13° más distante del ecuador que la zona cuyos fenómenos me he propuesto describir y de que mientras los vientos del norte soplan impetuosamente, la proximidad del continente produce allí un frío que no podía esperarse en aquella latitud. En la isla de Santo Domingo, que es un poco más meridional, el termómetro se sostiene constantemente en lo llano entre 23° y 24°.

Parece superfluo advertir que todas las observaciones del termómetro se han hecho a la sombra y lejos del reflejo de los rayos solares.

Alturas sobre el nivel del mar en metros	Máximum de temperatura	Mínimum de temperatura	Temperatura media
De 0 a 1.000	+ 38° 4	+ 18° 5	+ 25° 3
De 1.000 a 2.000	+ 30 0	+ 12 5	+ 21 2
De 2.000 a 3.000	+ 23 7	+ 1 2	+ 18 7
De 3.000 a 4.000	+ 20 0	+ 0 0	+ 9 0
De 4.000 a 5.000	+ 18 7	— 7 5	+ 3 7
De 5.000 a 6.000	+ 16 0	— 10 0	— 2

De 5.000 metros arriba no puede contarse ya con mucha exactitud, porque esta alta región ha sido muy poco visitada hasta hoy y eso por pocas horas, para que pueda juzgarse con certeza de su temperatura media. El frío que el termómetro indica en las cumbres de los Andes nunca es considerable, y aunque se sufre con más incomodidad, esto depende de la menor cantidad de oxígeno que se aspira en una atmósfera dilatada, en la depresión del sistema nervioso y en otras causas que son desconocidas hasta hoy. Los académicos franceses, en su cabaña de Pichincha a 4.735 metros de altura, no vieron el termómetro sino a 6° bajo cero, y mi termómetro, en el Chimborazo, a 5.908 metros, no mostró sino 1° 8. En el gran volcán de Antisana, a la altura enorme de 5.403 metros, este mismo termómetro subió a la sombra a 19°. Por el contrario en los lugares más calientes de la tierra, Cumaná, La Guayra, Cartagena de Indias, Guayaquil, en las costas del mar del sur, en las orillas del Magdalena y sobre las orillas del Amazonas, el término medio de la temperatura es de 27°, mientras que en París y en Milán es de 11° a 13°. Sin embargo, en aquellas mismas regiones ecuatoriales, el termómetro llega pocas veces a los extremos del calor a que sube en el norte de Europa. Examinando un registro de más de 21.000 observaciones hechas por el señor Orta, oficial de marina español, he visto que en Veracruz, en trece años, el termómetro centígrado no subió sino tres veces a los 32° y no pasó nunca de 35° 6, cuando en París es común verlo subir a 36°, y el 14 de agosto de 1773, llegó a 38° 7. En Veracruz la temperatura media de los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, es de 27° 5 y yo he hallado que hace sus estragos la cruel fiebre adinámica, que se conoce con el nombre de vómito prieto, todas las veces que la temperatura media del mes pasa de 23° 7. En las regiones ecuatoriales, los términos extremos del mayor y menor calor distan entre sí de 16° a 20°. En Europa bajo

los 5° de latitud, esta misma diferencia es de 62° del termómetro centígrado.

Como la superficie de la tierra se calienta de un modo extraordinario en las costas del mar o en las inmensas llanuras del Orinoco, algunas plantas herbáceas, como los *sesuvium*, *gomprena*, *thalinum*, *killigia* y algunas mimosas, medio sepultadas en la arena, soportan un calor de 52°; y yo he visto plantas, en la planicie de Jorullo en Méjico, que vegetaban en una arena negra que hizo subir el termómetro a 60° en el día. Las *staelina*, los *swertia* y otras plantas de la cima de los Andes viven por el contrario todo el año, si se exceptúan las pocas horas en que las calienta el sol, a una temperatura de 3°5. Estas plantas alpinas por una parte, y las palmas por la otra, puede decirse que ocupan las dos extremidades del termómetro botánico.

Las temperaturas medias del segundo lugar de la escala, es decir las que corresponden a las alturas de 1.000 a 2.000 metros, exhiben la disminución del calórico bajo el ecuador desde el nivel del mar hasta la cima de los Andes. Si pues he logrado escoger bien las observaciones en que fundo el cálculo de estas temperaturas medias, la disminución o decremento gradual que resulta podrá mirarse como más exacto que el que pueda deducirse en Europa de las pocas y aisladas observaciones hechas a una altura superior a 3.000 metros. Los viajes ejecutados a la cumbre de los Alpes y las ascensiones aerostáticas no serán nunca suficientemente repetidas para hacernos conocer con exactitud la temperatura media de las capas de aire a una altura de 3 a 5.000 metros. En los trópicos, las observaciones se facilitan por la circunstancia favorable de haber pueblos que son muchos centenares de metros más elevados que el pico de Tenerife y en los cuales un físico puede establecer su residencia sin muchas privaciones y con gran provecho para la meteorología (1).

De mis observaciones en la cordillera de los Andes, resulta que el decremento del calórico es como 5:3 más rápido desde la altura de 3.500 metros, que desde el nivel del mar hasta 2.500 metros. La capa de aire que se enfría más pronto bajo el ecuador, parece ser la que está comprendida entre 2.500 y 3.500 metros, o entre las alturas del San Gotardo y del Etna. Fácil es imaginar la influencia de la irradiación del calórico, modificada por las desigualdades de la superficie de la tierra o por la forma de las montañas, sobre este decremento o disminución. Un físico que subiera en un globo aerostático desde las llanuras que riega el Amazonas bajo la línea equinoccial, hallaría quizá la temperatura de las capas de aire que fuera encontrando muy diferentes de lo que yo creo haber obser-

vado en el declive de la cordillera, pero es probable que pasando los 4.000 metros la diferencia sería nula, porque en los Andes mismos la masa de las montañas, y por consiguiente su influencia sobre el ambiente a tanta altura, disminuyen infinitamente.

En mi excursión al Chimborazo hallé el decremento del calórico de un grado centígrado por cada 196 metros. Este mismo decremento, calculado según las temperaturas medias de mi escala termométrica, desde el nivel del mar hasta la altura de 5.500 metros sería de 189 metros por cada grado. Según Saussure, el decremento en Europa es en estío de 156 metros y en invierno de 233 metros por cada grado centígrado; pero Mr. Gay-Lussac halló en su gran ascensión aerostática, en estío, un decremento idéntico con el que resulta de mis observaciones en el ecuador; este sabio observó a 5.000 metros la temperatura cero, mientras que en París era de 30°, y a 6.000 metros, de 3° bajo cero, datos que fijan el decremento de la temperatura entre 0 y 5, 500 metros a 183 metros por cada grado; y si se calcula toda la columna de aire que Mr. Gay-Lussac atravesó, el decremento entre 0 y 6.977 metros será de 173 metros por grado centígrado. Ya he manifestado en mi memoria sobre el límite inferior de las nieves permanentes, que arriba de 4.700 metros, la diferencia de latitud parece que no influye sobre la temperatura y Mr. Gay-Lussac, el día de su última ascensión, halló sobre este límite a la latitud de 48°, capas de aire que tenían exactamente la misma temperatura que las que hallé en el Chimborazo a una altura igual. El fenómeno de la refracción horizontal, que es menor de 4 a 5 minutos bajo el ecuador que en Europa, parece contrario a esta igualdad de temperatura de las regiones elevadas, porque indica un decremento de calórico más rápido en el ecuador que el que resulta de mis observaciones, mas es preciso advertir que las refracciones horizontales en Europa son, según Delambre, menos fuertes que lo que generalmente se cree. Este fenómeno de las refracciones depende del cúmulo de todas las capas de aire que los rayos recorren y por tanto, un decremento desigual arriba de 7.000 metros, es decir en regiones que a nadie ha sido dado visitar hasta ahora, puede causar las diferencias de refracción horizontal que Bouguer observó en el ecuador. Más en verdad que la incertidumbre respecto del decremento del calórico en los inviernos de Europa y el desacuerdo (1) que ofrecen las observaciones de le Gentil y Bouguer, nos privan de resultados seguros en esta materia y por lo mismo debo limitarme a consignar aquí los hechos como los he observado en las regiones ecuatoriales.

(1) Un joven quiteño, el señor Carlos Aguirre, sobrino del desgraciado Montúfar, que acompañó al barón de Humboldt en su ascensión al Chimborazo, acaba de enviar a la Academia de Ciencias una serie de interesantes observaciones meteorológicas hechas en la hacienda de Antisana, a más de 4.000 metros de altura. — A.

(1) Mr. Delambre no cree que haya mucha diferencia entre las refracciones horizontales de las zonas templadas y las de los trópicos. Calculando de nuevo todas las observaciones hechas por le Gentil en Pondichery, en las cuales Borda había hallado un error de reducción, dedujo Mr. Delambre que en Europa y en las Indias las refracciones eran las mismas. Las observaciones de le Gentil parecen muy exactas.

ESCALA BAROMETRICA

Esta escala presenta la presión del aire atmosférico a diversas elevaciones sobre el nivel del mar, según resulta de la altura del barómetro.

Estas alturas se han calculado según la fórmula barométrica que Mr. de la Place ha publicado en su mecánica celeste, y suponiendo las temperaturas medias que dejamos consignadas en la escala termométrica. Sea X la altura dada en metros, H la altura del barómetro al nivel del mar, T la temperatura en el mismo nivel, t la temperatura correspondiente a la altura X , y h la altura del barómetro que se pretende hallar para la elevación X . La fórmula será:

$$\log m = \frac{x}{18393 \left(1 + \frac{2(T+t)}{1000} \right)}$$

y hallado el número m resultará:

$$h = \frac{H}{m \left(\frac{1+T-t}{5412} \right)}$$

En esta fórmula da de 500 a 500 metros las alturas barométricas siguientes:

Elevaciones sobre el nivel del mar	Temperatura en grados centígrados	Alturas Barométricas en metros	en líneas del pie de París
0 ^m	+ 25°3	0,76202	337, 8
500	+ 24 0	0,71961	319,03
1.000	+ 22 6	0,67923	301,18
1.500	+ 21 2	0,64134	284,28
2.000	+ 20 0	0,60501	268,24
2.500	+ 18 7	0,57073	253,05
3.000	+ 14 4	0,53689	238,06
3.500	+ 9 0	0,50418	223,50
4.000	+ 6 4	0,47417	210,20
4.500	+ 3 7	0,44553	197,55
5.000	+ 0 4	0,41823	185,40
5.500	- 3 0	0,39206	173,84
6.000	(- 6 0)	0,36747	162,95
6.500	(- 10 0)	0,34357	152,38
7.000	(- 13 0)	0,32035	142,61
7.500	(- 16 0)	0,30068	133,36

Las temperaturas medias desde 6.000 metros, que se ponen entre paréntesis, no son enteramente exactas y sólo se fundan en la ley hipotética del decremento del calórico. Mr. de Saussure observó el barómetro en el Monte Blanco a 0^m43515 (16 pulgadas 9 líneas) y Bouguer y la Condamine, en la cima del Corazón, observaron el barómetro a 0^m42670 (15 pulgadas 9,2 líneas) (1). Yo he subido al Chimborazo con mis instrumentos a una altura en que el mercurio bajó en el barómetro a 0^m37717 (13 pulgadas 11,2 líneas); y Mr. Gay-Lussac ha resistido en su ascensión aerostática a una dilatación del

(1) Nadie ha visto, dice Mr. de la Condamine, el barómetro tan bajo al aire libre y verosíblemente nadie ha subido a tanta altura. Estábamos entonces a 4.815 metros y podemos responder de la exactitud de esta determinación, sin que en ella pueda exceder el error de ocho a diez metros. (Viaje al Ecuador, página 58).

aire correspondiente a 0^m3288 (32 pulgadas 1,7 líneas).

La altura barométrica al nivel del mar se ha fijado sólo a 0^m76202 (28 p. 1,8 l.), suponiendo la temperatura a 25° centígrados. Así me la han indicado mis observaciones entre los trópicos, tanto en las costas del océano Atlántico como en las del mar del Sur. Bouguer la establece en 0,76022 (28 pulgadas 1 línea) y el geómetra español don Jorge Juan, en 27 pulgadas 11,5 líneas. La Condamine dice que "si la altura media del barómetro bajo los trópicos no es menor de 28 pulgadas, la diferencia será muy corta". Mis observaciones hechas con barómetros en los cuales se había hervido el mercurio y bien privados de aire, comparados con los del Observatorio de París, parecen probar que la presión media del aire al nivel del mar en los trópicos es algo menor que en las zonas templadas. Esta presión según Mr. Schuckburg es de 0^m76,300 (28 pulgadas 2,24 líneas), de 0,76434 según Mr. Fleuriat Bellevue, siendo la temperatura de 12°. Esta diferencia de casi dos milímetros no puede explicarse únicamente por la diferencia de la temperatura media de la Europa y de las regiones ecuatoriales, sobre todo si recordamos que en las costas del Perú, en los cinco meses del año en que el sol aparece cubierto de niebla densa, el termómetro centígrado no pasa de 15° a 16°. Las oscilaciones horarias del barómetro bajo el ecuador son para mí difíciles de explicar, sobre todo desde que he cesado de considerarlas como indicios de mareas del océano aéreo, puesto que he llegado a persuadirme que la luna no ejerce sobre ellas influencia sensible.

La elasticidad del aire de las zonas templadas varía en el mismo lugar a veces hasta 0,0450 (o 20 líneas) que el mercurio fluctúa en el barómetro. En los trópicos, donde los vientos alisios traen constantemente capas de aire de temperatura igual, desde el 10° latitud norte hasta el 10° latitud sur, esta elasticidad no varía, a la orilla del mar, más allá de 0,0026 metros (1,4 líneas) y a 3.000 metros de altura, la variación se reduce a 0,0015 (0,7 líneas). Mas si por una parte la oscilación es pequeña, por otra es digna de atención por la ley que en ella sigue el barómetro de hora en hora. Godin fue el primero que dio a conocer este fenómeno, pero no indicó las épocas del máximo y minimum de la altura barométrica. Mr. de la Condamine fija estas épocas a las 9 de la mañana y a las 3 de la tarde. Mr. Balfour en Calcuta y Mr. Moseley en las Antillas han señalado también los períodos, pero éstos no corresponden con los que yo he observado con Mr. Bonpland, velando muchas noches consecutivas para examinar las mareas nocturnas. De nuestras observaciones resulta que el barómetro está en el máximo a las 9 de la mañana, que varía muy poco en las tres horas siguientes, pero que baja después sensiblemente desde las 12 a las 4 o 4 y media de la tarde, que después vuelve a subir hasta las 11 de la noche aunque nunca tanto como

a las 9 de la mañana. Luego baja otra vez hasta las 4 y media de la mañana aunque no llega al punto que a las 4 de la tarde, finalmente vuelve a subir hasta las 9 de la mañana. Las épocas de las variaciones horarias son las mismas sobre las costas del mar del sur, en las llanuras del Amazonas y en los lugares más elevados, a 4.000 metros de altura. Parecen ser enteramente independientes de las mudanzas de temperatura y del curso de las estaciones. La marcha ascendente y descendente del barómetro es imperturbable tanto de día como de noche; ni las tempestades, ni los temblores de tierra, ni las lluvias deshechas, ni los vientos impetuosos, son capaces de alterarla y ella sigue con la mayor constancia el tiempo verdadero o la posición del sol que es lo único que influye en estas oscilacio-

nes. Hay lugares en los trópicos en que el momento en que el mercurio comienza a bajar es tan manifiesto, que puede indicar un cuarto de hora más o menos el tiempo verdadero. Suponiendo al nivel del mar bajo el ecuador el término medio del barómetro = z su altura será:

$$\begin{aligned} \text{a } 21^{\text{h}} &= z + 0,5 & \text{a } 11^{\text{h}} &= z + 0,1 \\ \text{a } 4^{\text{h}} &= z - 0,4 & \text{a } 16^{\text{h}} &= z - 0,2 \end{aligned}$$

De nuestros registros, que contienen muchos millares de observaciones respecto de las oscilaciones horarias del barómetro, citaré sólo un ejemplo que puede servir de tipo de esta regularidad. Las flechas indican por su dirección las épocas en que el barómetro sube o baja.

OBSERVACIONES HECHAS EN EL PUERTO DEL CALLAO, CERCA A LIMA, LOS DIAS 8 Y 9 DE NOVIEMBRE DE 1802: CON EL AUXILIO DEL NONIO DEL BAROMETRO PUDO ESTIMARSE FACILMENTE UN QUEBRADO DE 0,08 DE LINEA

Horas en tiempo verdadero	Barómetro en líneas	Termómetro fijo al barómetro	Termómetro al aire libre y a la sombra	Higrómetro de Dufour
El 8 de noviembre a las				
10½	336,92	19°	16°3	43°
11	336,98	19	16 2	43 7
13	336,72	19 5	16 2	44
14	336,60	19 5	16 2	42
15	336,65	19 8	16 5	43
15½	336,62	20 0	16 0	42
16	336,55	19 0	16 0	42
16½	336,80	20 5	16 3	42 5
17	336,87	22 0	16 4	42
17½	336,95	22 7	17 0	42
20	337,25	23 0	18 0	39
21	337,35	23 0	19 2	37
22½	337,13	24 5	20 4	37 5

(La observación se hizo a doce metros sobre la superficie del mar del sur, y como dejó de rectificarse exactamente el nivel del barómetro, las alturas absolutas tienen todas 0,9 de línea de menos).

El 9 de noviembre a las				
0½	336,90	25°5	22°5	34°
0¾	336,75	25 9	22 7	34
3½	336,60	26 0	23 0	34 5
4	336,45	25		
5	335,50	25 5	18 0	37
8	336,85	25 0	16 1	39
9	336,95	22 0	16 5	40
10	336,97	22 4	16 4	42
11	337,15	20 0	16 4	42
11½	336,90	20 5	16 7	42
13	336,84	20 5	17 0	43

El señor Mutis, que observó por el espacio de más de treinta años estas oscilaciones horarias, parece haberse llegado a persuadir de que las conjunciones y las oposiciones de la luna influyen en las mareas barométricas. Yo no he percibido esta influencia pero no por esto dudo que ella exista. Mr. Laplace

ha calculado el efecto de esta influencia del sol y de la luna sobre el océano aéreo, pero quizá el fenómeno de las oscilaciones horarias la encubre en el ecuador. En el hemisferio boreal hacia los límites de los trópicos, los vientos fríos del norte que soplan impetuosamente en el golfo de Méjico, hacen

subir el barómetro de 5 a 7 líneas, pero este fenómeno extraordinario que es el pronóstico más importante para la navegación entre La Habana y Veracruz, es enteramente local entre los 19° y los 23° de latitud. El juego de las oscilaciones horarias se interrumpe por la capa de aire frío que sobreviene, pero él continúa en Veracruz luego que pasa la borrasca. Mr. Cotte, computando un número considerable de observaciones hechas en Europa, dedujo que en esta parte del mundo se efectúa el minimum de la altura barométrica dos horas después de la culminación del sol, es decir dos horas antes que en el Ecuador. En nuestros climas templados las variaciones horarias del peso del aire se hacen invisibles, quizá en razón de la multitud de causas locales que hacen subir y bajar irregularmente los barómetros; pero yo creo con Mr. Van Swinden, que términos medios deducidos de algunos millares de observaciones hechas de hora en hora, mostrarían, aún en nuestras latitudes, que el barómetro también sube y baja a épocas determinadas.

Antes de terminar esta discusión sobre la presión del aire, voy a añadir una observación fisiológica. En la ciudad de Quito el barómetro se sostiene a 0,^m 54366 (20 pulgadas 1 línea). En Micuipampa, lo hallé a 0,^m 49629 (18 pulgadas 4 líneas); la elasticidad del aire que respiran los habitantes de la hacienda de Antisana, sólo hace equilibrio a una columna de mercurio cuya altura es solamente de 0,^m 46927 (17 pulgadas 4 líneas). El hombre que en los lugares bajos soporta una presión que levanta la columna de mercurio a 0,^m 76, vive sin embargo sano y robusto en alturas en donde la elasticidad del gas que respira y en el cual se mueve, se reduce casi a la mitad. Es cierto que los recién llegados sufren alguna incomodidad al respirar, sobre todo cuando hablan aceleradamente o cuando ejecutan fuertes movimientos musculares, mas esta desazón dura poco y sólo se deja sentir de un modo muy desagradable en alturas en que el barómetro baja a 0,^m 4060 (15 pulgadas), es decir a 5.000 metros, porque entonces se debilita el sistema nervioso y basta el menor esfuerzo para desmayarse. Muchas personas son acometidas de náuseas y pasados los 5.800 metros de altura, el movimiento muscular y la falta de presión atmosférica suficiente obran de tal manera sobre los vasos delgados, que la sangre sale de los ojos, labios y encías. Estos fenómenos son variables según la constitución física de los viajeros y aun hay quienes son enteramente insensibles a la falta de presión. Saussure observó que el hombre resistía mejor que las mulas a la rarefacción del aire. En efecto, yo hice subir al Cofre de Perote hasta 3.837 metros de altura un caballo que respiraba con el mayor trabajo. Me ha parecido notar que la raza de hombres blancos sufre menos en alturas que pasan de 5.800 metros que la raza de indígenas bronceados.

La presión del aire atmosférico debe influir considerablemente sobre las funciones vitales de los vegetales y especialmente sobre las de la respiración

de sus tegumentos. Aunque muchos criptógamos y entre los fanerógamos las gramíneas particularmente, son indiferentes a estas modificaciones de la presión barométrica, hay otros que no lo son. El *swertia quadricornis*, el *espeletia frailexon*, los *chiquiraya* y algunas gencianas exigen según parece para vegetar de una dilatación de aire igual a 0,^m 46 o 0,^m 49, es decir, 17 a 18 pulgadas. Muchas plantas de los Andes, trasportadas a las regiones igualmente frías de Europa, no vegetarían con la misma perfección que en su patria originaria, porque no hallarían aquí el aire dilatado que demanda su organización. Atribúyense las diferencias notables que se observan en la fisonomía de los vegetales alpinos trasplantados en los lugares bajos, únicamente a las diferencias de temperatura, de humedad y de tensión eléctrica, mas no sé por qué ha de excluirse como causa también de este fenómeno la presión barométrica que influye sin duda de un modo bien enérgico sobre la organización de los vegetales. En la naturaleza animada hay muchas causas que concurren simultáneamente para modificar las acciones vitales y no debe omitirse ninguna de ellas en la explicación de los fenómenos de la materia organizada.

ESCALA HIGROMETRICA

Esta escala muestra el decremento de humedad en el aire atmosférico en razón de la mayor altura sobre el nivel del mar. Las observaciones que han servido para calcular los términos medios se han hecho a la sombra y en tiempo sereno, con la bóveda celeste despejada. He usado del higrómetro de Saussure unas veces y otras del de Deluc, según que el instrumento debía o no absorber con prontitud la humedad del aire, mas todos los resultados aparecen en grados del higrómetro de Saussure, haciendo la corrección de la temperatura y reduciéndolos a 25°3 del termómetro centígrado. Las experiencias de Saussure y de Dalton prueban que no hay que hacer correcciones barométricas.

Alturas	Higrómetro de Saussure sin corrección de temperatura	Termómetro del higrómetro	Higrómetro reducido a la temperatura de 25°3
De 0 a 1.000 ^m	86	+ 25 3	86°
De 1.000 a 2.000	80	+ 21 2	73 4
De 2.000 a 3.000	74	+ 18 7	64 5
De 3.000 a 4.000	65	+ 9 0	46 5
De 4.000 a 5.000	54	+ 3 7	36 2
De 5.000 a 6.000	38	+ 3 0	26 7

Estos términos medios dan alguna luz respecto de la disminución de humedad en las regiones ecuatoriales, disminución que no carece de interés para el estudio de las refracciones. Esta disminución llega a 90 metros por cada grado del higrómetro de Saussure.

No obstante la sequedad extrema del aire en la cima de los Andes, en donde el higrómetro baja hasta 46° a la temperatura de 3°7 (o lo que es

lo mismo $31^{\circ}7$ del higrómetro, reduciendo el termómetro a $25^{\circ}3$), en estas regiones elevadas de 2.500 a 3.000 metros es donde uno se halla a cada instante envuelto en espesas nieblas. La frescura y el verdor que caracteriza la vegetación de los páramos depende de estas precipitaciones del vapor acuoso que son o el efecto o la causa de una fuerte tensión eléctrica.

Lo que mantiene la vegetación en las regiones bajas entre los trópicos, es el aire, que a pesar de su perfecta transparencia y de un cielo sin nubes por cuatro a cinco meses en el año, está cargado de humedad. Y en efecto si las plantas no tuvieran la propiedad de absorber el vapor húmedo del aire, no sería posible explicar cómo se sostiene la hermosa vegetación de algunas comarcas en donde, como en Cumaná, no hay ni lluvia, ni niebla, ni rocío por ocho o diez meses en el año. Las experiencias del hijo de Mr. Deluc prueban también que en Bengala existe un grado semejante de humedad al que hemos visto en la América ecuatorial.

En el valle de Méjico, cuya elevación sobre el nivel del mar es de 2350 metros, el higrómetro de Saussure baja muy a menudo de 42° a 43° cuando el termómetro señala 15° a 18° . Con el termómetro a 15° nunca pude observar en Europa una sequedad superior a 46° . ¿Qué se hacen pues los vapores que se levantan de los cinco lagos que rodean la ciudad de Méjico? No es posible suponer que sean absorbidos por la inmensa cantidad de muriato y de carbonato de sosa de que está cubierto el suelo de las inmediaciones. La más grande sequedad reina en el interior de la N. España. A una altura de 2.000 metros, la vegetación es ya escasa y el aire se siente como si se hubiere desecado artificialmente. Esta sequedad tan contraria a la salud como perjudicial a la vegetación, va en aumento de siglo en siglo, porque la mano del hombre desagua los lagos y las lluvias copiosas disminuyen. ¿Cuál no será la sequedad del aire en Persia, entre Tiflis y Tauris y en la provincia de Kermann, en donde, según Chardín, se construyen las casas con sal gema, en lugar de piedra común?

El agua evaporizada en el aire, y precipitada, ya sea en virtud de un cambio de temperatura, o por otras causas que no conocemos todavía bien, aparece a nuestra vista en grupos de vapores vesiculares que son las nubes, cuya altura, que repetidas veces he medido, me parece siempre la misma poco más o menos. Las nubes más bajas, o sea la superficie inferior de las nubes, tiene según creo una altura de 1169 metros sobre el nivel del mar. Esta es la altura en que se deja ver en el declive de la cordillera la densa niebla que envuelve una parte del año los habitantes de Jalapa, al oriente de Méjico, y del valle de Guaduas en la Nueva Granada. El límite superior de las nubes espesas está en los 3.300 metros; pero lo que es singular es la existencia de las nubecillas leves denominadas carneros a la altura de más de 7.800 metros. Yo las he visto arriba de mi estación en la cumbre del Antisana,

y Mr. Gay-Lussac las menciona en la relación de su segundo viaje aerostático. ¡Cuán leves deben ser estos vapores vesiculares para poder sostenerse a tal elevación en una atmósfera tan rara! Según las observaciones de MM. Biot et Gay-Lussac, el límite inferior parece ser en estío en Europa de 1.200 metros, como en el ecuador. A 5.267 metros de altura, el higrómetro de Mr. Gay-Lussac señalaba $25^{\circ}5$, cuando el termómetro indicaba 4° de calor, es decir que, a la temperatura de $25^{\circ}3$, que es la del estío en los lugares bajos, el higrómetro habría quedado reducido a $21^{\circ}5$ máximum de sequedad que hasta hoy ha podido observarse al aire libre.

La cantidad de lluvia que cae anualmente bajo los trópicos, es de más de 1,^m 89, o de 70 pulgadas. En Guayaquil, en el valle de Cumanacoa y entre el Casiquiare y el Río Negro, esta cantidad me parece que puede computarse a 2,^m 43, o 90 pulgadas. En los Estados Unidos, por los 40° de latitud, es sólo de 1,^m 08, o de 40 pulgadas, y en Europa, de 0,^m 48, o de 18 pulgadas.

ESCALA ELECTROMETRICA

Cuando se sube desde el nivel del mar hasta la cima de las cordilleras, se observa que la tensión eléctrica aumenta gradualmente, mientras que el calórico y la humedad del aire disminuyen en la misma proporción. Las experiencias mencionadas en mi cuadro fueron hechas a diferentes horas del día con el electrómetro de Saussure, armado de un conductor de 1,^m 4, o de 4 pies de altura, y atrayendo la electricidad atmosférica por medio del humo de la yesca, como lo propone Mr. Volta. En las regiones bajas ecuatoriales, desde el mar hasta una altura de 2.000 metros, los lechos inferiores de aire están poco cargados de electricidad, de tal suerte que, pasadas las diez de la mañana, cuesta trabajo hallar el menor indicio de este flúido, aun usando del electrómetro de Bennet. Todo el flúido parece que se acumula en las nubes, lo que ocasiona explosiones eléctricas frecuentes, las cuales se hacen periódicas generalmente dos horas después de la culminación del sol, cuando el calor es mayor y la marea barométrica está cerca del punto más bajo. En los valles de los grandes ríos, tales como el Magdalena, el Río Negro y el Casiquiare, las tempestades son constantemente cerca de media noche. Entre los 1.800 y los 2.000 metros está la zona en donde las explosiones eléctricas son más fuertes y más estrepitosas; los valles de Caloto y de Popayán son conocidos por la frecuencia de estos fenómenos. Pasados los 2.000 metros ya son menos frecuentes y menos periódicos; pero se forma mucho granizo, principalmente de 3.000 metros arriba, porque allí el aire permanece por mucho tiempo cargado de electricidad negativa, cosa que no acontece o que por lo menos no dura sino pocos instantes abajo de 1.000 metros. A una altura superior a 3.500 metros ya las explosiones son más raras, el granizo cae sin tronadas, y a veces, desde los 3.900 metros, mezclado con nieve y aún en la mitad de la noche.

Las capas de aire inmediatas a las cumbres de los Andes tienen constantemente una tensión eléctrica que puede representarse por 4 a 5 líneas del electrómetro de Saussure. La sequedad del aire y la proximidad de las nubes hacen más sensible el juego de la electricidad. Cerca de la boca de los volcanes, la electricidad pasa frecuentemente del estado positivo al negativo.

En la región superior a la nieve permanente se observan muchos fenómenos luminosos que no parecen acompañados de truenos, y la multitud de bólidos o estrellas errantes que se ven caer en la parte volcánica de los Andes, y su mayor frecuencia en las tierras calientes, inclinarían a pensar que estos fenómenos pertenecen a nuestro globo, si otras razones, especialmente su grande elevación, no se opusieran a esta suposición.

COLOR AZUL DEL CIELO

Una de las cosas que admira el habitante de las costas y lugares bajos, cuando sube a las alturas que pasan de 3.000 a 4.000 metros, es el color más oscuro que advierte en la bóveda celeste. Crece esta intensidad del color azul en razón de la dilatación del aire y de la menor masa de vapores que los rayos del sol atraviesan. El vapor vesicular esparcido en el aire dispersa la luz y le da un color blanquecino. Cuanto menor es la masa de aire por la cual nos llegan los rayos del sol, tanto más subido es el tinte del cielo y más se aproxima al color negro que nos presentaría si estuviéramos en el límite superior de la atmósfera. He usado en estas observaciones de un cianómetro construido en Ginebra por Mr. Paul, igual al que sirvió a Saussure en su viaje al Monte Blanco y me he ceñido a hacerlas en el cenit.

Me parece que puede decirse que en general el cielo es más azul, a alturas iguales, en los trópicos que en Europa. En París, el término medio (con el termómetro a 25°) me ha parecido de 16° del cianómetro. En los trópicos, es de 23° a la misma temperatura. Esta diferencia dimana indudablemente de la disolución perfecta de los vapores en la atmósfera ecuatorial. Así es que nada iguala a la majestad de las noches en estas regiones: las estrellas brillan con una luz tranquila como la de los planetas y su vibración no se echa de ver sino cuando se acercan al horizonte. Los anteojos de menos alcance transportados de Europa a las Indias parece que han aumentado su fuerza, tal es allí la grande y constante transparencia del aire.

Saussure observó el cianómetro, en la cima del Monte Blanco, a 4.754 metros de altura, en los 39°. En el Pico de Tenerife me pareció que llegaba a 41°. Supongo que la grande sequedad del aire africano favorecía la intensidad del color azul del cielo, porque el Pico de Tenerife es menos alto de 1.050 metros que el Monte Blanco. En los Andes, a 5.900 metros de altura, el cianómetro marcaba 46°. Mr. Gay-Lussac observó esta misma intensidad de

color en sus viajes aerostáticos. "Un fenómeno, dice este físico, que llamó mi atención a esta grande altura de 7.016 metros, fue ver todavía nubes más altas y a una distancia que me pareció muy considerable. En nuestra primera ascensión las nubes se sostenían solamente a 1.169 metros, sobre ellas el cielo parecía enteramente sereno, y su color en el cenit me pareció tan subido como el del azul de Prusia. Mas en mi último viaje no vi nubes a mis pies, el cielo estaba vaporoso y de color opaco".

DECREMENTO DE LA LUZ

La luz del sol y de los astros pierde de su intensidad al atravesar el aire atmosférico. Esta extinción de la luz proviene de la densidad de las capas de aire; y por consiguiente es menor en las cumbres de las montañas y mayor al nivel del mar. En el cálculo de la tabla que sigue no se ha hecho caso de los vapores que se hallan esparcidos accidentalmente en el aire y hemos considerado el fenómeno de la extinción de la luz como se presenta en un aire transparente y en el cual el agua está enteramente vaporizada. Sobre esta materia pueden consultarse las ideas que Mr. Laplace ha enunciado en su Exposición del sistema del Mundo (vol. 1, p. 157). La grande transparencia del aire en los trópicos es la causa de que a igual altura la luz es allí más viva que en Europa. Así es que la claridad del día fatiga más aún en las horas en que no hay reflejo. Sería curioso examinar este fenómeno con el photómetro de Leslie. La mayor fuerza de la luz en la atmósfera de los trópicos se descubre también en la luz que la luna totalmente eclipsada refleja hacia la tierra, la cual depende de la inflexión de los rayos solares por la atmósfera terrestre. En las zonas templadas acontece algunas veces que el aire es tan denso y tan cargado de vapores que el disco de la luna se oculta enteramente en ellos, mientras que yo he visto, por los 10° de latitud boreal, la atmósfera tan transparente, que el disco de la luna eclipsada, estaba tan visible como la luna llena en Europa, cuando aparece en el horizonte.

Sábese que la luz influye eficazmente en las funciones vitales de las plantas, particularmente en su respiración y en la formación de la parte colorante, que tiene un carácter resinoso y, también, según Mr. Berthollet, en la fijación del azote en la fécula. Estas consideraciones nos autorizan para pensar que la grande intensidad de la luz de que disfrutan las plantas que vegetan en la cima de las montañas, debe contribuir a darles el carácter resinoso y aromático que se encuentra en muchas plantas alpinas. En mi obra sobre los nervios, he mencionado algunas experiencias de las cuales resulta que la luz solar produce sobre la fibra nerviosa efectos estimulantes que no pueden dimanar sólo del calor. La decadencia de fuerzas que siente el habitante de Quito y de Méjico a una altura de 3 a 4.000 metros, cuando el sol le hiere con sus rayos, parece que no depende del movimiento muscu-

lar o de la transpiración cutánea, que sin duda es también más abundante en un aire dilatado. ¿Sería aventurado acaso atribuírle a una irritación nerviosa, o a que la luz, menos debilitada en la cima de las montañas, es susceptible de exhalar más calórico, cuando los cuerpos densos la descomponen, porque ha perdido menos cantidad de este flúido al atravesar las capas superiores del aire?

REFRACCIONES HORIZONTALES

Como la fuerza refractiva de la atmósfera depende de la densidad de sus capas y de la ley de su temperatura, esta fuerza es necesariamente diversa según la elevación del lugar en que se halle el observador. Mr. Laplace ha probado que el cálculo de las refracciones astronómicas es muy diferente según que el ángulo observado es superior o inferior a 12° . En el primer caso, el estado hygrocópico del aire modifica poco la inflexión de la luz; en el segundo, en que el rayo es casi tangente a la superficie de la tierra, la influencia de los vapores acuosos y de su disolución más o menos perfecta constituye una condición importante. Si sólo el decremento del calor modificara las refracciones horizontales, no sería entonces posible explicar por qué en estío son éstas mucho menores en el ecuador que en las zonas templadas, puesto que de las experiencias arriba citadas casi puede deducirse que en el verano el decremento del calórico, a lo menos desde la superficie del mar hasta los 6 o 7.000 metros de altura, difiere poco en los Andes de Quito y en Europa. Mas todavía puede suceder que las cordilleras que reflejan el calórico radiante hacia las regiones elevadas del aire, no nos den resultados comparables con los que se deducen de las ascensiones aerostáticas en Europa, o que la disminución del calórico siga otras leyes desde los 7.000 metros para arriba. Por tanto, es de la mayor importancia observar bien estos fenómenos tan interesantes para la astronomía física y sobre los cuales los últimos trabajos de Mr. Laplace no pueden dejar de ilustrarnos. Conforme a las fórmulas de este gran geómetra se ha calculado la escala de las refracciones que adorna mi cuadro físico de las regiones ecuatoriales.

Los académicos franceses hicieron grabar en una lápida de mármol que todavía se conserva en el antiguo colegio de los jesuítas de la ciudad de Quito, que la refracción astronómica horizontal media es, bajo el ecuador, al nivel del mar, de $27'$; a la altura de Quito, de $22' 50''$, y en el Chimborazo, cerca del límite inferior de la nieve permanente, de $19' 51''$. Mr. Laplace ha dicho que, como la refracción de la atmósfera lunar es mayor que la que puede verificarse en nuestras mejores máquinas neumáticas, la refracción horizontal a la superficie de nuestro satélite no puede exceder $5''$.

Desde las cumbres elevadas de los Andes se suele ver a media noche un resplandor pálido pero perceptible que rodea el horizonte. Saussure observó

también este fenómeno en la Garganta del Gigante, en los Alpes, a los 3.435 metros de altura. Yo también he sido testigo del mismo espectáculo en la hacienda de Antisana, a la altura de 4.105 metros. La explicación ingeniosa que Mr. Biot ha dado de este fenómeno, consiste en suponer que la densa masa de aire que circuye el horizonte refleja la luz solar (*Astronomía física*, vol. I, p. 277).

COMPOSICION QUIMICA DE LA ATMOSFERA

El flúido elástico que envuelve nuestro planeta se dilata hasta una altura cuyos límites no conocemos. La teoría de la extinción de la luz y las experiencias de Bouguer, prueban que la altura de la atmósfera, reducida en toda su extensión a la densidad del aire correspondiente a cero de temperatura y a la presión de una columna de $0,^m 76$ (28 pulgadas) de mercurio, no puede pasar de 7.820 metros (*Mecánica Celeste*, tomo 4^o). Las observaciones del crepúsculo indican que a una altura de 60.000 metros todavía la densidad de las capas de aire es suficiente para reflejarnos una luz sensible.

Por mucho tiempo se ha creído que la composición química de la atmósfera variaba no solamente en un mismo lugar, sino también que la pureza del aire disminuía con la altura sobre el nivel del mar, porque se atribuían a modificaciones del aire los errores que resultaban de la imperfección de los análisis eudiométricos de que se hacía uso y tengo que confesar que las experiencias que hice en otro tiempo valiéndome del gas nitroso, contribuyeron en parte a propagar estos errores.

En estos últimos años se ha anunciado que la cantidad de oxígeno que el aire atmosférico contiene, lejos de llegar a 27 o 28 centésimos, no pasa de 21 a 23. Mas como estos límites no son bastante precisos y como los químicos no están bien de acuerdo respecto de la exactitud de los diversos análisis eudiométricos, emprendí, asociado con Mr. Gay-Lussac, un trabajo completo sobre la composición del aire y sobre las modificaciones que pueden afectarlo, para reemplazar un trabajo imperfecto de mi primera juventud, con otro fundado sobre bases sólidas.

Con la química sucede lo que con la astronomía, que la perfección de los métodos y de los instrumentos nos permite estimar las cantidades más pequeñas y que hoy no es permitido dejar de hacer caso de lo que antes podía omitirse como de poca importancia. Presentamos los primeros resultados de nuestro trabajo en una memoria leída en el Instituto el 1^o pluvioso del año 13. Los números eudiométricos que indica el cuadro se fundan en las experiencias que hicimos Mr. Gay-Lussac y yo en uno de los laboratorios de la Escuela Politécnica, experiencias que tenemos intención de completar dándoles mayor extensión y variedad.

En el estado actual de la ciencia química, el eudiómetro de Volta es todavía el mejor de los instrumentos de este género que conocemos, porque es el

único que permite estimar en el aire variaciones de dos milésimos de oxígeno. En cuanto a los análisis hechos con sulfuro alcalino, fósforo y gas nitrógeno (lavando los residuos con sulfato de fierro, o con ácido hidroclicórico y alcali), estos medios no permiten apreciar la cantidad de oxígeno sino con una aproximación de uno o dos centésimos. El sulfuro alcalino absorbe el ázoe y por tanto si se atribuye toda la absorción observada al oxígeno de la atmósfera, el error puede ser considerable. Esta acción de los sulfuros alcalinos disueltos en caliente y la falsa suposición respecto de la saturación de una parte del oxígeno por dos a cuatro partes de gas nitrógeno, fueron los motivos que influyeron en asignar al aire de 27 a 28 por ciento de oxígeno.

Los elementos que constituyen la atmósfera, parece que son 0,210 de oxígeno, 0,787 de ázoe y 0,003 de gas ácido carbónico. La proporción de este último gas no ha podido estimarse con toda exactitud. Quizá es aún menor. Las soluciones alcalinas que se han empleado no absorben sólo el ácido carbónico, pues cada vez que un líquido permanece largo tiempo en contacto con el aire, la absorción del ázoe y del oxígeno es capaz de alterar los resultados (1).

La composición química de la atmósfera no varía, según parece, en ninguna circunstancia, por lo menos en cuanto a las cantidades de oxígeno y de ázoe y si hay diferencia, ésta no excede de una milésima parte de oxígeno, porque siempre hemos hallado las mismas proporciones en aire cogido en tiempo sereno, o de lluvia, de niebla, cayendo nieve o soplando viento de las regiones más opuestas. A la altura de 7.000 metros. Mr. Gay-Lussac recogió aire que tenía igualmente 0,210 o 0,211 de oxígeno, y puede asegurarse que esta es la única experiencia que hasta aquí se ha hecho con exactitud, respecto de la composición química de las capas de aire más elevadas. Si yo y otros viajeros hemos creído que había menos oxígeno en las altas regiones que en el nivel del mar, debe juzgarse que este resultado dimana de la imperfección de los medios eudiométricos empleados. Sobre la cima del pico de Tenerife y en algunos volcanes de los Andes, la pureza del aire puede ser en efecto menor, mas la diferencia puede depender de la acción de los volcanes y sobre todo de las grandes masas de azufre que absorben el oxígeno del aire que las baña.

Se ha suscitado por muchos años la importante cuestión de la existencia del hidrógeno libre en el aire atmosférico. El viaje aerostático de Mr. Gay-Lussac demostró que si existe una pequeña canti-

dad de hidrógeno en el aire, ésta no es mayor a la altura de 7.000 metros que en las llanuras. Las experiencias ulteriores que hemos hecho nos autorizan para afirmar que no pueden existir en el aire atmosférico más de dos milésimos de hidrógeno, pues 0,003 anegados en una mezcla artificial de oxígeno y de ázoe, han sido indicados por nuestros instrumentos. Si se recuerda que una mezcla de aire con menos de 0,05 de hidrógeno no es susceptible de inflamarse por la centella eléctrica, no puede el ánimo más preocupado negarse a admitir que el hidrógeno no tiene nada que hacer con la formación de la lluvia de tempestad, ni con los otros fenómenos ígneos que aparecen en el aire. La constante uniformidad de la composición química del aire y la no existencia del hidrógeno en este fluido, son hechos importantísimos para el cálculo de las refracciones; porque prueban que los géometras no tienen más correcciones que hacer sino las del barómetro, termómetro e higrómetro.

Mas independientemente del oxígeno y del ázoe, el aire atmosférico contiene también un número considerable de emanaciones gaseosas que nuestros instrumentos en su estado actual no pueden acusar y que sin embargo influyen eficazmente en nuestra salud. Estas emanaciones se forman principalmente en las regiones bajas de los trópicos, en los lugares en que la materia organizada se desarrolla con más rapidez, pero en donde al mismo tiempo estos mismos restos orgánicos llenan el aire de miasmas pútridos y deletéreos. La humedad del aire, su temperatura constantemente elevada y la falta de viento a la sombra de los bosques, favorecen la formación de estos miasmas. Son más abundantes y comunes en aquellos valles profundos de los Andes, que semejan a hondas grietas de 1.200 a 1.500 metros de profundidad y en cuyo fondo el termómetro sube a causa de la reflexión del calórico radiante a 42°. Una hora de mansión es muchas veces suficiente para causar a los transeúntes las más graves enfermedades, al paso que los indios que habitan estos valles viven largos años sanos y robustos. Tal es la admirable organización del hombre.

DISMINUCION DE LA GRAVEDAD

La gravedad terrestre disminuye en razón de la distancia del centro de la tierra. Esta disminución comienza a sentirse ya en las primeras alturas de las cordilleras, pero como la densidad de estas montañas varía mucho, prefiero determinar teóricamente la ley del decremento de la gravedad, que valere para ello de las experiencias que verifiqué en circunstancias difíciles de comparar. La escala expresa las oscilaciones de un péndulo simple en el vacío.

Suponiendo la longitud de un péndulo que señala los segundos en París = 1.000.000, la longitud del mismo péndulo para marcar los segundos en el ecuador, será = 0,99669. Estas relaciones nacen de las dimensiones de la tierra: el radio del ecuador = 6.375.703 metros (3.271.208 toesas); el radio del

(1) Conforme a las experiencias más recientes de MM. Dumas y Boussingault, la composición del aire es la siguiente: 230,2 de oxígeno, 769,8 de ázoe. Estos químicos fijaron el oxígeno del aire sobre cobre metálico pesando después el óxido producido. La delicadeza extrema de las balanzas permite obtener resultados mucho más exactos hoy que a principios del siglo en que MM. Humboldt y Gay-Lussac hicieron sus experiencias, que no son menos admirables para el tiempo en que se hicieron. En cuanto al ácido carbónico, se admite siempre que el aire contiene cuatro milésimos. — A.

polo = 6.356.671 metros (3.261.443 toesas); el aplamamiento = 19.032 metros (9.765 toesas); la longitud del grado (bajo el ecuador) = 51.077,70 toesas, Bouguer en Francia, lat. 51° 33' = 51.316,58 toesas (100.015 metros) *Mechain y Delambre*; en Suecia, lat. 73° 70' = 51.473,01 toesas (100.320 metros) *melanderhielm*.

Supongamos que sea N el número de oscilaciones que hace en un tiempo dado un péndulo en el ecuador y a la superficie de la tierra; N' el número de oscilaciones que hará en igual tiempo el mismo péndulo trasportado verticalmente a la altura h : esta altura, siendo expresada en metros, tendremos:

$$N' = N \left(1 - \frac{579 \cdot h}{576.6375793} \right)$$

Mi cuadro no menciona el decremento de las fuerzas magnéticas a grandes alturas, porque ya está reconocido, gracias a las experiencias decisivas de MM. Biot y Gay-Lussac, que este decremento es insensible del nivel del mar hasta 6.000 metros de elevación. Las observaciones hechas en las cordilleras no pueden eximirse del error causado por atracciones locales. En Guadalupe, montaña cuya altura es de 676 metros sobre el nivel de Bogotá, mi aguja en dos minutos marcaba dos oscilaciones menos que en el llano. En el cerro de Avila, cerca de Caracas, cuya altura sobre el nivel del mar es de 2.632 metros, esta disminución llegaba a cinco oscilaciones en dos minutos; por el contrario, en el volcán de Antisana, a la enorme altura de 4.934 metros, el número de oscilaciones, en diez minutos, llegó a 230, mientras que en la ciudad de Quito no pasaban de 218: lo que indica acrecentamiento de intensidad en vez de disminución. Estas anomalías no pueden depender de otra cosa que de circunstancias locales y sobre esta materia podrá consultarse la memoria sobre las variaciones del magnetismo terrestre que he publicado hace poco, asociado con Mr. Biot.

GRADO DE CALOR DEL AGUA HIRVIENTE
 A DIVERSAS ALTURAS

El grado de calor que adquieren los líquidos antes de hervir, depende del peso de la atmósfera y como este peso varía como las alturas sobre el nivel del mar, cada altura tiene su término o punto de ebullición correspondiente. La tabla siguiente representa la ley que sigue este fenómeno.

Elevación en metros	Alturas barométricas	Grados del agua hirviente	
		Termómetro centígrado	Termómetro Reaumur
0	0° 7620	100° 0	80° 0
1.000	0 6792	97 1	77 7
2.000	0 6050	94 3	75 4
3.000	0 5368	91 3	73 0
4.000	0 4741	88 1	70 5
5.000	0 4182	84 7	67 7
6.000	0 3674	81 0	64 8
7.000	0 3203	77 0	61 6

En el curso de mis viajes hice muchas experiencias sobre el hervor del agua en las cimas de los Andes. Me propongo publicarlas y con ellas otras ejecutadas por Mr. Caldas, natural de Popayán, físico distinguido, que se ha consagrado con un ardor sin ejemplo, a la astronomía y a muchos ramos de la historia natural. Estas experiencias, poco interesantes para la teoría, servirán sin embargo para juzgar del grado de exactitud que podrían adquirir las medidas de alturas hechas con el termómetro, si se logaran instrumentos que pudieran indicar con exactitud pequeñas fracciones de grado. Desde el nivel del mar hasta la altura de 7.000 metros, cada grado de disminución en la temperatura del agua hirviente, representa una altura de 304 metros y desde el nivel del mar hasta 1.000 metros, el grado equivale a 357 metros. Puede decirse que hasta la altura del Monte Blanco, cada grado de menos en la temperatura del hervor del agua, representa diez líneas de descenso en la columna barométrica o 340 metros de elevación (1).

CONSIDERACIONES GEOLOGICAS

La naturaleza de las rocas no tiene dependencia alguna de las alturas ni de la diferencia de latitudes, ya sea que la temperatura del aire y su presión barométrica influyeran poco en el estado de agregación de las moléculas o lo que parece más probable, que la formación de la masa sólida del globo haya precedido el orden de cosas que asignó a cada región un clima particular. Por otra parte la altura de las montañas es tan pequeña comparativamente al radio de la tierra, que estas pequeñas diferencias de nivel no han podido modificar los grandes fenómenos geológicos. Si se considera el globo en grande, casi puede suponerse que a cualquiera elevación se hallan las diversas especies de rocas, mas si se atiende sólo a una porción circunscrita de la superficie de la tierra, se descubre entonces que en cada región la dirección y la inclinación de las diversas capas depende de un sistema particular de fuerzas (2) y que existe cierta ley local respecto de la altura de las diversas formaciones de rocas sobre el nivel del mar. Se advierte que en ciertas

(1) Mr. Forbes, distinguido físico inglés, que se ha ocupado muy recientemente de este género de experiencias, me ha asegurado que de las que él hizo en los Alpes con mucha prolijidad, resultan 500 pies ingleses de altura por cada grado del termómetro Fahrenheit, medidas equivalentes con suficiente aproximación a 299 metros por cada grado centígrado. El instrumento que Caldas había previsto y que el barón de Humboldt deseaba, se ha construido por fin y lleva el nombre de hipsómetro, con el cual y las excelentes tablas calculadas por el acreditado físico Mr. Regnault, puede hoy determinarse, con un error de diez metros a lo sumo, la altura de las montañas sin necesidad de barómetro. — A.

(2) En los Andes de la América meridional, en la cordillera litoral de Venezuela y en la de Pavía, las rocas primitivas, particularmente el gneiss y el esquisto micáceo, afectan comúnmente la dirección *hora*, 3 4/8 de la brújula del minero, o en otros términos, la dirección de sus estratos hace de ordinario un ángulo de 52°, del norte al este, con el meridiano del lugar. Su inclinación es casi constantemente al NO. Estas direcciones e inclinaciones de las rocas esquistosas son también muy comunes en los Alpes, en el Fichtelgebirge y en las costas de Génova. En Méjico, la dirección más constante de las rocas primitivas es *hora* 7-8 de la brújula de Sajonia.

regiones las montañas secundarias no pasan de una altura de 3.000 metros, que las masas calizas no aparecen cubiertas de arenisca (gres) cuando la altura excede de 1.800 metros, que el esquisto micáceo no se eleva tanto como el gneiss y que las brechas que se encuentran a determinadas alturas, se componen sólo de fragmentos de rocas primitivas. Sobre un corto terreno se puede así descubrir un límite superior de los basaltos, de la caliza secundaria y de la arenisca silizosa del mismo modo que se descubre un límite superior a los pinos y a las encinas. De lo que llevo expuesto se deduce que no es posible formar una escala geológica respecto de las regiones ecuatoriales, a menos que no se pretenda sujetar la naturaleza a ideas teóricas, es decir, considerar como fenómenos generales lo que no se aplica sino a una corta extensión de los Andes. A pesar de esto, me ha parecido que el cuadro podría comprender algunas indicaciones geológicas, las cuales no serán inútiles al mineralogista.

Las regiones ecuatoriales de América ofrecen a la vez las cumbres más elevadas y las llanuras más extensas y más bajas del mundo, contraste admirable que bastaría por sí solo para demostrar que la rotación del globo no es la causa de la reunión de tantas montañas cerca del ecuador. La cordillera de los Andes vuelve a levantarse por los 60° de latitud boreal, a una altura casi igual a la que se observa en el Reino de Quito.

La cadena de los Andes (cuyo nombre en lengua quichua *antis* parece derivarse de la palabra peruana *anta* que significa cobre y se aplica a todo metal) se aproxima casi igualmente de los dos polos de nuestro globo. Sus extremidades no se alejan de uno y otro polo sino de 29° a 30° de latitud. Esta cordillera corre desde los islotes situados al sur de la Tierra de Fuego y desde el Cabo de Hornos hasta el monte San Elías en la parte nordeste del puerto Mulgrave, es decir, desde los 55° 58' de latitud austral, hasta los 60° 12' de latitud boreal. Tiene pues 2.500 leguas de largo y 30 a 40 de ancho.

La elevación de la cordillera de los Andes es mucho más desigual de lo que generalmente se cree. Hay parajes en el hemisferio austral, entre el Chimborazo y Loja, cuya altura no es superior a la del San Gotardo; y en el hemisferio boreal, en el Istmo de Panamá, cerca de Cupica, los hay que no llegan a 200 metros. Sin embargo hasta cuatro veces la cordillera adquiere una masa y una altura colosales. En el Perú por los 17° de latitud austral, después bajo el mismo ecuador en el Reino de Quito, la tercera vez en Méjico por los 19° de latitud boreal, y últimamente frente al Asia por los 60° de latitud. En todos aquellos lugares sobrepasa en altura al Monte Blanco y alcanza a 5.000 o 6.000 metros. En general la cadena de los Andes asombra más nuestra imaginación por su masa que por su altura, aún en los lugares en que es más elevada, como en las planicies encumbradas de Quito y de Méjico. En el volcán de Antisana, a 4.105 metros de altura, he

visto una llanura de doce leguas de circunferencia. Por término medio, la elevación de los altos Andes, cerca del ecuador, sin hacer caso de los picos que dominan la cadena, es de 3.900 a 4.500 metros; y la altura media de la cadena de los Alpes y de los Pirineos, es de 2.500 a 2.700 metros. El ancho de estas últimas cadenas no pasa por término medio de diez a doce leguas náuticas, en tanto que el de los Andes en Quito, tiene veinte, y en Méjico y algunas partes del Perú, de cuarenta a sesenta leguas. Estas son las consideraciones más capaces de hacer formar una idea cabal de la grande diferencia de masas de montañas entre los Andes y los Alpes y los Pirineos, la cual no puede ser exacta comparando solamente las cimas más empinadas que son de 6.372 metros, 4.754 y 3.434.

La porción más elevada de los Andes es la que se halla situada entre el ecuador y el 1° 45' de latitud austral. Sólo en este pequeño espacio del globo se encuentran montañas que exceden la altura de 5.847 metros (1). Tales son el Chimborazo, cuya elevación es superior a la que resultaría del Etna colocado sobre el Canigou o la del San Gotardo sobre el pico de Tenerife, y el Cayambe y Antisana. Las tradiciones de los indios de Lican nos enseñan con alguna certeza, que la montaña del Altar, que los indígenas denominan *capa-urcu* era en tiempos remotos más alta que el Chimborazo, pero que a consecuencia de una erupción continua de ocho años, bajo el reinado de *Ouainia-Abomatha*, este volcán se hundió. En efecto, su cima presenta las pruebas de la destrucción en sus picos inclinados.

El Chimborazo, como el Monte Blanco, forma la extremidad de un grupo colosal. Desde aquella elevada montaña hasta una distancia de 120 leguas al sur, ningún pico llega siquiera al límite de la nieve permanente. Allí la cadena de los Andes no tiene sino 3.100 a 3.500 metros de altura. Desde el 8° de latitud austral, es decir desde la provincia de Guamachuco, las cumbres nevadas son ya más comunes, particularmente cerca del Cuzco y La Paz en donde se ven los picos empinados de Illimani y Cururana. No tenemos todavía medidas de las montañas de Chile, y siguiendo al sur, la cordillera se acerca de tal modo al océano, que pueden considerarse los islotes escarpados del archipiélago de los Huaytecas como una porción destacada de la cadena de los Andes. El cono nevado de Cupatana, que es el pico de Teyde de estos parajes, llega a 2.900 metros. Todavía más al sur en las inmediaciones del cabo Pilar, la serranía granítica desciende a 400 metros para confundirse luego con el nivel del mar. Si en lugar de caminar al sur, tomamos

(1) En el tiempo en que el barón de Humboldt escribía esto, no se había medido todavía la altura de los picos del Himalaya en Asia, cuya altura es desde 6.925 metros hasta 8.575, ni de los dos nevados de Bolivia, el Soratá, que tiene 7.696 metros, casi equivalente a la montaña más elevada de la luna, el Illimani, que alcanza a 7.315 metros. De manera que por su elevación, el grupo del Chimborazo hoy no ocupa sino el tercer lugar en el orden de las cumbres más elevadas de nuestro planeta. El primero pertenece a los picos del Himalaya en el Antiguo Continente, el segundo a los nevados de Bolivia en el Nuevo. — A.

la dirección al norte, veremos que la elevación de los Andes, partiendo desde el Chimborazo, no es menos desigual. Desde $1^{\circ} 45'$ de latitud austral hasta 2° de latitud boreal, la cordillera mantiene la altura de 5.000 a 5.500 metros. La provincia de los Pastos es una de las planicies más elevadas del globo y puede considerarse como el Tibet de la América. Siguiendo al norte la cordillera, se divide ésta en tres ramos de los cuales el más oriental no tiene nevados de los 4° a los 10° de latitud, pero en su extremidad boreal, en donde se tuerce al oriente para formar la cadena litoral de Caracas, se descubre el grupo colosal de Santa Marta y de Mérida de 4.700 a 5.000 metros de altura. El ramo más occidental de la cordillera de los Andes, el único que produce la platina, disminuye en su altura en Cúcuta y en el Istmo de Panamá hasta descender a 300 y aun a 100 metros. Luego vuelve a levantarse en Guatemala y en Méjico a 2.700 y 3.500 de altura mediana desde los 11° y 17° de latitud; y por los 19° , en las inmediaciones de la ciudad de Méjico, forma un grupo en el cual hay cumbres, como el Popocatepetl y el Orizaba, que exceden de 5.300 metros de altura. Al norte de Anáhuac y en la Nueva Vizcaya, no pasa la cordillera de la altura de los Pirineos y aun algunos viajeros ingleses sólo le han hallado 800 metros bajo los 55° de latitud boreal. Podría suponerse que los Andes desaparecen enteramente hacia el polo boreal si no supiéramos que no lejos del Asia, por los $60^{\circ} 21'$ de latitud, existe el cuarto grupo casi tan colosal como los otros, en el cual se ven el Pico de San Elías con 5.512 metros y la montaña de Buen Tiempo con 4.547 metros de altura. En estos parajes es y en Analasca donde los Andes parecen tener correspondencia submarina con los volcanes de Kamtschatka. Las montañas del Asia oriental no son pues sino una continuación de la cadena de América; y si es probable que la mayor parte de los habitantes del Nuevo Continente son de raza mongola, y si es al norte del Indostán, en la alta planicie del Tibet, que existe la cuna de las artes, de las fábulas religiosas y quizá también de toda civilización humana, ¡cuán interesante no es el considerar esta misma planicie como el centro común de donde parten las cordilleras de uno y otro continente!

Tal es el bosquejo en grande de los contornos de la alta cadena de los Andes. Por lo que hace a su estructura y a la naturaleza de las rocas que la componen, debo limitarme a los resultados siguientes.

Existen en las regiones ecuatoriales todas las rocas que se han descubierto en las demás regiones del globo terrestre. Las únicas que no pude hallar fueron la roca esteatitosa llamada roca de topacio por Werner, la mezcla de caliza granujienta y de serpentina que se encuentra en el Asia menor, la oolita o *Rogenstein* de los alemanes, el grau wake (1) y la creta. Mas no solo son idénticas las

(1) Mr. Boussingault halló posteriormente el grau wake entre Cúcuta y San Martín, y yo he traído varias muestras a Europa de esta roca. — A.

rocas en ambos mundos, sino que también existe en el orden de sobreposición y tránsito de unas a otras tal armonía, que por ellas se manifiesta evidentemente que la naturaleza obra en todas partes en virtud de leyes tan sencillas como universales (1). En la América meridional, el granito forma la base de las demás formaciones. Esta roca cristalina se descubre al pie de los Andes, sobre las costas del mar del sur y sobre las del océano Atlántico, entre las bocas del Orinoco y el río de las Amazonas; ella sostiene la alta mole de los Andes y las formaciones secundarias de los llanos. El granito en que predomina el cuarzo, que contiene poca mica y gruesos cristales de feldespato, parece ser en los Andes más antiguo que el granito de menudos cristales, abundante en hojuelas exagonales de mica. El granito del Perú, unas veces en masas, otras dividido en lechos paralelos e inclinados regularmente, y en ellos embutidas porciones globulares de la misma roca con aumento de mica, las cuales son el resultado de atracciones particulares entre sus partes constituyentes, esta roca, digo, no difiere en América de la de los Alpes superiores y de Madagascar. En ella sin embargo el óxido rojo de titanio es más abundante que la turmalina. Hasta aquí no se han reconocido en ella la esteatita, la lepidolita y el sulfato de barita. Sobre ella y en ocasiones alternando con la misma se encuentra el gneiss o granito foliáceo que pasa al esquisto micáceo, como éste al esquisto primitivo. Los granates en estas regiones son más comunes en el gneiss que en el esquisto micáceo. También se ven en los bellos pórfidos que, reposando sobre el esquisto primitivo, coronan la cima del cerro argentífero de Potosí.

La caliza granujienta, el esquisto clorítico y la roca trapeana primitiva, que es una combinación de feldespato y de anfibolio, forman a menudo estratos subordinados en el granito foliáceo, o gneiss, y en el esquisto micáceo, y este último es allá tan abundante como en la cadena de los Alpes. Contiene con frecuencia capas de grafita y sirve de base a las formaciones de serpentina y de jado. Obsérvese lo que tal vez no hemos visto nunca en Europa, la serpentina alternando con la sienita. La alta cumbre de los Andes está por donde quiera cubierta de formaciones porfiríticas, de basalitos, de fonolitas y de rocas verdes, las que tomando la forma de columnatas aparecen a lo lejos bajo

(1) En obra posterior dice Mr. de Humboldt: "Bajo todos los climas, la corteza pétreo del globo presenta el mismo aspecto al viajero; en todas partes reconoce, y no sin cierta emoción y sorpresa, en medio de un mundo nuevo, las rocas de su país natal: mas esta sorpresa cesa reflexionando que si el clima influye en la forma de los animales y de las plantas (porque la temperatura de la atmósfera y la que resulta de las diversas combinaciones formadas por la acción química, modifican el juego de las afinidades que preside al desarrollo de los órganos), esta distribución desigual del calor, efecto de la oblicuidad de la eclíptica, no puede haber tenido influencia alguna sensible en la formación de las rocas, la cual por el contrario debe haber influido poderosamente en la temperatura del globo y del aire que le rodea, porque cuando pasan grandes masas de materia del estado líquido al estado sólido, no puede efectuarse este fenómeno sin un desprendimiento enorme de calórico". — A.

el aspecto fantástico de ruinas de palacios, que es la figura a que generalmente comparan las cordilleras en América los que las contemplan por la primera vez. Por entre las rocas porfiríticas es que salen las materias volcánicas y no es fácil al geólogo decidir si estos pórfidos, basaltos, estas rocas amigdaloidas porosas, obsidianas y piedras aperladas, han sido formadas por el fuego, o si son rocas preexistentes alteradas por la acción destructiva de los volcanes (1).

Todavía es más notable la identidad de estratificación que se observa en toda la superficie de nuestro globo, si se comparan las formaciones secundarias de la América meridional con las del Antiguo Continente. La naturaleza, constante en sus tipos, parece que ha repetido los mismos fenómenos geológicos en las llanuras del Orinoco, en las costas del mar del sur, en Francia, en Polonia y hasta en los desiertos de Africa. Al pie de los Andes se descubren dos formaciones muy diferentes de piedra arenisca: la una de basa silizosa, conglomerada de rocas primitivas, que en ciertos lugares encierra cinabrio y lechos de hulla; la otra de basa caliza, conglomerada de rocas secundarias; existen también dos formaciones de yeso y tres de caliza secundaria. Hay llanuras extensas que comprenden más de setenta mil leguas cuadradas, cubiertas de un conglomerado antiguo, en el cual se hallan maderas fósiles y fierro oxidado negrusco. Sobre este conglomerado se ve una piedra caliza semejante a la de los Alpes superiores, que contiene petrificaciones de animales marítimos a grandes alturas y la cual se distingue por abundantes lechos de esquisto arcilloso, con venas de caliza espática blanca. Esta piedra caliza sirve de base al yeso hojoso penetrado de azufre y a veces muriatífero. Después de este yeso sigue otra formación caliza muy homogénea, blanquecina, en ocasiones cavernosa, análoga a la caliza jurásica que es la misma de Monte Baldo y de Palestina. A ésta sucede una arenisca caliza, luego un yeso fibroso sin sosa muriatada, pero mezclado de arcilla, y finalmente la caliza que contiene sílice y piedra córnea. Difícil es reconocer en las inmensas llanuras del Orinoco y Río Negro, la serie de estas formaciones secundarias, porque todo lo que cubría en otro tiempo el conglomerado antiguo parece haber sido arrebatado a consecuencia de grandes catástrofes, mas ella se manifiesta en la Nueva Andalucía (sobre todo en la cadena de Tumiriquirí) y en Méjico, en donde el profesor Del Río ha hecho en geología las más preciosas observaciones. No obstante esta identidad de formación y de estratificación en los dos continentes, las regiones ecuatoriales presentan también muchos fenómenos que les son particulares. Uno de los más singulares es sin duda la inmensa altu-

ra a que se elevan las rocas posteriores al granito y lo macizo de las formaciones. En Europa, las cumbres de las montañas elevadas son de granito, pues el esquisto micáceo no se observa más arriba de 2.400 metros. En el Monte Blanco, el granito se descubre a 4.754 metros de altura. En la cordillera de los Andes, esta misma roca se oculta bajo formaciones posteriores; de suerte que podría viajar por muchos años en el Reino de Quito y en parte del Perú, sin aprender a conocer el granito. El punto más elevado en que he hallado en los Andes el granito, es en el páramo de Quindío a 3.500 metros. Las cumbres heladas del Chimborazo, del Cayambe y del Antisana a 6.372 y 5.847 metros de altura son de pórfido (traquita). La caliza secundaria se descubre, cerca de Micuipampa en el Perú, a 3.703 metros de elevación, la arenisca de Huancavelica a 4.500 metros, el esquisto micáceo de los Andes de Tolima en Nueva Granada a 4.482 metros, el basalto de Pichincha, cerca de Quito, a 4.735 metros; mientras que el lugar más alto en que hasta aquí se han hallado en Alemania basaltos, es la cúspide del Schneekope en Silesia, a 1.285 metros. A los mineralogistas que consideran los pórfidos del Chimborazo, los basaltos y las rocas verdes, no como masas alteradas, sino como productos de la erupción de los volcanes, deben también interesar estas indagaciones sobre los límites de altura de estas formaciones, porque se trata aquí no de su origen ni del estado primitivo de nuestro planeta, sino de las cosas como existen hoy. En las inmediaciones de Bogotá, se ven lechos de carbón mineral a las orillas de la hermosa cascada de Tequendama, a 2.633 metros, y se asegura haberse hallado carbón fósil en la caliza compacta de Huauco en el Perú, a 4.482 metros de altura, arriba casi de toda vegetación actual. En la llanura de Bogotá, a una elevación de 2.700 metros, se hallan el yeso, la arenisca y la caliza conchífera y aun la sal gema en Zipaquirá. No creo que se haya descubierto todavía en Europa ni carbón mineral ni sal gema a más de 2.000 metros de altura. ¿En qué consiste semejante acumulación de las mismas materias a tan desiguales alturas bajo el ecuador y en las zonas templadas? Las petrificaciones de conchas que en el Antiguo Continente se han hallado a mayor altura, son las del Monte Perdú en los Pirineos a 3.566 metros (1). En los Andes los restos de cuerpos organizados son por lo general muy escasos, por la falta de piedra caliza en las inmediaciones del ecuador y sin embargo, cerca de Micuipampa, latitud austral 6° 45' 38", se hallan conchas petrificadas (ostras, equinitas, etc.) a 3.900 metros, es decir a una altura superior a la del Pico de Tenerife y en Huancavelica existen a 4.300 metros.

Los huesos de elefantes fósiles que traje de Méjico, de Soacha, cerca de Bogotá, de Quito y del

(1) Cuando el barón de Humboldt escribía esto, no habían adoptado todavía los geólogos la denominación de *traquitas*, que Haüy dio en su clasificación a las rocas que aquí se mencionan y que siendo porosas, escoriñicadas y compuestas de cristales cruzados de feldespato vitroso, son ásperas al tacto, de donde les viene su nombre. — A.

(1) Mr. Victor Jacquemont halló, en su exploración al Himalaya en 1830, conchas petrificadas a una altura de 700 metros superior al Monte-Blanco y por lo mismo a la elevación absoluta de 5.510 metros, que creo que es la mayor en que hasta aquí se han hallado restos fósiles de animales. — A.

Perú y en los cuales Mr. Cuvier reconoció una especie nueva y muy diferente del mamouth, no se hallan en la cordillera de los Andes sino a 2.300 y a 2.900 metros de altura. No he sabido que se hayan descubierto en más bajas regiones, porque los huesos llamados de gigantes de la Punta de Santa Helena, no lejos de Guayaquil, son de cetáceos. En Europa es raro ver capas continuas de la misma roca cuyo grueso llegue a mil metros. En Méjico y en el Perú, sobre el declive de la cordillera y en valles profundísimos, se descubre fácilmente que las rocas porfíricas tienen 3.100 a 3.900 metros de espesor, y los pórfidos del Chimborazo llegan a 3.700 metros. La arenisca de las inmediaciones de Cuenca tiene 1.500 metros y la formación de cuarzo puro que se halla al oeste de Cajamarca y que parece privativa a los Andes, tiene 2.900 metros de grueso. Ninguna de estas formaciones se halla interrumpida por otras rocas heterogéneas. Debo mencionar aquí otro fenómeno no menos interesante, que caracteriza a las regiones ecuatoriales, y es la abundancia de pórfidos con amfibolio, la escasez de mica en ellos y la falta total de cuarzo en los mismos. Las masas considerables de azufre se hallan a menudo lejos de los volcanes y no en montañas calizas o acompañando al yeso, sino en las rocas primitivas. Habría de mencionar la riqueza de los Andes en toda clase de metales (con excepción del plomo) (1); llamar la atención de los geólogos hacia el *paco*, sustancia compuesta de arcilla, de óxido de hierro, de cloruro de plata y de plata nativa, mezclados íntimamente, y hacia la diferencia de alturas en que la naturaleza ha depositado sus riquezas en el Perú a 3.500 y 4.100 metros, y en Méjico a 1.700 y 2.500 metros, y finalmente sobre la abundancia de mercurio que existe en cuantiosas venas, aunque no se trabajan con fruto. Mas todos estos objetos no pueden referirse por menor en un cuadro general y sólo darán motivo a esta consideración: es tal la abundancia de minas de metales preciosos en la cordillera de los Andes, que la América Española, que hoy exporta anualmente cerca de 38 millones de pesos en oro y plata, podrá triplicar este producto a medida que aumente su población. Méjico, en donde la industria comienza a despertarse, produce hoy 22 a 25 millones de pesos, en vez de 5 a 6 millones que se sacaban a principios del siglo XVIII. Mas la riqueza de Europa no ha aumentado en la misma progresión, pues la sola casa de moneda de Méjico ha contribuido desde la conquista con más de 1.900 millones de pesos, de los cuales la mayor parte han ido a parar a las Indias Orientales y a la China.

Ninguna parte del globo ha sido tan agitada por el fuego subterráneo como la cordillera de los Andes. Desde el Cabo de Hornos hasta el Monte San Elías se cuentan más de cincuenta volcanes infla-

dados. Los más distantes del mar son el Popocatepetl, en Nueva España, a 37 leguas náuticas del golfo de Méjico, y el Cotopaxi, en la provincia de Quito, que dista 40 leguas náuticas del mar del sur. La naturaleza de estos volcanes de los Andes varía mucho. Unos, los menos altos particularmente, arrojan lavas; otros, como los de Quito, lanzan únicamente vapor de agua, rocas escoriñadas y principalmente un lodo arcilloso mezclado de carbón y azufre. Se ha visto, en la noche del 14 de septiembre del año de 1759, levantarse de un llano, a 29 leguas de distancia del mar del sur, el gran volcán de Jorullo rodeado de dos a tres mil conos pequeños todos humeando. Este volcán se elevó en poco tiempo a la altura de 486 metros sobre el nivel llano que le sirve de base (1), el cual tiene una altura absoluta sobre el océano de 717 metros. Mr. Bonpland y yo bajamos al fondo de su cráter y nos convencimos de que arde todavía. Allí recogimos el aire que se exhalaba y que contiene 5 p. 100 de ácido carbónico.

LIMITES DE LA NIEVE PERPETUA

Cuando tratamos del decremento del calórico en la atmósfera, dijimos que, pasada la altura del Monte Blanco, esta disminución sigue según parece la misma ley en las zonas templadas que bajo los trópicos. Puede suponerse que en estas regiones elevadas, el calor radiante que refleja la superficie del globo es casi insensible y que la temperatura en ellas depende únicamente de la descomposición de los rayos del sol en el aire, el cual debilita la luz en razón de su densidad. No sucede así en las regiones bajas de la atmósfera, puesto que desde el nivel del mar hasta la altura de 5.000 metros el decremento del calórico, considerando el término medio en todo el año, no guarda la misma ley que en mayores alturas y aunque las capas de aire en las cuales por su frialdad no se derrite la nieve, se hallan a diverso nivel según la distancia del lugar al polo, su temperatura media debe ser la misma. Conociendo por tanto el decremento del calórico bajo el ecuador, desde el mar hasta el límite de la nieve permanente, que es de 200 metros por grado centígrado, esta hipótesis nos enseña a conocer también aproximadamente el límite de la nieve permanente en las demás latitudes. Bastará así averiguar la altura de una capa de aire cuya temperatura media sea $+0^{\circ},4$, que es la que reina bajo el ecuador en los lugares en donde comienza la nieve permanente. Supongamos que la temperatura media de las regiones bajas por los 45° de latitud, sea de $12^{\circ},5$, se hallará $200 \times (12^{\circ},5 - 0^{\circ},4) = 2.420$ metros; y este resultado, a 80 o 100 metros más o menos, está de acuerdo con lo que se observa en la naturaleza misma. Un lugar de la Europa boreal que tenga al nivel del mar una temperatura media de $+4^{\circ}$

(1) Probablemente no tuvo noticia en aquella época el barón de Humboldt, de los abundantes criaderos de galena que se hallan en diversas provincias de la N. Granada, particularmente en las de Vélez, Tunja, Socorro y Bogotá. — A.

(1) La altura de este volcán, el más reciente y el más extraordinario de cuantos se conocen, es tres veces mayor que la de la gran pirámide de Cheops en Egipto, la cual no tiene sino 142 metros, y ocho veces más que la pirámide de Cholula, construída por los antiguos mejicanos.

tendría su nieve permanente a 720 metros de altura, y por punto general se dirá que este límite expresado en metros, es igual a doscientas veces la temperatura media de las regiones inferiores. Una fórmula en que la latitud entrara como función sería menos exacta, porque el clima físico es con frecuencia independiente de la posición astronómica de un lugar. Esta misma consideración nos ofrece recíprocamente la ventaja de poder hallar la temperatura media de un país, dada la altura del límite inferior de su nieve permanente, dividiendo por 200 el número de metros de altura, el resultado serán los grados de temperatura media al nivel del mar, si se tiene cuidado de añadir la temperatura media del límite de las nieves permanentes.

Mas dejemos a un lado estas hipótesis que sólo se fundan en un corto número de hechos y veamos cuáles son los resultados de las observaciones. Uno de los fenómenos más constantes que nos presenta la naturaleza, es la altura del límite inferior de la nieve permanente, el cual, según Bouguer, es de 4.744 metros. Aunque mis medidas le asignan 4.795 metros, esta diferencia de 50 metros depende de la diferente altura que Bouguer y yo asignamos a la señal de Caraburu y al barómetro colocado en el nivel del mar. Los académicos han observado además con razón que en una región en que la temperatura es constante en todo el año, la altura de la nieve no varía de 50 ó 60 metros y que ella forma una línea horizontal bien manifiesta, sin prolongarse en los valles. Bajo los 20° de latitud boreal, no se había determinado todavía a la época de mi viaje, el límite inferior de la nieve permanente, y era de suponerse que éste sería mucho más bajo que en el ecuador. Resulta sin embargo de mis medidas geométricas ejecutadas en el volcán de Popocatepetl, de Itzaccihuatl, en el Pico de Orizaba, en el nevado de Toluca y en el Cofre de Perote, que la nieve perpetua comienza a 4.600 metros, es decir inferior de 200 metros solamente al límite ecuatorial. Nótase sin embargo que cae en ocasiones nieve en Méjico bajo los 19° a los 22° de latitud, a una altura de 2.100 metros menor que en Quito, lo que prueba que las variaciones momentáneas de frío y de calor son muy desiguales en los dos países, aun cuando su temperatura media es poco diferente: y además como el clima de Méjico se asemeja ya bastante al de las regiones templadas, el límite de la nieve permanente oscila mucho más. En el mes de julio en el volcán de Popocatepetl, la he visto a 4.523 metros de altura, y en febrero a 3.824 metros. La cordillera de los Andes carece de estanques de hielo que hermosteen los declives de sus cumbres nevadas, lo atribuyo a que no cae la nieve en abundancia, sino poco a poco, en los climas ecuatoriales, los que disfrutan por otra parte de una constancia de temperatura contraria a la formación de los neveros, cuya existencia es como nadie ignora independiente de la altura que ocupan. Se encuentran sin embargo en el Chimborazo, sepultadas bajo la arena, nieves antiquísimas. No sabemos

todavía cuál es la altura de la nieve permanente bajo los 25° y 30° de latitud. En Europa, bajo los 42° y 46°, este límite es de 2.534 metros de elevación sobre el nivel del mar. Sobre esta materia puede consultarse la memoria que presenté al instituto nacional en el mes de nivoso del año 13 (1).

DISTANCIA DESDE LA CUAL PUEDEN VERSE LAS MONTAÑAS DESDE EL MAR

La distancia desde la cual puede comenzarse a divisar una montaña desde el mar, depende de su altura, de la línea curva que forma la superficie de la tierra y de la refracción. Como este último es elemento muy variable, he calculado la escala sin atender a él, mas no debe perderse de vista que, aun cuando se supongan los fenómenos de refracción muy extraordinarios, la incertidumbre sobre el punto, o la posición en que se hallaba el buque, ha hecho creer que se han visto los objetos a distancias mayores que las que efectivamente había. Lo mismo sucede con el efecto de las corrientes, cuya fuerza exagera a menudo el navegante, porque, sea por error o por falta de observación astronómica, se halla en un punto del cual se creía muy distante. Entre los trópicos, en donde he hallado siempre constantes las refracciones terrestres, pueden ser muy útiles al navegante los ángulos de altura. El pico de Tenerife, el de las Azores, el volcán de Orizaba en las costas de Méjico, la Silla de Caracas y la sierra nevada de Santa Marta, al oriente de Cartagena, son, por decirlo así, señales colocadas por la naturaleza para guiar a los pilotos. Conociendo la altura de aquellas montañas y su posición astronómica, la más sencilla observación es suficiente para fijar la posición del buque. Mr. Churruca ha calculado tablas para conocer las distancias del pico de Tenerife según los ángulos de visión. La escala que presento hace conocer también la vasta extensión de terreno que la vista puede descubrir desde la alta cima de las cordilleras. Si las nubes y los vapores no nos hubieran ocultado las regiones inferiores, mi vista, desde el Chimborazo, habría abrazado un círculo de 87 leguas náuticas de diámetro; y Mr. Gay-Lussac, en su ascensión aerostática, habría podido descubrir los objetos en un círculo de 106 leguas de diámetro.

DIVERSIDAD DE LOS ANIMALES SEGUN LA ALTURA DEL SUELO QUE HABITAN

Para completar el cuadro físico de las regiones ecuatoriales, he indicado en la escala 14° la diver-

(1) Puede consultarse hoy con más fruto, la memoria de Mr. de Humboldt sobre el límite inferior de las nieves permanentes, inserta en el tomo 14 de los Anales de Física y Química. Los resultados de la obra que acabamos de traducir se hallan algo modificados, particularmente por las observaciones de Mr. Pentland en Bolivia, en donde, entre los 14° y 19° de latitud austral (fenómeno raro), el límite de la nieve se eleva más que en el ecuador (es decir a 5.200 metros); y por las de Mr. Webb, en el Himalaya (declive setentrional), entre los 27° a 38° de latitud boreal, en donde este límite sube también a 5.600 metros. Tales anomalías parece que dependen de la configuración del suelo, extensión de las planicies que circuyen aquellas montañas y de los vientos dominantes. — A.

sidad de los animales que viven en las diferentes alturas de la cordillera de los Andes. En el interior de la tierra aparecen los dermestres que roen los hongos subterráneos; en el océano, los corifonos, y otros peces que se alimentan con la parte gelatinosa de los fucus. Desde el nivel del mar hasta 1.000 metros, en la región de las palmeras y scitamineas, se comienzan a ver perezosos que viven encaramados en el *cecropia peltata*; los boas y los cocodrilos que duermen al pie de los *conocarpus* y del *anacardium caracoli*. Es aquí que el cavia capivara se esconde en los pantanos cubiertos de *heliconia* y de *bambusa*, huyendo del *jaguar*, el *crax*, el *tanayra* y los papagayos se posan sobre el *carycar* y el *lecyrthis*, y el *elater nocticulus*, que se alimenta con el dulce de la caña, y el *curculio palmarum*, que habita dentro de la médula del coco. Las selvas de estas ardientes comarcas resuenan con los aullidos de los monos y ardillas. El *jaguar*, el *felis concolon* y el tigre negro del Orinoco, mucho más sanguinario que el jaguar, persiguen los cervatos (*C. mexicanus*), los cavia y los hormigueros, cuya lengua sale del cabo del esternum. El aire de estas bajas regiones, particularmente en los bosques y en las orillas de los ríos, está lleno de innumerable cantidad de mosquitos que casi no permiten habitar una parte tan grande y tan hermosa de nuestro globo. Con los mosquitos se juntan los *aestrus humanus* que introducen sus huevos en la epidermis humana, produciendo luego gusanos e hinchazones dolorosas, los acaries que recorren el cutis del hombre dejando una huella que escuece, las arañas venenosas, las hormigas y los termitas, que con su industria devastadora destruyen los trabajos del hombre. Más arriba, entre los 1.000 y 2.000 metros, en la región de los helechos, ya no se ven el jaguar ni el boa, ni cocodrilos, ni manatíes; hay pocos monos, pero abundan las dantas, el *sus tajassu* y el *felis pardalis*, y las niguas atormentan a los hombres, a los monos y a los perros. De 2.000 a 3.000 metros, en la región superior de las quinas, no viven ya los monos ni los ciervos grandes de los Andes y el *felis tigrina*. En este nivel que es el de la cúspide del Canigou, abundan por desgracia los piojos. Desde 3.000 hasta 4.000 metros habita la especie de león conocido en lengua quichua con el nombre de *puma*, y el oso pequeño de frente blanca. He visto frecuentemente con asombro, los colibríes a la altura del Pico de Tenerife. Bandadas de vicuñas, de guanacos y de alpacas recorren la región de las gramíneas y de la *espeletia frailexon*, que abraza un espacio entre los 4.000 y 5.000 metros de altura. Los llamas viven en rebañes y domesticados, pues los que se hallan en el declive occidental del Chimborazo se hicieron salvajes cuando fue destruido el pueblo de Lican por el inca Tupayupangui. La vicuña habita con preferencia los sitios en que cae nieve una u otra vez, y a pesar de que son perseguidas sin cesar, todavía se hallan tropas de 300 a 400, particularmente en las provincias de Pasco, hacia los nacimientos del Amazonas, y en la de

Guailas y Cajatambo, cerca de Gorgor. Abunda también este cuadrúpedo en las inmediaciones de Huanavelica, cerca del Cuzco, y en la provincia de Cochabamba, hacia el valle del río Cocatajes. Se le encuentra allí donde quiera la cima de los Andes es más alta que el Monte Blanco. Es cosa sin embargo bien singular en la geografía de estos animales, que los alpacas, vicuñas y guanacos existan desde Chile hasta los 9° de latitud austral, y no se hallen desde este punto al norte, ni en los altos Andes del reino de Quito, ni en los de la Nueva Granada. Lo mismo sucede con el avestruz de Buenos Aires, y no es fácil averiguar por qué esta ave no se encuentra en las vastas llanuras al norte de la cordillera de Chiquitos, en donde también hay selvas espesas y sabanas.

El límite inferior de la nieve perpetua es, por decirlo así, el límite superior de los seres organizados. Todavía vegetan bajo la nieve algunos líquenes, pero entre los animales sólo el cóndor (*vultur gryphus*) habita estas vastas soledades. Lo hemos visto volar a una altura superior a 6.500 metros. He visto también, como antes que lo habían observado Mr. Ramond a la orilla del lago del Mont-Perdú, y Saussure en la cima del Monte Blanco, algunas moscas y esfinges, pero me parecieron haber sido llevadas accidentalmente por las corrientes ascendientes de aire. Me lisonjeo de que los materiales que contiene mi escala zoológica son los primeros que se han recogido para formar un cuadro de la geografía de los animales, análoga al que he ejecutado para las plantas. La obra clásica de Mr. Zimmermann indica la patria de los animales, según la diferencia de latitudes que habitan. Falta ahora fijar en un perfil las diferentes alturas en que pueden vivir bajo cada latitud.

CULTIVO DE LA TIERRA

Después de haber analizado los fenómenos físicos que nos ofrecen las regiones ecuatoriales, las modificaciones de la atmósfera, las producciones vegetales de la tierra, los animales que viven a diversas alturas y la naturaleza de las rocas que componen la cordillera, sólo nos falta decir algo del hombre y de los efectos de su industria. Nuestra especie se ha propagado y vive desde el nivel del océano hasta la inmediación de la nieve permanente, aun puede decirse que la parte del Perú que los incas, en la división política de su imperio, llamaban Antisuyu, es todavía más poblada que la parte baja llamada Cuntisuyu, porque la civilización de los pueblos está casi siempre en razón inversa de la fertilidad del país que habitan. Mientras más obstáculos les presenta la naturaleza, más se desarrollan las facultades morales del hombre. Así es que los habitantes de Anáhuac (o de Méjico), los de Cundinamarca (o del Reino de Santa Fe) y los del Perú, formaban ya grandes asociaciones políticas y disfrutaban de un principio de civilización semejante al de la China y del Japón, en tanto que el hombre vagaba todavía agreste y

desnudo en las selvas de que están cubiertas las llanuras del oriente de los Andes. Mas si no es difícil concebir porque la civilización de nuestra especie hace más progresos en las regiones boreales que en medio de la fertilidad de los trópicos y porque comenzó ésta en lo alto de la cordillera y no en las orillas de los grandes y caudalosos ríos, sí lo es explicar porque los pueblos civilizados y agrícolas no descienden a habitar en climas en donde la naturaleza produce espontáneamente lo que bajo un cielo menos propicio no se consigue sino mediante el más penoso trabajo. ¿Qué es lo que puede obligar a los hombres a trabajar un terreno pedregoso y estéril a 3.500 metros de altura, cuando las llanuras bajas permanecen desiertas? ¿Qué vínculo los retiene en las planicies altas en donde cae la nieve en todo tiempo y en donde bajo un cielo frío y nebuloso la tierra aparece sin vegetación? El hábito y el amor del país natal me parece que son los únicos motivos que para ello puedan asignarse.

En Europa, las aldeas más altas están de 1.600 a 1.900 metros sobre el nivel del océano; así en los Alpes de la Suiza existen:

La aldea de Breuil, en el valle de Mont-Cervin, a	2.007 ^m
La de Santiago, en el valle de Ayas, a	1.631
La de San Remi, a	1.614
La de Eleva, en la falda del Cramont, a	1.308
La de Lans le Bourg, a	1.388
La de Formaza, a	1.263
Y en los Pirineos, según Mr. Ramond:	
La aldea de Heas, a	1.465 ^m
La de Gavarnie, a	1.444
La de Barreges, a	1.290

Más arriba no se ven en Europa sino chozas que los pastores habitan en estío, mientras que en la cordillera de los Andes, las ciudades de Pasco, de Huancavelica y de Micupampa están edificadas a una altura superior a la del Pico de Tenerife. La hacienda de Antisana en el Reino de Quito está situada a 4.107 metros y sin duda es uno de los lugares habitados más elevados de la tierra (1).

El cultivo de la tierra depende de la variedad de los climas y ésta depende de la altura. Desde el nivel del océano hasta la altura de 1.000 metros, los indígenas cultivan, en América, el plátano, el maíz, el *jatropha* (yuca vulgar) y el cacao. Esta es la región de las piñas, naranjas, mameyes y de las frutas más deliciosas. Los europeos han aclimatado en esta zona, la caña de azúcar, el algodón, el añil y el café; pero estos nuevos ramos de agricultura lejos de haber sido ventajosos a la humanidad, han aumentado la *inmoralidad* y las *des-*

(1) Entonces no se sabía que la altura de la ciudad de Potosí es de 4.166 metros, y la de Calamarca de 4.141 metros; que la ciudad de La Paz tiene 3.717 metros, la Oruro 3.702 y la de Puno 3.911. Estas son hoy consideradas como las ciudades situadas a mayor elevación sobre el nivel del mar. M. V. Jacquemont menciona la aldea de Ghuyoumaenl, sobre el Himalaya, a una altura de 5.000 metros. — A.

gracias de la especie humana: la introducción de esclavos africanos en América, ha sido un motivo de devastación para el antiguo continente y el origen de discordia sin fin y de sangrientas venganzas en el nuevo. De 1.000 a 2.000 metros comienzan a escasear las cañas, el añil, el plátano y la yuca (*jatropha manihot*). El café prefiere un clima menos ardiente y sitios más elevados y pedregosos; crece también allí el algodón, pero no el cacao y el añil que apetecen calor más fuerte. La caña dulce, en el reino de Quito, se cultiva y con provecho hasta una altura de 2.500 metros, pero en sitios en que extensos llanos auxilien la reverberación de los rayos solares. Esta misma región templada es la más agradable para el colono europeo, porque en ella disfruta de primavera perpetua y saborea los frutos más suaves, entre otros el *annona chirimoya*. El cultivo del trigo de Europa comienza desde los 1.000 metros. Es cosa singular que los cereales, estas gramíneas nutritivas que acompañan a los pueblos de raza cáucasa, sean susceptibles de medrar así en los calores tropicales, como expuestas al frío de las cimas glaciales. En la isla de Cuba, a los 23° de latitud, el trigo se cultiva abundantemente a 150 metros de altura sobre el nivel del mar. En la provincia de Caracas, a 10° de latitud, a una altura de 500 metros, se encuentran, entre Turmero y la Victoria, hermosas sementeras de trigo. Los valles de Aragua ofrecen a un tiempo y en la misma llanura, campos en donde se cultivan la caña de azúcar, el añil, el cacao y el trigo europeo. Sin embargo, para que el trigo en los trópicos rinda buenas cosechas a tan poca altura, es necesario un concurso particular de circunstancias; y la verdadera altura en que este grano se cultiva en dondequiera con utilidad, es arriba de los 1.364 metros. En Jalapa (reino de Méjico), latitud 19° 30' 46", el *triticum* crece a 1.314 metros, pero como la espiga no grana, sólo se emplea como pasto para el ganado. En la falda oriental de las montañas de Anáhuac, el cultivo del trigo sólo comienza en Perote a 2.333 metros. En la occidental, es decir mirando al mar del sur, descendiendo hasta 1.292 metros, a cuya altura he visto sementeras en el hermoso valle de Chilpanzingo. En el resto de la América, a saber en el Perú, Quito, Santa Fe y en las otras regiones de Nueva España, la mayor abundancia de trigo existe entre los 1.600 y 1.900 metros de altura, allí produce por término medio de 25 a 30 por uno.

Los frutos del plátano no maduran bien en alturas que exceden de 1.750 metros; pero la planta vegeta hasta los 2.500 metros aunque bien mezquina. La zona del trigo, entre los 1.600 y 1.900 metros, es también la que abunda en *erythroxylum peruvianum* (coca), con la cual se alimenta el indio peruano en sus más dilatados viajes, mezclando las hojas de esta planta con cal cáustica. El *chenopodium quinoa* se cultiva también en la región del trigo, de 2.000 a 3.000 metros de altura. La extensión de las planicies que presenta la cordillera de

los Andes, algunas de las cuales tienen 80 y aun 100 leguas cuadradas (1), favorece singularmente el cultivo de estas plantas. El suelo de estos para-
 jes, plano y fácil de arar, está anunciando que en un tiempo fueron estas planicies lagunas considerable que se han secado. De 3.100 a 3.300 metros, los hielos y el granizo hacen que las cosechas de trigo se pierdan a menudo. El maíz cesa de cultivarse casi enteramente desde la altura de 2.339 metros. Entre los 3 y 4.000 metros, las patatas (*solanum tuberosum*) son el objeto principal de la agricultura. La cebada es la planta cereal que resiste mejor en las grandes alturas de más de 3.300 metros, en donde ya no se da el trigo, pero aun aquélla medra poco por falta de calor. Arriba de 3.600 metros cesa enteramente toda cultura de la tierra. El hombre vive sin embargo en medio de numerosos rebaños de llamas, de ovejas y de vacadas que penetran algunas veces hasta en las regiones de la nieve permanente. Esta escala del cultivo de la tierra, que apenas dejo bosquejada, presenta un cuadro de la industria humana desde el fondo de las minas hasta la más alta cima de la cordillera.

(1) La llanura de Bogotá, elevada sobre el nivel del mar de 2.625 metros, tiene algo más de cien leguas cuadradas de superficie, comprendiendo en ella los terrenos llanos al nordeste de Zipaquirá, los de Subachoque y los del sur de Soacha. — A.

ALTURAS MEDIDAS
 EN DIFERENTES PARAJES DEL GLOBO

Como todos los resultados físicos que he consignado en esta obra están conexiónados con las diversas alturas, me ha parecido conveniente añadir cierto número de medidas verificadas en varios lugares de la tierra, para que sirvan de comparación con las que llevo mencionadas hablando de la cordillera y las he reunido en el cuadro que comprende uno y otro continente para facilitar de este modo comparaciones que pueden ser útiles a los que se ocupan de estudiar los grandes fenómenos de la naturaleza. En el diseño se han marcado las mayores alturas a que se han elevado los hombres sobre el nivel del mar. Saussure, en Mont-Blanc, a 4.756 metros, Bouguer y la Condamine, en el Corazón, a 4.814 metros, y nosotros en el Chimborazo, a 5.909 metros (1). Ultimamente Mr. Gay-Lussac, en su ascensión aerostática verificada en París el 16 de septiembre de 1804, a 7.016 metros, es decir 600 metros más arriba del vértice de la más alta montaña de nuestro planeta (2). Este viaje aéreo, que ha sido fecundo en resultados importantes respecto del magnetismo y del conocimiento químico de la atmósfera, ofrece también un loable ejemplo de valor y de consagración a la ciencia.

(1) Mr. Boussingault, en su ascensión al Chimborazo, alcanzó a una altura de 6.004 metros, cerca de 100 metros más que Mr. Humboldt. — A.

(2) Véase la nota de la página 318.

TABLA DE ALTURAS

Los números que se colocan entre paréntesis manifiestan que hay duda respecto de la altura. La letra H indica mis propias observaciones, sobre las cuales tendré que hacer algunas rectificaciones luego que mis ocupaciones me permitan verificar todos mis cálculos por la fórmula de M. la Place.

AMERICA

Lugares	Altura sobre el nivel del mar en metros	Nombre de los observadores
	6.544	Humboldt
Chimborazo	6.275	Bouguer y la Condamine
	6.587	D. Jorge Juan
Cayambe	5.905	Bouguer y la Condamine
	5.954	H.
Antisana	5.833	H.
	5.878	Bouguer
Cotopaxi	5.753	Bouguer
Rucu Pichincha	4.868	H. fórmula de la Place
	4.816	D. Jorge Juan
Guagua Pichincha	4.740	La Condamine
Tunguragua después de las erupciones de 1772 y el terremoto de 1797	4.958	H.
Antes de estas catástrofes	5.106	La Condamine
No hay que olvidar que en esta diferencia influye no solamente el hundimiento de la montaña, sino la diversidad de métodos empleados en el cálculo barométrico.		
Ciudad de Quito	2.935	H. fórmula de la Place
Santa Fe de Bogotá	2.625	H.
Méjico	2.294	H. fórmula de la Place
Popayán	1.756	H.
Cuenca	2.514	H.

Lugares	Altura sobre el nivel del mar en metros	Nombre de los observadores
Loja	1.960	H.
Cajamarca (Perú)	2.748	H.
Micquipampa (Perú)	3.557	H.
Caracas	810	H.
Hacienda de Antisana	4.095	H. fórmula de la Place
Popocatepetl (volcán)	5.387	H.
Ytzaecihuatl (Orizaba pico)	5.305	H.
Cofre de Perote (Naopautepel)	4.026	H.
Nevado de Toluca (Méjico)	4.607	H.
Volcán de Jorullo	1.204	H.
Monte San Elías	5.513	Expedición de Quadra y Galeano
Montaña de Buentiempo en la América del Norte, por los 60° de latitud boreal	4.549	
Volcán de Arequipa (Perú)	2.693	Espinosa
Pico de Duida (nacimiento del Orinoco)	2.551	H.
Silla de Caracas	2.564	H.
Tumiriquiri (Nueva Andalucía)	1.902	H.
Cumbre de las montañas Azules de Jamaica	2.218	Edward
Mowna Roa (Islas Sandwich)	5.024	Marchand
EN ASIA		
El Monte Líbano (cumbre)	2.906	Labillardiere
Oiy (en la isla de Sumatra)	3.950	Marsden
EN AFRICA		
	3.705	Cordier
	3.701	Johnstone
	3.689	Borda (barón)
Pico de Teyde	4.313	Feuillé (geoméricamente)
	4.687	Heberden (geom.)
	5.180	Manuel Hernández (geom.)
EN EUROPA		
	4.775	Saussure (fórmula de Shukburg)
Alpes. — Monte Blanco	4.728	Pictet (geoméricamente)
	4.660	Deluc (geom. y barom.)
Mont-Rose	4.736	Saussure
Ortler, en Tyrol	4.699	Dudosc
Finsterhorn	4.362	Tralles
Iungfrau	4.180	Tralles
Monch	4.114	Tralles
Aguja de Argentiére	4.081	Saussure
Schreckhorn	4.079	Tralles
Eiger	3.983	Tralles
Breithorn	3.902	Tralles
Großglockner, en Tyrol	3.898	Algo dudosa
Alt-Els	3.713	Tralles
Frau	3.699	Tralles
Aguja del Dru	3.794	Saussure
Wetterhorn	3.720	Tralles
Doldenhorn	3.666	Tralles
Rothorn	2.935	Saussure
El Cramont	2.732	Saussure
Wasserberg, en Tyrol (Salgema)	1.652	Ruch
San Mauricio en Saboya (Salgema)	2.188	Saussure
PASAJES EN LOS ALPES		
En el Mont-Cervin	3.410	Saussure
En la Garganta de Seigne	2.461	Saussure



Lugares	Altura sobre el nivel del mar en metros	Nombre de los observadores
En la Garganta de Terret	2.321	Saussure
En el Mont Cenis	2.066	Saussure
En el Pequeño San Bernardo	2.192	Saussure
En el San Bernardo	2.428	Saussure
En el Simplón	2.005	Saussure
En el San Gotardo	2.075	Saussure
En el Splugen	1.925	Scheuhzer
Las Toras de Rastadt en el Salzburgo	1.559	Moll
En el Brenner (Tirol)	1.420	Buch
Garganta del Gigante	3.426	Saussure
Grimsel	2.134	Tralles
Scheidek	1.964	Tralles
Petina, cumbre del San Gotardo	2.722	Saussure
Buet	3.075	Saussure
Dole (en el Jura)	1.648	Saussure
Montanvert	1.859	Saussure
Horca de Beta	2.633	Saussure
Watsmann	2.941	Beck
Untersberg	1.800	Schieg
Hohestaufen	1.793	Schieg
Rocas del Paso Lug	2.161	Moll
Schneeberg, cerca de Sterzing	2.522	Buch
Cima del Brenner, en Tyrol	2.066	Buch

EN ITALIA

Etna	3.338	Saussure (barom.)
Monte Erix, en Sicilia	1.187	
Monte Vellino (Apeninos)	2.393	Shukburg
Leñone	2.806	Pini
Vesubio	1.198	Shukburg
Monte Rotondo (Córcega)	2.672	Perney
Monte de Oro (Córcega)	2.652	Perney
Monte Grosso (Córcega)	2.237	Perney
Monte Cervello (Córcega)	1.826	Perney
Venda (la más alta cima de los montes Eugáneos)	555	Conde Sternberg
Monte Baldo (cima de la Fenestra)	2.149	Conde Sternberg
Monte Baldo (la cima Monte Mayor)	2.227	Conde Sternberg

EN LOS PIRINEOS

Mont-Perdu (Pirineos españoles)	3.436	Ramond
Viñamala (más alta cima de los Pirineos franceses)	3.356	Mechain
El Cilindro	3.332	Vidal
Maladetta	3.255	Vidal y Reboul
El Pico Largo	3.251	Cordier (Dudosa)
Primera torre de Marboré	3.188	Ramond
Neouvielle	3.155	Vidal y Reboul
Brecha de Rolando	3.155	Ramond
Pico del Mediodía	2.943	Ramond
Canigou	2.935	Vidal y Reboul (niv.)
Pico de Bergons	2.865	Mechain (Geod.)
Pico del Montaigu	2.808	Cassini
Puerto de Pineda	2.781	Mechain
Puerto de Gavarnie	2.712	Ramond
Puerto de Cavarrera	2.376	Ramond

PASAJE DE LOS PIRINEOS ENTRE FRANCIA Y ESPAÑA

Puerto de Pineda	2.516	Ramond
Puerto de Gavarnie	2.331	Ramond
Puerto de Cavarrera	2.259	Ramond

Lugares	Altura sobre el nivel del mar en metros	Nombre de los observadores
Pasaje del Tourmalet	2.194	Ramond
	1.886	Delambre
<i>En Francia:</i> Mont-d'Or	2.042	Cassini
	1.857	Delambre
Cantal	1.935	Cassini
	1.477	Delambre
Puy de Dome	1.592	Cassini
	1.658	Delambre
Puy Mary	1.863	Cassini
	1.689	Delambre
Col de Cabre	2.001	
Montaña de Mezin (Cevennes)	1.403	
El Ballon (Vosges)	1.115	Thuilis y Pistou
Pico de Beguinias	970	Thuilis
Monte San Víctor, cerca de Aix (Provenza)	1.155	Thalacker
<i>En España:</i> Palacio de S. Idefonso		
Picacho de la Veleta (en la Sierra Nevada de Granada)	2.249	Thalacker
<i>En Suecia:</i> Kinekulle	306	Bergmann
<i>En Islandia:</i> Snaefials Sokull	1.559	Povelsen
Hecla	1.013	Povelsen
<i>En Spitzberg:</i> Monte-Parnaso	1.194	Lord Mulgrave

EL PRIMER ARRIBO DE HUMBOLDT A LA NUEVA GRANADA

POR ARMANDO DUGAND

Profesor Asociado al Instituto de Ciencias Naturales,
Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.
Ex-Director del mismo Instituto (1940-1953).

Se cree generalmente que el Barón Alejandro de Humboldt arribó por primera vez al territorio del Nuevo Reino de Granada el 28 de marzo de 1801, cuando el navío en que venía de La Habana hizo escala en el puerto de El Zapote, situado a la entrada de la bahía de Cispatá, cerca a las bocas del río Sinú. Aprovechando la demora del bajel en este lugar, el célebre sabio prusiano y su compañero de viaje Aimé Goujaud, botánico rochelés más conocido con el apodo de Bonpland, desembarcaron en El Zapote y recorrieron sus alrededores hasta San Antero, coleccionando algunas plantas. Dos días después continuaron viaje por mar a Cartagena de Indias (*), a cuya bahía entraron el 1º de abril, tras haberse librado de naufragar en un súbito temporal que les azotó frente a las costas de Tolú. Llegó Humboldt a Cartagena en Domingo de Ramos y a tiempo de observar un eclipse de luna esa misma noche (**).

Sin embargo, no era ésta la primera vez que el ilustre naturalista pisaba tierra granadina. Para la exactitud histórica es menester recordar que un año antes, en abril y mayo de 1800, Humboldt y Bonpland hollaron varias veces el suelo que hoy pertenece a Colombia en las márgenes del Orinoco y el Atabapo, durante su famosa exploración de aquellos ríos.

Como prueba de ello traigamos a la memoria algunas circunstancias de tan extraordinario viaje, extractándolas del pormenorizado relato que Humboldt publicó en su obra "*Voyage aux Régions Équinoxiales du Nouveau Continent*" (Paris, 1820-1822), particularmente en los tomos sexto, séptimo y octavo.

Por abril del año de 1800 Humboldt y Bonpland subían el Orinoco en compañía del padre franciscano Bernardo Zea, misionero de la región de los raudales, y del oficial español don Nicolás Soto, cuñado del entonces gobernador de Barinas. Venían embarcados en una canoa o piragua que, a pesar de su buen tamaño —unos doce metros de eslora por noventa centímetros en las bordas— apenas tenía cabida suficiente para los cuatro viajeros principa-

les y la inquieta tripulación de bogas o remeros que capitaneaba un indio civilizado llamado Zerepe. Además del equipo de campaña de los expedicionarios, sus baúles, armas, libros e instrumentos científicos, y cuanta impedimenta es necesaria para tan largo viaje por regiones casi despobladas, la estrecha embarcación cargaba también todas las colecciones de plantas, animales y minerales que venían haciendo desde su salida de San Fernando de Apure, el 30 de marzo, y cuyo número aumentaba cada día. Y como si fuera poco, acompañábalos un robusto perro que los seguía fielmente desde Caracas (cf. Tomo VI, pp. 341, 342, 346-349).

Acababan de vencer con dificultad el raudal de "Cariven" (Caribén) cuando, a las nueve de la mañana del 12 de abril, llegaron frente a la desembocadura del Meta. Aquí, el fuerte remolino que forman las dos poderosas corrientes del Orinoco y el Meta al encontrarse detúvulos durante dos horas, obligándolos a arrimarse por largo rato a una roca aislada en mitad del río (Tomo VII, p. 383). Frente a ellos tenían ya a la vista el territorio que hoy pertenece a Colombia en la banda meridional del Meta y la Occidental del Orinoco hacia el sur, precisamente donde hoy se asienta Puerto Carreño, capital de la Comisaría del Vichada.

Dejando atrás la turbulenta confluencia del Meta, continuaron ese mismo día su viaje por el Orinoco, pasando frente a los caños "Uita" (Vita o Bitá?) y "Endava" que desembocan en la margen occidental (colombiana). Ya de noche llegaron al raudal de Tabajé, lugar histórico por haber sido término del viaje del Padre José Gumilla, célebre autor de *El Orinoco Ilustrado* (1741). Temerosos los remeros de arriesgarse a cruzar este raudal en la oscuridad, Humboldt y sus compañeros tuvieron que pasar la noche en un sitio extremadamente incómodo, tendidos sobre una roca inclinada cuyas grietas albergaban nubes de murciélagos, y oyendo de muy cerca el rugido de los jaguares que merodeaban en la selva vecina (Tomo VI, p. 390).

Muy temprano el día siguiente (13 de abril) pasaron el raudal de Tabajé, y al caer la tarde abordaron en la playa de Guaripo, arriba del raudal de San Borja. No dice Humboldt (Tomo VI, p. 394) en qué lado del Orinoco está dicha playa, pero puede suponerse razonablemente que se halla en la orilla izquierda u occidental, es decir, en territorio que hoy pertenece a Colombia, porque el Caño Guaripo o Guaripa desemboca en ese lado del río y es muy usual que la ladera o ribera inmediata a la boca de un afluente reciba el nombre de este último.

(*) Sabido es que Humboldt se proponía originalmente seguir viaje de Cartagena a Guayaquil y Quito por la vía de Panamá. En Cartagena relacionóse con don José Ignacio de Pombo, protector de los estudios científicos en la Nueva Granada, quien le instó a que subiera el río Magdalena y visitara a Santafé de Bogotá para conocer al sabio Mutis y los trabajos de la Real Expedición Botánica. Fue huésped de Pombo durante varios días en Cartagena y en Turbaco, y en este último lugar resolvió variar su itinerario en la forma que se conoce.

(**) Los datos relativos al viaje de El Zapote a Cartagena me han sido comunicados muy gentilmente por el doctor Guillermo Hernández de Alba, historiador distinguido y actual Director de la Biblioteca Nacional de Colombia.

Considero por lo tanto que fue en la playa de Guaripo, al lado de la desembocadura del pequeño río de este mismo nombre, donde Humboldt y Bonpland pisaron suelo de Colombia por primera vez, el 13 de abril de 1800. El lugar se halla situado a unas dos leguas arriba del raudal de San Borja, aproximadamente a los 5° 56' de latitud boreal y 67° 30' de longitud al oeste de Greenwich.

Muy poco nos cuenta el ilustre viajero de la noche que pasaron en ese sitio, pero las siguientes frases lacónicas, tomadas de su libro, revelan que no fue muy placentera: "El temor de los pequeños peces caribes nos impidió bañarnos. Los cocodrilos que habíamos encontrado en esa jornada eran todos de tamaño extraordinario, de 22 a 24 pies de largo. El 14 de abril (...) los sufrimientos causados por los zancudos nos obligaron a partir a las cinco de la mañana". (Tomo VI, p. 394).

En los días 14, 15 y 16 de abril los expedicionarios prosiguieron su viaje, acampando todas las veces en la ribera derecha u oriental, que pertenece a Venezuela, y visitaron la misión de Atures, al lado de los grandes raudales que llevan el mismo nombre. También detuviéronse en esas jornadas, ya para almorzar, ya para pernoctar, en islas que pertenecen al país vecino, como las de "Guachaco" (Bachaco) y Panumana, esta última "muy rica en plantas" (Tomo VI, p. 395).

El 17, según refiere Humboldt (Tomo VII, pp. 153, 157), tras algunas horas de navegación pasaron el raudal de Garcita y acamparon "en la ribera izquierda del río, abajo de la isla de Tomo". Este lugar se halla por tanto en el lado colombiano, media legua abajo de la desembocadura del río Tomo, y al pie de un peñón granítico solitario llamado Laja Mapé. "La noche fue bella y serena —añade Humboldt— pero la capa de mosquitos era tan espesa cerca del suelo que no logré nivelar el horizonte artificial y perdí la observación de las estrellas".

El 18 madrugaron a las tres "para estar más seguros de llegar, antes de declinar el día, a la catarata conocida con el nombre de "Raudal de Guahibos" (abajo de los raudales de Maipures). Detuviéronse brevemente en la desembocadura del río Tomo, en el lado colombiano, mientras que los indios remeros preparaban sus alimentos.

La única aldea que Humboldt y Bonpland visitaron en territorio que hoy pertenece a Colombia fue Maipures, donde llegaron en la noche del 18 de abril tras de una accidentada marcha de dos horas a pie por un tupido bosque de palmeras, en la oscuridad más completa porque la lluvia había apagado sus teas de copal, y cruzando los crecidos arroyos sobre resbaladizos troncos atravesados en los cauces a manera de puentes. Habían desembarcado, ya entrada la noche y bajo una violenta tempestad, en el "Puerto de abajo", al pie de los raudales de Maipures y cerca de la boca del Caño Toparo o Tuparro. De su llegada a Maipures en altas horas de

la noche cuenta Humboldt que "sorprendióles doblemente el aspecto y la soledad del lugar; los indios estaban sumidos en el sueño más profundo, y no se oían sino los gritos de las aves nocturnas y el ruido lejano de la catarata." (Tomo VII, p. 164).

La misión de San José de Maipures, fundada en un sitio muy pintoresco por el capitán don José Solano en los tiempos de la Real Expedición de Límites (1754), tuvo considerable importancia en la región de los grandes raudales del Orinoco durante la segunda mitad del siglo XVIII, cuando la administraban los Padres Jesuitas. Su población, en la que se contaban varias familias de blancos, alcanzó entonces a unas seiscientas almas. Pero tras la expulsión de los Jesuitas vino a menos a tal punto que, cuando el viaje de Humboldt, el caserío se había reducido a siete u ocho cabañas pajizas que servían de albergue a unos sesenta indios (Tomo VII, pp. 166, 186). Estas escasas chozas rodeaban una pequeña capilla edificada con troncos de palmeras, al lado de una casa de dos pisos que el Padre Zea había hecho construir para él. La casa cural carecía de los enseres más elementales, como mesas y asientos, y se hallaba en tan destartada condición que el buen misionero decía con mucha gracia que en ella gozábese de "las mismas comodidades que en campo raso" (Tomo VII, p. 162).

Hoy no quedan de Maipures sino escasos vestigios cubiertos por la vegetación (*).

En esa localidad permanecieron Humboldt y Bonpland dos días y medio, que aprovecharon de manera muy útil para la ciencia coleccionando plantas, haciendo observaciones sobre la topografía y la geología de la región, y tomando notas etnológicas y lingüísticas de gran interés (Tomo VII, pp. 164 a 208. Véase también "*Cuadros de la Naturaleza*", por Humboldt, traducción de B. Giner, Madrid, 1876, pp. 221 a 229). Mientras tanto, una cuadrilla de indios se ocupaba en subir la piragua desocupada, halándola por los extensos raudales, desde el "puerto de abajo" hasta el "de arriba", situado este último en la desembocadura del Caño Camejé.

Habiéndose embarcado nuevamente el 21 a las dos de la tarde en el "puerto de arriba", y pasado la noche en la gran isla Ratón, perteneciente hoy a Venezuela, los viajeros llegaron el 22 a la desembocadura del río Vichada. Arrimando su piragua otra vez a la orilla occidental (colombiana), saltaron a tierra momentáneamente con el objeto de examinar la vegetación en un sitio muy ameno que Humboldt describe como de los más pintorescos por la muche-

(*) Maipures es localidad frecuentemente citada en las ciencias naturales. Después de Humboldt y Bonpland, que le dieron renombre primero, fue visitada hace un siglo por el gran explorador botánico inglés Richard Spruce, quien permaneció allí diez días en junio de 1854 (cf. R. Spruce, "Notes of a Botanist on the Amazon and Andes, edited and condensed by Alfred Russell Wallace, Vol. I [1908], pp. 453 et seq.). En diciembre de 1898 y enero de 1899 coleccionaron numerosos ejemplares en Maipures el ornitólogo George K. Cherrie y su esposa, Stella M. Cherrie; y en enero y fines de abril de 1913 tocóles el turno a los coleccionadores de aves Leo E. Miller y F. X. Igliseder (cf. A. Dugand y W. H. Phelps, "El Status Geográfico de las aves de Maipures", en *Caldasia*, Vol. 4, No. 8, pp. 243 et seq., 1946).

dumbre de peñas graníticas que allí se yerguen entre la selva, y cuyas formas caprichosas semejan bloques prismáticos, pilastras aisladas, o arruinados torreones de pocos metros de elevación. Admiráronse que estas peñas, algunas de las cuales tienen la cima coronada de palmeras, estuviesen cubiertas de musgos y líquenes, pues por mucho tiempo creyóse que las criptógamas no medraban en la zona tórrida. Su sorpresa fue también grande al notar que entre las rocas crecía una rara especie de cacto columnar.

Volviendo a su piragua, y siguiendo el viaje río arriba, dejaron atrás el Caño Pirajavi en la margen oriental, y luego en la occidental un pequeño río que, según los tripulantes indios, nace en un lago llamado Nao. Esa misma tarde desembarcaron en una playa cercana a la boca del río Zama, a pocas leguas arriba de la del Vichada, y también en el lado colombiano del Orinoco. Allí pasaron la noche.

De aquí en adelante prosiguió el dificultoso viaje fluvial de Humboldt y sus compañeros, Orinoco arriba, hasta la doble confluencia del Guaviare y el Atabapo (San Fernando de Atabapo, 25 de abril), y por este último río —y su afluente el Temí— rumbo al sur hasta el Caño Tuámini y la misión de San Antonio de “Javita” (Yavita), en territorio de Venezuela, donde llegaron el 1º de mayo. En Yavita permanecieron cinco días alojados en casa del afable misionero Eugenio Cereso, examinando la vegetación de los alrededores y coleccionando ejemplares guiados por el célebre cacique Yavita que en un tiempo fue aliado de los portugueses tratantes de esclavos. Mientras tanto, veintitrés indios llevaban la larga y pesada piragua hasta el Caño Pimichín, arrastrándola con gran dificultad por tierra en una distancia de 14 kilómetros (*) a través de una selva grandiosa, poblada de árboles gigantes y gran número de serpientes (Tomo VII, pp. 299, 302-304, 313, 318, 347, 353).

Embarcándose al salir el sol, el 6 de mayo, bajaron en cuatro horas y media hasta el río Guainía por el angosto y muy sinuoso riachuelo llamado Caño Pimichín. Siguiéron el Guainía, aguas abajo, deteniéndose brevemente en las misiones de Maroa y San Miguel de Davipe que se hallan en la ribera venezolana, y pasando de largo frente a la de Tomo, en la banda colombiana. Al caer el sol llegaron a la isla de Dapa y desembarcaron para pernoctar, mas una lluvia persistente impidióles sentar su campamento al raso, y viéronse obligados a buscar refugio en la única choza que había en esos contornos. Pasaron allí una noche pésima durmiendo promiscuamente con numerosos indios de ambos sexos, totalmente desnudos, cuyo alimento principal eran hormigas ahumadas. Mucho antes del alba, el 7 de mayo, salieron de la isla Dapa y siguieron viaje rumbo al sur por el Guainía. Doce horas después, aprovechando la rápida corriente del río, lle-

garon a San Carlos, en la orilla venezolana y ocho millas abajo del punto en que el Casiquiare une sus aguas a las del Guainía para formar el Río Negro, el mayor afluente norteño del Amazonas. En San Carlos dióles hospedaje en su casa el comandante de la pequeña guarnición española, compuesta de diecisiete soldados mal armados, destacada allí para vigilar la frontera con los dominios portugueses del Brasil.

San Carlos fue el punto extremo alcanzado por Humboldt en su exploración del Río Negro. Frente a esta población había entonces un pequeño fortín que los españoles llamaban pomposamente “Castillo de San Felipe”. El sitio en que se levantaba esta obra militar hállase en la ribera que hoy pertenece a Colombia, donde todavía pueden verse los vestigios. Pero no consta que Humboldt ni Bonpland atravesaran el río para visitar tamaña “fortaleza”; al contrario, bien explícito es el sabio prusiano en su relato (Tomo VII, pp. 447 y 448) al manifestar que el comandante de San Carlos celoso guardián de los secretos militares de España en estas remotas comarcas, solamente permitió la visita a don Nicolás Soto, el oficial español que acompañaba a Humboldt.

El río Atabapo en casi toda su longitud (desde su desembocadura hasta la confluencia del Guasacaví), y el río Guainía en toda la parte que Humboldt y Bonpland recorrieron, forman la frontera natural actual entre Colombia y Venezuela, siendo de Colombia la banda occidental de estos ríos, y de Venezuela la oriental. Según el relato de Humboldt (Tomo VII, pp. 275 a 445) los exploradores unas veces desembarcaban para herborizar o pasar la noche en una orilla, y otras veces en la opuesta, o sea que también en las márgenes de estos ríos pisaron suelo colombiano. Pero en dicho relato no aparecen especificados de manera precisa los lugares en que lo hicieron, excepto la misión de San Baltasar (en Venezuela), y un sitio llamado “Conucos de Guapasoso” que no se encuentra en los mapas que he visto (*). En cuanto al río Temí y los caños de Tuámini y Pimichín, lo mismo que el trecho terrestre que constituye el arrastradero de Yavita a Pimichín, hállanse íntegramente en territorio venezolano. Los demás lugares mencionados por Humboldt son raudales, islas y rocas en medio del río, excepto el sitio de la extinguida misión de “Mendaxari” —en el lado colombiano— frente al cual pasaron sin detenerse.

Resolviendo interrumpir su viaje por el Río Negro hacia tierras brasileñas porque temía ser molestado, y aún arrestado, por las recelosas autoridades portuguesas, Humboldt emprendió el regreso de San Carlos hacia el Orinoco el 10 de mayo. Empero, no volvió sobre sus pasos por la vía más corta del Guainía y el Atabapo sino que, entrando por el Casiquiare recorriólo en toda su longitud hasta

(*) 17,180 varas de 0 m. 836 según medición hecha sobre el terreno por el P. Cereso.

(*) Situado “a 2 o 3 leguas de camino” (por el río Atabapo) de San Fernando de Atabapo (Tomo VII, p. 275).

el Alto Orinoco, al que llegaron los exploradores tras once días de navegación muy penosa por una región desierta e insalubre. En esta travesía Humboldt comprobó de manera definitiva la comunicación fluvial directa por el Casiquiare entre las cuencas del Amazonas y el Orinoco, y determinó el curso de tan extraordinario canal natural fijando varios puntos de su trayecto de 180 millas por medio de observaciones astronómicas. Utilizada muchas veces desde 1737 por los traficantes de *poitos* o esclavos, que venían del Brasil por el Río Negro en función de su incuo comercio, para comprar por baratijas o capturar a la fuerza su desgraciada mercancía humana a orillas del Orinoco, el Guaviare y el Atabapo, aunque ignoraban por completo que las aguas del río "Paragua", a que llegaban por el Casiquiare, eran las mismas del Orinoco; negada con tanta vehemencia como sin razón en 1741 por el Padre Gumilla (quien, como se sabe, no pasó del raudal de Tabajé, distante más de cien leguas al norte); descubierta su verdadera índole en 1744 por el valeroso Padre Manuel Román, superior de las misiones jesuítas; anunciada públicamente en 1745 por La Condamine en sesión de la Academia de Ciencias francesa; y transitada frecuentemente por los comisionados españoles y portugueses desde 1756, cuando se estableció en aquellas regiones la Real Expedición de Límites, la existencia de tan extraordinario vínculo natural entre los dos grandes sistemas hidrográficos suramericanos había sido puesta en tela de juicio por varios geógrafos europeos del siglo XVIII, entre ellos el notable *primer geógrafo* de Luis XV, Philippe Buache, que no vaciló en considerar la tal comunicación como una "monstruosidad geográfica" imaginaria.

El 28 de mayo, volviendo de su exploración del Alto Orinoco, Humboldt y sus compañeros sentaron campamento otra vez en suelo colombiano a orillas del Orinoco, en la desembocadura del río Mataveni o Matabén (Tomo VII, nota 3 al pie de la p. 179), a medio camino entre las confluencias del Guaviare y del Vichada. El 29 cubrieron la distancia de 13 leguas entre el Mataveni y el "puerto de arriba" de Maipures en diez horas, aprovechando la corriente del Orinoco fuertemente acelerada por una súbita creciente.

De la noche del 29 al amanecer del 31 los encontramos nuevamente en Maipures aprestándose para vencer de bajada los grandes raudales. Finalmente, en los primeros días de junio, habiendo dejado al Padre Zea en la misión de Atures, pasaron por la confluencia del Meta y se alejaron del territorio colombiano, internándose en el de Venezuela.

De todo lo anterior conclúyese que Humboldt y Bonpland pisaron suelo de Colombia en las siguientes ocasiones, dispuestas en orden cronológico:

Playa de Guaripo, en el Orinoco, la noche del 13 al 14 de abril de 1800.

Abajo de la isla de Tomo, a orillas del mismo río, la noche del 17 al 18 de abril.

Boca del río Tomo, al amanecer del 18 de abril.
Maipures, del 18 al 21 de abril.

Cerca de la desembocadura del río Vichada, el 22 de abril.

Boca del río Zama, la noche del 22 al 23 de abril.

Cerca de la boca del río Mataveni o Matabén, la noche del 28 al 29 de mayo, cuando regresaban del Río Negro y Alto Orinoco.

Maipures, del 29 al 31 de mayo.

Los demás lugares mencionados en el relato de Humboldt, o son venezolanos, o no están bien determinados, o no se encuentran en los mapas que he visto.

SUMMARY IN ENGLISH

It has been thought heretofore that Baron von Humboldt's first landing in New Granada (now Colombia) occurred at El Zapote in March, 1801. The author of the present article uses data excerpted from Humboldt's "*Voyage aux Régions Equinoxiales du Nouveau Continent*" (Tomes VI, VII, VIII, 1820-1822) to show that the celebrated scientist and his botanist companion Aimé Bonpland first set foot on Colombian soil a year before, on April 13, 1800, at a point known as Playa de Guaripo, on the western bank of the Orinoco River. On the days following this date they landed at several other localities on either the western (Colombian) and eastern (Venezuelan) side of the Orinoco, mainly with the purpose of camping overnight, or collecting plants. The most important locality visited by them on the Colombian side was Maipures, frequently cited in scientific literature.

The known Colombian localities visited by Humboldt and Bonpland on the Orinoco River are the following: Playa de Guaripo (April 13, 1800); Below the island of Tomo (April 17); Mouth of Río Tomo (April 18); Maipures (April 18-21, and later on May 29-31); Near the mouth of Río Vichada (April 22); Mouth of Río Zama (April 22); Near the mouth of Río Mataveni or Matabén, on their return trip from the Río Negro (May 28).

It is also known that the famous explorers came to shore several times (April 25-30) on either bank of the Atabapo River for camping or collecting. The western side of the Atabapo is in Colombian territory, and the opposite side belongs to Venezuela.

ELOGIO DE HUMBOLDT A LA OBRA DE CODAZZI

(Carta dirigida por el sabio alemán al coronel Codazzi el 20 de enero de 1841)

Señor Coronel:

No puedo verlo partir para ese bello país que me ha dejado recuerdos tan gratos, sin renovarle la expresión de mi alta y afectuosa consideración. Nuestros trabajos geográficos que comprenden una inmensa extensión del país y que contienen a la vez el detalle topográfico más exacto y nociones de altura tan importante para la distribución de los climas, harán época en la historia de la ciencia. Me fue dado vivir lo bastante para haber visto terminada una vasta empresa, que, ilustrando el nombre del Coronel Codazzi, contribuye a la gloria del Gobierno que tuvo la sabiduría de protegerlo y a quien traté de encontrar en un viaje rápido. Cuando proyectaba una red de posiciones astronómicas e hipsométricas sobre Venezuela y la Nueva Granada, he encontrado, por vuestras nobles investigaciones, señor, una confirmación y una amplitud que sobrepasan mis esperanzas. Miembro de la Academia de Ciencias, yo habría firmado con placer, si hubiera estado en Francia, el excelente informe que dos de mis más íntimos amigos, los señores Arago y Boussingault, realizaron sobre su Carta y sobre las obras históricas y geográficas destinadas a ilustrarla. El establecimiento de un pequeño Observatorio estable en Venezuela, dotado del pequeño número de instrumentos sobre los cuales se basan hoy día todos los trabajos de astronomía práctica, tiene alta importancia para la ciencia. Las estrellas del cielo austral entre las cuales se han observado recientemente las de Argonave, de intensidad tan notoria, observaciones de declinación magnética hechas en las mismas épocas que en Europa para examinar el isocronismo de las perturbaciones (por así decir la extensión de las tempestades magnéticas), investigaciones sobre las estrellas errantes principalmente en los días especiales del 10 o del 13 al 15 de noviembre, serían de una alta importancia para el establecimiento de sus periodos. El señor Arago experimenta un placer y un deber al dar a usted sus consejos y aún de suministrarle el joven astrónomo que el Gobierno podría colocar a la cabeza del pequeño Observatorio de Venezuela.

Reciba usted, señor, la expresión renovada de mi vivo agradecimiento y de mis sentimientos más afectuosos.

ALEJANDRO HUMBOLDT

París,
20 de enero,
1841.

¿Deben temerse
en Cumaná los temblores
de tierra muy frecuentes?

En un debate científico pequeñas consideraciones de variedad local deben apartarse; la capital (Caracas) no parece ofrecer un clima favorable a observaciones, es Cumaná cuya cumbre es admirablemente serena y la ausencia de playas marítimas le dan ventaja sobre Nueva Valencia, Calaboso y aún sobre Coro. Antes de escoger en la Cap. sería deseable ir a Cumaná?

Monsieur le Colonel,

Je ne puis vous ~~laisser~~ voir parler pour ce beau pays que
à l'inspiration de nos haute et affectueux cart. D'ailleurs
Nos travaux géographiques, embrassent une si immense
étendue de pays, offrant à la fois le détail
topographique le plus exact et des notions de climats,
hauteurs si importantes pour la distribution des climats,
faune, flore dans l'histoire de la Pérou. Il
me est donc d'avoir vu un système, pour avoir vu l'œuvre
de Codazzi, contribue à la gloire du Gouvernement qui a vu la
œuvre écrite, en jetant un regard sur la Venezuela et la
en Amérique et l'Amérique par le Venezuela et la
Nouvelle Espagne, et tout, que vos nobles investigations,
publiées, une confirmation et un agrandissement qui
trouvent une expression dans de l'Académie des Sciences

HUMBOLDT Y LAS CIENCIAS NATURALES

Discurso del ministro de educación, doctor Abel Naranjo Villegas, en el homenaje rendido por la Universidad Nacional a la memoria del ilustre sabio alemán.

Vamos a incorporar en la memoria de los colombianos al Barón Alejandro de Humboldt. Y vamos a hacerlo precisamente en los prados de esta Universidad Nacional de Colombia, para que el bronce que evoca aquí su figura, reencuentre el contacto con la naturaleza que él descubrió y con los hombres que aquí están estudiando la ciencia. Y esto lo hacemos porque éste es el centro pensativo de Colombia, el cerebro a donde deben llegar todas las meditaciones de quienes se empeñan científicamente por conocerla. Desde todos los confines de la tierra y de la ciencia deben venir aquí a servir a la memoria de los estudiantes colombianos, aquellos que han sido precursores o formadores de nuestra realidad histórica.

EL DESCUBRIDOR DE NUESTRA NATURALEZA

Cuando un día aparece por estas tierras Cristóbal Colón, trayendo en sus frágiles carabelas la concepción geográfica de nuestro continente, no quedó todavía descubierto con esa posesión material de las tierras, el sentido de nuestro hemisferio. La inmensa variedad de su naturaleza necesitaba un ciclópeo descubridor que, como Humboldt, viniera a precisar nuestros fenómenos naturales. Entre esa flora nos descubrió las mejores especies, que fueron las llamadas José Celestino Mutis y Francisco José de Caldas, graves y acuciosos investigadores que continuaron su obra portentosa. Y si estos dos genios universales, Colón y Humboldt, descubren nuestra geografía y nuestra naturaleza, será necesario que un día aparezca otro descomunal investigador que, extraño a nosotros, con más objetividad y más desinterés, descubra también el sentido de nuestra historia para completar el hemisferio de nuestra sabiduría.

Los etnólogos y antropólogos escrutan los rasgos y caracteres de nuestro pueblo, para encontrar las procedencias de la raza y el signo de su mestizaje. Pero es a los filósofos de nuestra historia a quienes va a corresponder un día fijar las cuotas espirituales que constituyen el mestizaje espiritual, el más seguro signo de nuestra posibilidad como cultura. El espíritu de España en la religión e idioma; el inglés en el derecho público; el francés en el derecho privado y la sensibilidad literaria y el alemán en la vocación científica, podrían ser los radicales de nuestro mestizaje cultural. En esas corrientes aparecerá, al lado de la influencia colonizadora de los Federman, la corriente colonizadora del espíritu, en la figura gallarda, exuberante y mediatunda a la vez de Alejandro de Humboldt. Con él llega hasta nosotros el método científico para la naturaleza, porque con él empieza a hablarse entre nosotros de las minas, las manufacturas, los gases nocivos, la constitución de nuestras tierras, la atmósfera, la distribución de los estratos de

sus montañas, las plantas, los animales, los astros, el magnetismo, los eclipses, los volcanes, el asedio oceánico, las zonas desérticas, la raza, nuestras cataratas y fontanas y hasta el paso transeúnte y presagioso de las nubes. Seguir sus caminos es ya ponerse en contacto con un mundo que no podremos conocer siguiendo otras huellas de civilizaciones ajenas porque nada hay más auténtico que nuestra naturaleza.

Humboldt, fiel al genio alemán, nos enseñó desde la universalidad a comprender lo singular de nuestra naturaleza. Pero sus trabajos tuvieron en él otro objeto de mayor estatura: el de comprender el mundo de los fenómenos y de las formas físicas en su conexión, y en su mutua influencia; el de procurar “desenvolver el conjunto de los fenómenos físicos del globo, y la acción simultánea de las fuerzas que animan los espacios celestes”. Fue también el de buscar “la conexión que existe entre las fuerzas de la naturaleza y el sentimiento íntimo de su interdependencia”; el de encontrar “éste todo animado por un soplo de vida”, en que se muestra la naturaleza como “unidad de la diversidad de los fenómenos, como armonía entre las cosas creadas que difieren en su forma”.

LA CIENCIA COMO PASION

Revivir, pensándola, la vida de Humboldt, es hacerlos conciencia del destino del hombre, cuando la ciencia se convierte en pasión. En que consiste la pasión de la ciencia, la que empuja a buscar la regularidad de los hechos y la formación de principios? Responder a semejante pregunta es tanto como poner en claro la vocación intelectual del hombre, la que como a hombres de ciencia nos corresponde realizar en la historia. Debemos, nosotros, querer ese destino desde sus fundamentos; remitirnos, nosotros mismos, decididamente a él, para que la reiteración sapiente no sea un mero repaso informativo, sino un acto severo de autoafirmación como personas. La autoafirmación, sin embargo, es imposible sin un proceso de autoconocimiento. ¿Queremos, nosotros, la esencia de la Universidad, para que en ella se haga ciencia? Porque la ciencia, por sí misma, no necesita existir. Si ella existe, y ha de existir en las aulas, es por nosotros y para nosotros. Quienes se dedican a ella, como pretexto para otros menesteres, están defraudándola, y esta honestidad intelectual es una de las grandes lecciones de este producto superior de humanidad que se llamó Federico Alejandro de Humboldt.

LA NECESIDAD DE TEORIA

La ciencia, dice Humboldt, no empieza para el hombre hasta el momento en que el espíritu se apodera de la materia, cuando compulsa el valor de las observacio-

nes, combina y razona, trata de someter el conjunto de las experiencias a leyes. O, con otras palabras, que la ciencia no empieza para el hombre sino cuando el hombre es capaz del comportamiento teórico. Teoría, se dice, es la pura contemplación, que nace en el admirar, como un mirar intensivo que se dirige a las cosas. Es el estado de ánimo que nos incita hacia el conocimiento. Teoría, es pues, una manera de ser exclusiva del hombre cuando se da en el colmo de su intensidad la relación entre el sujeto que mira el objeto admirado. Esta es la segunda lección de este maestro. La admiración que, como establecieron los griegos, es el principio de la sabiduría. Los americanos miramos solo las cosas. Pero este prusiano singular fue el primero que nos lanzó a la admiración de ellas.

La teoría nace, pues, únicamente en la voluntad decidida por permanecer en el interior de las cosas y en su urgente llamada. A la voluntad decidida se la denomina pasión. Pasión por el ser en total: he aquí la actitud teórica, que nosotros llamamos actitud científica. Vivirla es ganar la contemplación de sí mismo en la pura contraposición al ente, por cuyo sentido, entonces, se hace posible interrogar; es ponerse en estado del conocimiento de sí, a que se llama autoconocimiento, y del sentido del ser, con que se da la relación cognoscente.

Nosotros hemos perdido el sentido de la relación de autoconocimiento, que es el sentido del hombre en actitud teórica, y nos hemos quedado con el sentido del ente, convirtiendo la actitud teórica en un mero preguntar por las cosas. Llamamos por eso ciencia al interrogante quehacer, que acumula el saber sobre la naturaleza de las cosas. Lo que valía en Humboldt era su apasionado saber de la naturaleza, el dominio de sus relaciones. Preservemos a la Universidad de convertirse en el ámbito del conocimiento científico, en que se enseñan y se aprenden las ciencias, sin pasión. La que urge por el conocimiento de sí y del sentido del ente, contrapuesto en la situación de la actitud teórica, de que brotan la norma y el objetivo del saber. La teoría es, pues, el más encumbrado momento del pensar y el pueblo que no la tiene carece de objetivos. Bagavad Ghita dice que nuestros actos siguen a nuestros pensamientos como la rueda del carro a la pezuña del buey.

LA URGENCIA DE PENSAR

Una interpretación ciega para la existencia, ciega para el sentido de la necesidad y relación, malentendió el principio de ciencia, e interpretó su ejercicio como la pura y simple formulación de leyes. Y, desde entonces, los hombres de ciencia no piensan sino que legislan, sin comprender que el saber, según palabras de Esquilo, es menos fuerte que la necesidad. Así empezó la deshumanización del hombre. La ciencia, entonces, no piensa ya, sino que se ocupa con conocimiento y se convierte en "ciencias". Desde este instante desaparece la pasión que libera, que da un presente, que proyecta un futuro, que despierta el desnudo para realizarlo. Y la ciencia se nos vuelve fría, desinteresada, "objetiva" erudición que a nada compromete, como un cómodo y distinguido ejercicio profesional. Así se consumó la deshumanización del hombre, y pervirtió el sentido de la Universidad al evaporar el de universalidad. Amputado

el hombre de la pasión que lo vincula a sus semejantes y lo relaciona con el universo, se convirtió en una fría máquina de formular leyes, con las cuales pudo lanzarse hasta el exterminio de sus semejantes.

Por eso nos esforzamos con celo en el aprendizaje científico, aprendemos de su experiencia en la superabundancia de cosas de la naturaleza, y hasta tomamos conciencia de las limitaciones. El límite o término del conocimiento científico es incentivo para nuevas preguntas sobre lo que existe detrás: "Así se revela, escribía Humboldt, un lazo entre el mundo visible y un mundo superior que se escapa a los sentidos". Era el naturalista que comprende la naturaleza desde la atmósfera superior del humanismo, atento a todos los requerimientos del hombre, mensajero del espíritu.

En pueblos de nuestro subjetivismo racial, elevar al hombre hasta el nivel de la teoría es enseñarle a manejar los instrumentos del espíritu con la objetividad esencial a una conducta superior. Nuestra crueldad es oriunda de ese subjetivismo y sólo será capaz de modelarnos para formas de coexistencia civilizada. Al introducir, pues, en nuestra vida la actitud científica, Humboldt planteó la dialéctica, insuperada todavía de la conducta arbitraria, nacida en la barbarie, y la señorial que es patrimonio del hombre moralmente elevado.

Nos llamamos partícipes de la cultura occidental, y somos hombres de Hispanoamérica: lo que nos ha de salvar, empero, si somos hombres de ciencia, no es la tradición hispanoamericana sino la tradición del hombre, pura y simplemente, como liberación que permite la adopción de su esencia.

LA UNIVERSIDAD

La ciencia debe, pues, convertirse en el poder formativo de la comunidad, si la comunidad ha de ser comunidad científica, capaz de integrar el cuerpo y de realizar el espíritu de la Universidad. Queremos la esencia de la Universidad, en tanto queramos la esencia del saber y la ciencia, pero la primera condición de esta voluntad esencial es el rigor del pensamiento, que se atreve a la universalidad, sin pretender, sin embargo reducir a principios y a meras ideas la esencia variable de la realidad existente.

Rememorar a Humboldt es obligarnos a su voluntad científica y a su pasión por el sentido universal de las cosas; es aceptarle como predecesor en la tradición verdadera, que nos exige, en el rigor del pensamiento, la más firme claridad del más alto, más amplio y más rico saber sobre el destino de nuestra existencia como unidad histórica.

Esa capacidad de ser hombre en totalidad es la lección final de este sabio que pensó, amó, sintió por todos los poros de su personalidad y en cuya vida ejemplar jamás se conoció un momento de ordinariez. Gran espíritu de su tiempo, con él puede decirse que invade las esferas de nuestro mundo colonial el aire renacentista, sacudiendo nuestra melancolía con un garbo inusitado de juventud. Y, por eso, fue también un precursor de nuestra autonomía nacional, porque en el choque

con los enjutos intereses advirtió que el porvenir de la ciencia en América estaba vinculado al porvenir de su libertad.

Sus biógrafos lo señalan como un ser exquisito, lleno de sabiduría y de anécdotas, humano hasta el delirio, grave en su oportunidad, estudioso, comunicativo y cortés. Este además con los semejantes es uno de los más subrayados de su personalidad que lo indican como dueño de una cortesía refinada porque ella procede del corazón, del sentimiento de la dignidad personal. Es que ese además noble, la sencillez graciosa impresa en el gesto y en la palabra, constituyen una poesía física irrefutable y trascendental.

Sabía este selecto producto de la cultura germánica que en la sociedad todo es solidario y que la ciencia no da franquías para aislarse de los semejantes y que quienes nos dedicamos a enseñar, tenemos que aprender primero que los honores que rendimos a los semejantes son la única garantía de los que se nos deben.

En el cuadro gigantesco de nuestra naturaleza aparece Humboldt con la majestad de un profeta, señalándonos las claves misteriosas de su interpretación científica. De Poussin se dijo que había convertido en accesorio el paisaje en sus Pastores de la Arcadia porque el pintor sostenía que el hombre se envilece cuando en el lienzo aparece subordinado a la naturaleza. Y Humboldt no pensó otra cosa cuando entregó a la ciencia universal todos los datos de nuestra naturaleza para que

se advirtiera la magnitud del hombre que habría de producirse en este hemisferio cuando fuera capaz de dominarlo.

Al asomarnos hasta el centenario de su muerte no hacemos otra cosa que rejuvenecer su pensamiento, porque en estos días nos hemos acercado a sus fieles discípulos colombianos, a aquellos que silenciosamente, a veces desamparados de sus contemporáneos, han proseguido su obra y enorgullecen la ciencia colombiana con el saber que han acumulado y con la magnanimidad de su corazón. A ejemplo suyo ellos viven recoletos en la contemplación del inmenso cuadro geopsíquico de América, completando y avanzando las investigaciones que el genio insaciable de Humboldt, con vigor juvenil, realizaba hace cien años, en las inmediaciones de la eternidad.

Muerto prematuramente a los noventa años, como se dijo de Dilthey, no creyó que la ancianidad cancelara su deber con la ciencia, con la gracia y con la humanidad.

He aquí en pocas palabras por qué, desde hoy, emergerá entre el tumulto de los estudiantes que por aquí pasen, la figura congelada ya en el bronce de este maestro que, en su fugaz paso por nuestras tierras, adquirió la nacionalidad de nuestro espíritu y debe ser venerado por la juventud colombiana.

El gobierno Nacional lo deja aquí para ejemplo de las generaciones.

6 DE MAYO DE 1959, CENTENARIO DE LA MUERTE DEL BARON ALEJANDRO DE HUMBOLDT

DECRETO NUMERO 1136 DE 1959

por el cual se conmemora el centenario de la muerte del Barón Alejandro de Humboldt.

El Presidente de la República de Colombia,

CONSIDERANDO:

Que el día 6 del mes de mayo del presente año se cumple el centenario de la muerte del insigne sabio alemán, Barón Alejandro de Humboldt;

Que el Barón de Humboldt presentó al mundo culto de la época, como resultado de sus fecundos viajes y en obras de imponderable mérito científico, las verdaderas calidades y características de la naturaleza americana;

Que durante su permanencia en la Nueva Granada, el territorio de lo que es hoy la República de Colombia fue objeto de muy acuciosos y sistemáticos estudios por parte del destacado naturalista alemán;

Que su visita a la Nueva Granada contribuyó de manera notable a la orientación del movimiento científico que en ese entonces dirigían e impulsaban las más esclarecidas figuras de la Expedición Botánica;

Que el Barón de Humboldt después de su regreso a Europa continuó vinculado estrechamente hasta su muerte al movimiento científico y cultural de los distintos países de América y en especial de la Nueva Granada, estimulándolo mediante su divulgación en los centros académicos europeos y con el aporte de sus valiosas contribuciones personales; y

Que es deber del Gobierno exaltar los méritos de los grandes servidores de la ciencia universal y señalar sus virtudes como ejemplo para las nuevas generaciones,

DECRETA:

Artículo primero. — El Gobierno de Colombia al conmemorarse el primer centenario de la muerte del ilustre naturalista alemán, Barón Alejandro de Humboldt, rinde tributo de admiración a su memoria y a los calificados méritos de su espíritu científico.

Artículo segundo. — Las Academias, Institutos de Investigación y demás Centros Culturales del país organizarán actos conmemorativos especiales dedicados a exaltar la obra cumplida por el Barón Alejandro de Humboldt en el campo de las ciencias naturales y el significado que ésta tiene en la valorización de las realidades patrias.

Artículo tercero. — La Universidad Nacional por conducto del Instituto de Ciencias Naturales dictará las providencias del caso para la creación del premio "Alejandro de Humboldt" que será otorgado el 6 de mayo de cada año al mejor trabajo de investigación realizado en Colombia en el campo de las ciencias naturales y disciplinas afines.

Artículo cuarto. — El Ministerio de Educación Nacional destinará del presupuesto de la actual vigencia las partidas necesarias para la publicación de una obra en honor del Barón Alejandro de Humboldt, en la cual se recogerán aquellos estudios y homenajes realizados y rendidos con ocasión de los actos conmemorativos del primer centenario de su muerte.

Comuníquese y publíquese.

Dado en Bogotá, D. E. a 18 de Abril de 1959.

ALBERTO LLERAS CAMARGO

El Ministro de Educación Nacional,
ABEL NARANJO VILLEGAS



Humboldt, según un óleo de J. R. Lambdin



Alejandro v. Humboldt, según un óleo de F. G. Weitsch



EVOCACION DEL BARON ALEXANDER VON HUMBOLDT

SIEGFRIED STRIEGEL

Optómetra de la Casa Zeiss, Miembro de
la Casa Humboldt, de Bogotá

Hacer la biografía de un personaje célebre, de una figura prócer cuyo escenario haya sido el mundo de la política, de la ciencia, del arte, etc., es tarea difícil en los aspectos de su aceptación por el lector universal: el ideario y la realidad integrantes de aquella vida ofrecen tal multitud de facetas y de ángulos que si se entra a enfocarlos y analizarlos en su totalidad, una monotonía irresistible acabará por ahuyentar el interés y la atracción de aquella obra. Tal vez sea más atractivo y más eficaz para el conocimiento y valoración del gran personaje mostrar la forma y medida de nuestra vinculación devota de su grandeza, así sea lo asentado simplemente en lo sentimental o en lo intuitivo.

La escuela a que asistí de niño distaba un poco de la casa hogareña; el camino lo recorría, naturalmente, con desagrado. En un buen trecho se llamaba la Vía Humboldt, y como terminaba en la propia escuela, ésta, llevaba el mismo nombre. Qué significado podría tener ese nombre, que no fuera el del fastidio, para un escolar de primeras letras? Y así pasaron años. Sólo al llegar a los cursos de geografía, cosmografía, y oír hablar de climatología y oceanografía, de isoterma, y de quien inventó esos términos científicos, y de la "Corriente Humboldt" en las Costas del Pacífico, empecé a familiarizarme con el nombre ilustre. Más tarde aprendí que el uso comercial del guano, especialmente para abono, fue un descubrimiento de Humboldt. En esta forma vine a darme cuenta de por qué aquella aborrecida escuela llevaba el nombre del sabio.

Por casualidad, años después, al tomar un libro de la biblioteca de mi padre, abriéndolo al azar, leí en una de sus páginas:

Así como esto debió ser el Paraíso. Los caimanes asoleándose, tendidos en los bancos de arena. A uno le calculé unos 7 mts. de largo. Por la noche los anfibios llegaban a la orilla, se quedaban durante horas mirando las hogueras que cercaban el campamento. En esas noches la selva palpataba de vida. La quietud rienaba hasta la media noche. De pronto, en el vasto silencio resonó un rugido prolongado que nos espantó el sueño para el resto de la noche. En medio de los innumerables ruidos y de las voces de la fauna salvaje, los indios rumberos reconocieron las del tigre y del jaguar, el gruñido de los zainos, el alarido del perezoso y el carraspeo de los sapos, y otros muchos. Cuando algún felino se atrevió a acercárseles, el perro que ladraba furioso cambió de tono y empezó a aullar quedo y corrió a meterse bajo las hamacas.

Con el interés que este trozo del libro me inculcara ya no quise soltarlo hasta darle fin; y tan embebido estuve que no me preocupé por saber quien era el autor del relato. Lo supe, sólo, al cerrarlo: era el Barón Alexander von Humboldt. Desde ese mismo punto y

hora me dediqué a sus libros de viaje por Sur América, México, Rusia, y en general a todas sus páginas y descripciones de la naturaleza. Y me convertí en un profundo admirador del hombre y de su obra.

Pasados unos años, y con ellos la curiosidad y el entusiasmo juveniles, olvidé completamente a mi personaje. Hasta que vine a Colombia.

Cuando el barco avistó los muelles de la histórica Cartagena de Indias, al punto recordé la descripción que mi sabio conterráneo hizo de su propia llegada a estas tierras:

30 de Marzo de 1801; Domingo de Ramos; llegamos al puerto de Cartagena. Poco antes habíamos corrido dos aventuras peligrosas. Navegando contra el viento habíamos intentado entrar al puerto, pero el mar estaba terriblemente picado. El pequeño barco que nos trajo de Cuba casi no podía resistir el oleaje que lo inclinó de babor; una mole de agua nos cubrió; pero el piloto se mantuvo firme en su puesto. De pronto dijo: —Nos hemos quedado sin timón. Todos creímos llegado el final. Como último recurso cortaron la vela, con lo que la nave quedó a merced de las olas. Una de éstas, enorme, la levantó. Nos salvó una pequeña colina que vino a hacer de barrera contra el viento. Como había eclipse de luna, decidí observarlo. Un bote me llevó a la orilla. Ibamos ya a desembarcar cuando oímos un ruido de cadenas. Armados de grandes cuchillos salieron del rastrojo unos negros gigantes, seguramente escapados de sus barracas; y al vernos sin armas intentaron quitarnos el bote; tuvimos que alejarnos rápidamente de la orilla y esperar el momento de llegar a la costa.

Todo esto lo recordé mientras llegaba a Cartagena en forma completamente diferente.

Humboldt y Bonpland, su compañero, querían ir primeramente a Panamá, y luego al Ecuador, entrando por Guayaquil; pero, por otra parte, el Barón quería encontrarse con el ya ilustre sabio Mutis en Santa Fe; y acabó por no resistir la atracción aventurera de cruzar los Andes.

En aquellos tiempos viajar de Cartagena a Santa Fe era algo muy desigual con las posibilidades de hoy. Y cuando el DC-4 tomó altura y enrumbó a la sabana me di a mirar allá abajo, abismalmente abajo; las selvas, el río, sus caños y pantanos; y volví al recuerdo de Humboldt y de sus aventuras. Los dos famosos naturalistas habían hecho un viaje muy diferente. El pesado cargamento de sus equipos lo despacharon a Quito vía Guayaquil; adquiriendo un "cayuco", se metieron, a lo Jiménez de Quesada, por la desembocadura arriba del Río Grande de la Magdalena, y a palanca y canaleta,

con selva a lado y lado, hicieron centenares de millas para ganar los Andes Orientales. Mientras los bogas hacían su rítmica faena, Humboldt medía las curvas del río; Bonpland en tanto recogía frutas tropicales y coleccionaba plantas. A los cincuenta y cuatro días de viaje arribaron al caserío de Honda. Allí estaba la Cordillera Oriental. Las descripciones de esos lugares sugieren que para Humboldt fueron como un edén del reino vegetal. Más allá cuajaba la selva donde crecía el árbol productor de la cinchona, con cuya savia y corteza los indios preparaban brebajes infalibles contra las fiebres. Fueron estos dos viajeros del Nuevo Mundo los que dieron a conocer de Europa esta maravillosa riqueza suramericana. El 22 de Junio de 1801, tras una corta permanencia en Honda, entró en crescendo la aventura: el viaje a caballo hacía Santa Fe.

El camino se hacía por valles profundos y cornizas roqueñas, tan estrechas, que a veces no dejaban pasar las mulas cargadas. Ganada por fin la altiplanicie, el recibimiento inicial estuvo a cargo de los vientos paramunos. Pero el paisaje que se ofreció a sus ojos fue espléndido: cielos abiertos y sabanas vastas y fértiles, donde menudeaban las poblaciones de los nativos. Santa Fe les hizo un recibimiento de héroes. El Arzobispo les envió su propio carruaje; y tuvieron como séquito lo más noble y luciente de la metrópoli. El ágape del encuentro se sirvió dos milas antes; y una vez en el recinto de la ciudad todas las atenciones fueron pocas para quienes ya habían visitado a Cuba y Venezuela, y atravesado el Orinoco, y acababan de remontar al Magdalena. El sabio Mutis les arregló albergue contiguo a su propia casa. El Padre de la Expedición Botánica, que a la sazón tenía 72 años, hizo con ellos grandísima amistad, y naturalmente los puso al corriente y detalle de la labor científica realizada hasta entonces. Mientras Bonpland se recuperaba de fiebres y de achaques, Mutis y Humboldt dialogaban sobre sus experiencias. Otras veces recorrían los contornos en procura de datos y especímenes botánicos y geológicos.

Mientras con la memoria estuve volando sobre los recuerdos, el vuelo que me traía a Bogotá llegaba a su término fácil y felizmente. Y al darme cuenta de ello sentí sonrojo, un sonrojo que quería ser un tributo. Tanto más cuanto que mis propósitos y afanes al venir a Colombia no eran precisamente los que habían traído a mi egregio compatriota. Pero al menos la magnitud del contraste sirvió para infundirme el anhelo de hacer algo siquiera mínimamente parecido.

Igual que todo extranjero, empecé por asimilar la vida ambiental, para después buscar los motivos de interés, naturales, históricos, artísticos, científicos. Se comienza normalmente con viajes de recreo, a admirar poco a poco las maravillas del mundo tropical; pero en fuerza de la costumbre y una vez aclimatados al medio, se acaba por incurrir en el mismo pecado: pasar mirando sin ver esas maravillas, cercanas o distantes, grandes o imperceptibles.

Hasta que un día se me busca y encarga hacer reproducciones de algunos documentos. Y otra vez la figura central de mi labor es Humboldt, en su nombre y sus autógrafos; la reproducción era de documentos concernientes a su permanencia en Colombia. El ancestral interés y el entusiasmo en torno al insigne viajero

alcanzaron entonces su mayor grado. Realizadas las reproducciones me entregué a la búsqueda de sus libros. Al término de su lectura híceme la reflexión de que los estudiosos de nuestro tiempo, los investigadores de hoy en día actúan con objetivos de especialización y se dedican a una sola y determinada cosa. Por eso hemos perdido el sentido panorámico y la amplia visión de lo humanístico, delimitando y reduciendo los horizontes a dimensiones mínimas. De donde resulta el enorme contraste del sistema actual en la investigación científica con lo que lograba abarcar el desvelado espíritu de aquel gran sabio. En ello radica el fundamento de la universalidad, de la comprensión ecuménica e indivisible que de la naturaleza tuvo aquel insigne hombre.

Dejando en este punto los rasgos someros de su biografía, enumeremos, para magnificarla, lo permanente y trascendental de ella: sus obras, testimonio y monumento de su genio. Por ejemplo: en antropología y arqueología. En estos renglones Humboldt avanzó extraordinariamente en la observación y definición de los pueblos americanos; llegó a la conclusión de que los pueblos aborígenes de América, procedían del Asia; buscó e identificó los rastros arqueológicos de Incas, Mayas y Aztecas; formó colecciones de manuscritos y objetos manufacturados por ellos. Fue el primero en establecer, como geógrafo, la influencia de los factores fisiológicos en el desarrollo de las viejas culturas, despertando con ello en torno suyo resentimientos raciales en quienes lo miraron como personero de pueblos y naciones ignorados aun. En asocio de Laplace estudió y confrontó astronómicamente el enigmático Calendario Azteca, labor que constituyó la piedra sillar para su obra sobre las fuentes de la Astronomía precolombina, incorporada en "El Kosmos", uno de sus mejores libros. Y siempre en sus enfoques sobre el contenido material y espiritual del universo, buscaba ante todo la perspectiva histórica. El consorcio de labores botánicas con Aimé Bonpland dio como resultado la recolección de más de 60.000 plantas, 3.500 de las cuales constituían especímenes desconocidos. Sus investigaciones sobre las variedades de la *hevea* amazónica, lo mismo que sobre la *cinchona*, despertaron e impulsaron el interés industrial y el tráfico de producción. Fundó una sociedad geográfico-botánica para estudiar y divulgar las posibilidades todas de aprovechamiento de los productos naturales. No menos encomiable fue su labor de cartógrafo, concerniente a grandes zonas continentales de Centro y Sur América. Débese a él, finalmente, el primer impulso para el estudio de la climatología.

Todo lo anterior tenía como lógica y suficiente base su versación de geólogo, adquirida desde sus primeros años de estudio. Sus excursiones en los Montes Urales le rindieron como recompensa el encuentro de vetas diamantíferas. Fue de los primeros en escalar el Chimborazo, lo que despertó el interés científico y la curiosidad viajera por las cordilleras andinas. La ictiología le debe un gran estudio sobre la respiración bronquial; la geofísica, las mediciones magnéticas; la meteorología, la formulación de una teoría sobre la composición físico-química del aire. Todo lo que hizo fue de magnitud y trascendencia.

Tras la lectura de cuantas páginas escribió Humboldt en la Nueva Granada, siguiéndolo paso a paso en todos sus itinerarios, por caminos que él dibujó y midió, Co-

lombia se me presentó acrecentada y embellecida y más atrayente que nunca. Cuántas veces había cruzado el Quindío y pasado frente al Tequendama, sin percatarme de las maravillas que al cabo de siglos Humboldt me enseñaba a ver. Oigámosle describir su paso del Quindío:

“El 9 de Septiembre de 1801 salimos de Bogotá rumbo hacia el río Magdalena. Llevábamos víveres para un mes, porque habíamos de recorrer tierras despobladas. Camino de Ibagué, empezamos a subir la Cordillera. Caminábamos bajo arcadas de palmeras cuyos troncos eran como de marfil. Entre la vegetación destellaban, en lindos colores, las orquídeas y las fucsias. En lo alto del páramo del Quindío, a 3.400 mts., nos azotó un tremendo viento frío. El escarpado descenso hacia Cartago fue peor aun que las lluvias permanentes. A cada paso surgían los pantanos cubiertos de guadales en cuyos garfios se nos desgarraba la ropa y no pocas veces la propia carne; hasta llegar a Cartago descalzamos y sangrando porque en ningún momento permitimos que se nos llevara a lomo humano, como sí lo hacían los Inspectores de las minas, convirtiendo a los indios en cabalgaduras. Los cargueros iban casi agobiados, portando su pesada carga y sosteniéndose con bastones”. El respeto a la dignidad del ser humano le impedían a Humboldt dejarse llevar en esta forma.

Por Cartago penetraron al Valle del Cauca y siguieron luego a Popayán donde se quedaron todo el mes de Noviembre. Allí efectuaron el ascenso al volcán del Puracé, donde Humboldt hizo un análisis físico y químico de los vapores.

Para eludir la travesía por el Valle del Patía, semillero de fiebres, donde —al decir de Humboldt— se las coge en una noche pero duran 3 ó 4 meses prefirieron traspasar la Cordillera y llegar por fin a Pasto, al pie del Galeras. He aquí su relato:

Selvas espesas, llenas de pantanos donde se hundían las mulas hasta el vientre; valles profundos y desfiladeros que parecían entradas a una mina, y por todas partes osamentas de animales que murieron extenuados o emparamados. Los Andes están siempre flagelados por lluvias tempestuosas, por nevadas, donde las rachas se mezclan con la evaporación volcánica como para dar la sensación de atravesar recodos del infierno. Humboldt pasó en Pasto la Navidad de 1801, y a comienzos de 1802 enrumbó a Túquerres, llegando cerca del volcán.

Todo esto relatado en largos trazos y duras palabras mal pueden dar la medida inmensa del trabajo, del esfuerzo agotador, de las penalidades tremendas que sin embargo nunca lograron mellar el espíritu de aquel caballero andante de la naturaleza y de la sabiduría. Su fervor por estas cosas no se resignaba como hoy nosotros, a la literatura sobre ellas: bajaba al Salto del Tequendama para dibujar con su propia mano esa maravillosa presea de la tierra colombiana. Dibujó también el Puente natural de Icononzo; paso a paso, en la literalidad de la expresión, atravesó el Quindío; contempló la cascada del río Vinagre; holló las nieves del Puracé, delineando hábilmente sus contornos, sus escarpas. Y lo mismo hizo con la vestimenta indígena, con toda clase de plantas y especímenes botánicos y zoológicos.

Los mayores índices de su labor científica puede enumerarse así:

Florae Friberjensis (1793);

Experimentos del efecto galvánico sobre las fibras de los músculos y nervios (1797);

Experiences sur les moyens cudiometriques et sur la proportion des principes constituants de l'atmosphère. Humboldt et Gay Lussae (1805);

Voyage aux régions équinoxiales du Nouveau Continent fait en 1799, 1801, 1803 et 1804 por Alexander de Humboldt et Aimé Bonplan (1807);

Estudio sobre la situación general del Reino de Nueva España (1809-14);

Descripción de las Cordilleras y monumentos de los pueblos americanos (1810);

Las isothermas y la distribución del calor sobre la tierra (1817);

Sobre la formación de los volcanes en las diferentes partes del mundo (1823);

Estudio sobre la situación política de la isla de Cuba (1826);

Fragmentos sobre la Geología y la Climatología del Asia (1831);

Asia Central (1843);

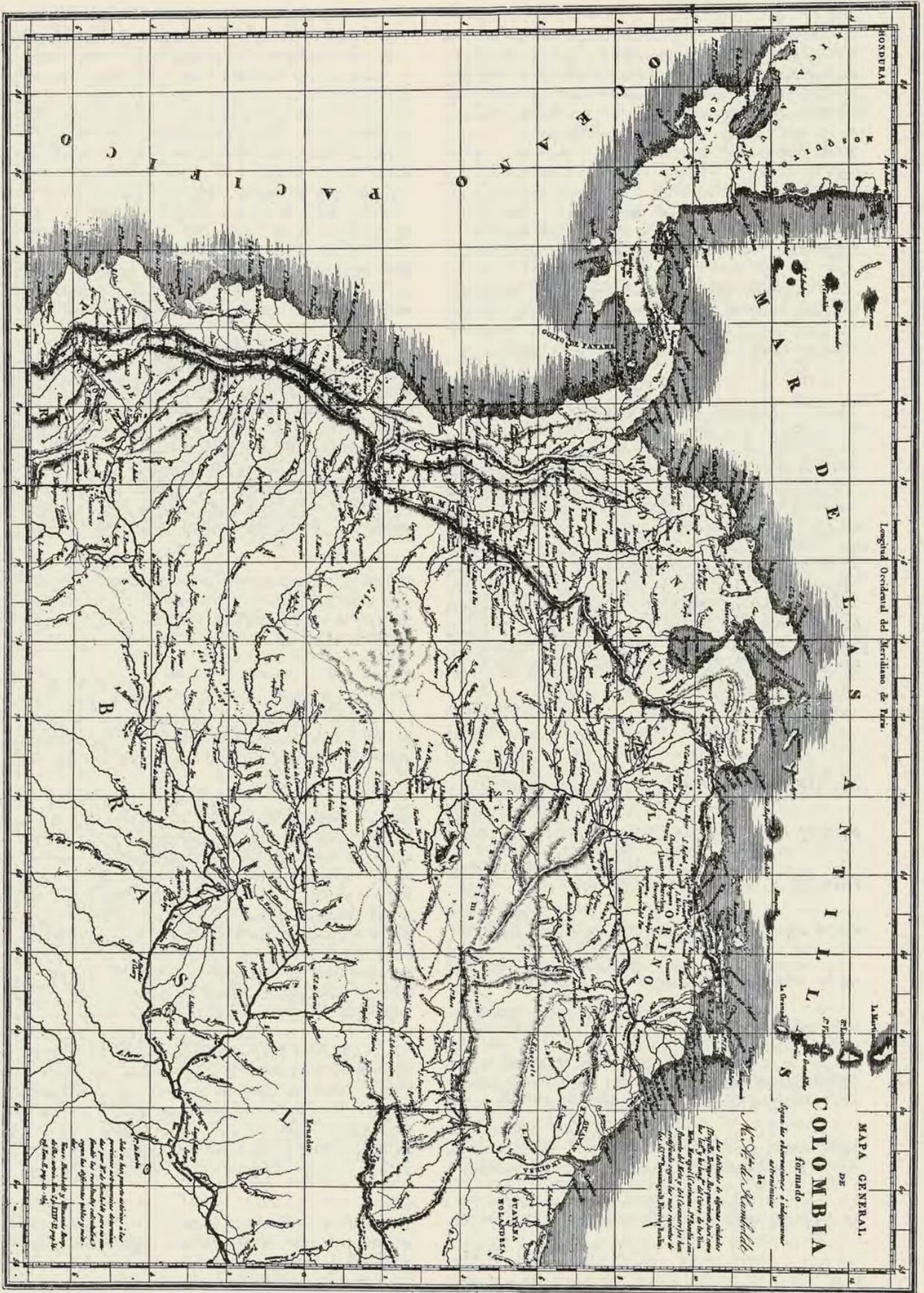
Kosmos (1845).

Humboldt nació en Berlín en 1769; su familia era de alcurnia, contaba en los altos círculos de la Corte Imperial. Con maestros privados hizo sus primeros años de estudio; desde ellos evidenció un gran amor por la naturaleza, que fue el gran destino de su vida. Pasó luego a la Universidad; cursó en la Academia de Friburgo y ejerció el cargo de Asesor de minas. En 1799 visitó a España, punto obligado de embarque para Sur América, en un viaje científico de 5 años y al costo del cual dedicó gran suma de sus bienes. Al regresar, la cosecha científica dio para publicaciones que le reembolsaron y compensaron ampliamente aquellos gastos. Largos años vivió y trabajó en París bajo el imperio de Bonaparte. Volvió a Berlín donde Federico Guillermo III lo llamó a su servicio.

La segunda salida de Humboldt fue a Rusia en cuyas fronteras con China descubrió los diamantes del Ural. Tornó a Berlín, a la sazón bajo el reinado de Federico Guillermo IV. En Mayo de 1859 dejó de existir.

El nombre de Humboldt pertenece no solamente a los ámbitos alemanes de la ciencia, sino a la universalidad, como el de ninguna otra eminencia de su raza. En Europa, en el Asia, en América, a modo de gigantes consagraciones de su nombre, lo llevan un sinnúmero de sitios: la Corriente de Humboldt, en el Pacífico suramericano; el Glacial de Humboldt, en Groenlandia; la Cadena de Humboldt, en la orografía de China; el Lago salino de Humboldt, en Nevada, Estados Unidos; el Parque Nacional de Humboldt, en California. Honor y loor a su memoria al cumplirse la primera centuria de su muerte.

Reproducción facsimil del Mapa de Colombia, formado según las observaciones e indagaciones astronómicas de Humboldt, y que sirvió para ilustrar el Tomo Tercero del Viaje a las Regiones Equinoxiales del Nuevo Continente (París-1826).



HUMBOLDT Y NOSOTROS

ERNESTO GUHL

Miembro de la Academia

No he podido saber por qué se me hizo el honor de hablar ante ustedes esta noche sobre Humboldt. Si es porque soy paisano de él, se trata pues de una mera coincidencia, que por sí sola no justifica mi presencia aquí.

Pero si es porque lo admiro como hombre y científico, veo una razón para dirigirles la palabra, aunque creo que hay personas mucho más autorizadas para esto que yo.

Y aun es más: durante las últimas semanas hemos oído hablar tanto de Humboldt que realmente me queda difícil decirles algo nuevo, excepto, quizá, referirme a los trabajos de Humboldt en Colombia, aunque no tuve, desafortunadamente, el tiempo necesario para esto.

Sin embargo, esta abundancia de ensayos sobre Humboldt que se han dado a conocer en estos días, me han orientado para el enfoque de mis palabras.

Tanto se ha dicho y tan diversamente se ha pintado a Humboldt, que uno se queda asombrado, si da crédito a todos estos ensayos, de la variedad y de lo cambiante de su carácter; hasta se tiene la impresión de que se trata de diferentes personas con el mismo nombre, y hasta de la creación de un personaje idealizado a propósito para poder hacer un discurso adecuado sobre él.

Un filósofo de la época, sagaz observador, burlón y sarcástico como el mismo Humboldt, formado por la época del iluminismo francés y de la especulativa filosofía alemana del siglo XIX, habló una vez como de un invento nuevo de su tiempo, del hecho de que muchas personas eran capaces de discutir y hablar sobre libros sin haberlos leído. Este invento al cual se refiere Lichtenberg, es un mal que desde entonces se ha agravao bastante.

Pero su cura tampoco se obtiene con la mera lectura, lo que analiza el mismo filósofo en forma tan drástica que no quiero citarla en esta ocasión, sino más bien interpretarla con unas palabras de Goethe, quien también se refiere a este mal hablado *"de lo difícil que es leer y de la presunción de mucha gente que quiere leer sin los conocimientos indispensables y la preparación adecuada, todas las obras filosóficas y científicas como si se tratara de simples novelas. Ellas no saben cuánto tiempo y trabajo cuesta aprender a leer. Yo he necesitado —dice Goethe— para esto 80 años, y todavía no puedo decir que he alcanzado la meta"*.

Fue así, observando tanta semejanza en ciertos aspectos de la vida de la época de Humboldt y de la nuestra, que resolví enfocar esta hora memorable de reflexión bajo el aspecto de Humboldt y nosotros.

Cronológicamente un siglo es muy poco en la cadena de sucesiones de las 300.000 o más generaciones del gé-

nero humano, y durante una muy larga época de este período el hombre ha tenido menos influencia de modificación sobre las fuerzas no orgánicas de este planeta, que ciertas asociaciones vegetales.

Es decir: han existido en la historia del hombre, y existen todavía, períodos durante los cuales no había ni pueblos, ni estados, ni filosofía. La relación con su medio geográfico era semejante a la de otros seres vivientes de cierto desarrollo y tamaño.

Y todavía en el siglo pasado, el hombre de la época de Humboldt era menos distante en su evolución técnica del Cro-Magnon y filosóficamente de Platón, de los que nos separa, como consecuencia del desarrollo de la ciencia, a nosotros de Humboldt. En cuanto al aspecto tecnológico, y en el campo filosófico, dónde estamos con respecto a Humboldt y a dónde vamos en relación comparativa con la época de este sabio?

El centenario de la desaparición de un pensador debe ser el momento de reflexión para un análisis de nuestro mundo actual; debe ser, como dice la Academia de Ciencia de los Estados Unidos, una mira, más hacia el futuro que hacia el pasado, para examinar el estado actual de nuestros conocimientos en aquellas materias en las cuales Humboldt era un adalid excepcional. Además, tenemos que hacer un examen crítico para saber en cuánto se aprovechó y cómo se perfeccionó el pensamiento de Humboldt. O de lo contrario, hemos perdido el tiempo, no obstante el distanciamiento técnico y científico? Pero no es el caso de aprovechar esta fecha memorable para organizar reuniones sociales y otros actos al estilo, que no hacen sino comprobar que ciertos círculos culturales en muchos países, y no obstante su desarrollo técnico, todavía son subdesarrollados intelectualmente.

El mismo Humboldt critica esta situación cuando habla *del saber superficial y dogmático que reina en ciertos círculos del llamado alto mundo social*.

La ciencia ha cambiado las condiciones de vida del hombre. Ha cambiado las condiciones materiales, modificado la estructura de las agrupaciones humanas y ha intervenido en la vida del individuo. La tecnificación ha acelerado el desarrollo de la ciencia, ha creado bases para nuevas investigaciones, especialmente en el campo de las ciencias naturales, y ha dado origen a modificaciones materiales revolucionarias. Los trabajos técnicos de Humboldt quedaron atrás, son anticuados, sin valor real en la actualidad.

No sería del todo exacto, conmemorar y ver la importancia principal de Humboldt en sus trabajos de geodesta, botánico, arqueólogo, etc., ya que él nunca se especializó de tal manera en estas disciplinas, que justificara ahora, después de más de 100 años, su conmemoración por esas causas.

Es cierto, Humboldt fue un experto en las ciencias físicas y matemáticas, pero además era economista y político. Era el primer planificador en América. Un enciclopedista que supo analizar y sintetizar un maravilloso tejido de combinaciones para el bien del hombre.

Digo esto para los economistas jóvenes como ejemplo y guía, y no solamente para ellos sino también para aquellas instituciones internacionales que fueron creadas para aliviar la dura suerte de muchos seres humanos por medio de sus expertos técnicos, y que resultaron, en muchos casos, inferiores —si no contraproducentes— a sus misiones. Se ha dado una nueva palabra denominada “subdesarrollo”, al viejo concepto de imperialismo y explotación económica, para actualizarlo y obtener un mayor rendimiento. El problema principal no es la investigación y experimentación técnica agrícola por expertos internacionales, no obstante ser necesarios, sino como enseñar e incorporar los resultados de la ciencia y técnica experimentadas, con éxito en otras partes del mundo, al patrimonio cultural de los habitantes de estas comarcas. Es decir, el error grave que se comete muy frecuentemente es el hecho de que se considera la famosa ayuda técnica como la aplicación de unas fórmulas, sin pensar que en verdad se trata del traspaso de conocimiento de una cultura a otra, o sea, de un proceso de aculturación. Pero muchas veces no son capaces de comprender esto los famosos expertos internacionales, que según un célebre sacerdote “pasan sin penetrarse con los pueblos, a veces altivos y distantes, extranjeros bien pagados, profundizando sus conocimientos técnicos, ampliando su cultura, listos para encontrar puestos ventajosos en las universidades, en la política, en los negocios”.

Cuán diferente fué Humboldt! Los pueblos de la América Tropical lo aclamaron. En una carta que él recibió del Ministro de Relaciones Exteriores de México, leemos frases como estas: “...La nación toda agradece a usted sus trabajos, que han mostrado al mundo el futuro de nuestro desarrollo”; y más adelante: “...*nosotros seríamos felices si pudiéramos contar entre los ciudadanos de nuestra república con un hombre tan importante que se admira con toda razón en el mundo culto*”. Estos son sentimientos y palabras del mismo México que luego luchó contra la invasión extranjera y fusiló a su representante reaccionario. Los pueblos siempre han sabido en todos los tiempos escoger sus ídolos y también librarse de sus tiranos.

Creemos que la importancia de Humboldt consiste en ser uno de los pensadores máximos de su tiempo, que marcó un renacimiento de las ciencias naturales, especialmente de la geografía, que empieza a fines del siglo XVIII.

El problema del intercambio de materia y energía en la litosfera, hidrosfera y atmósfera, y su importancia para la geografía física en general, que se basa en esta interrelación que forma una de las características más propias y específicas del medio geográfico en todos los campos de la naturaleza y en cada etapa de su desarrollo, fue reconocido y estudiado por Humboldt. Tuvo él la rara capacidad de la visión del conjunto. Nunca analizó desde el limitado horizonte de un técnico especializado —como llaman en el lenguaje moderno a los investigadores— el complejo conjunto de la naturaleza,

sino siempre trató de comprenderla e interpretarla como una unidad. “*Cuán cansón y estéril sería el estudio de la superficie terrestre y sus variedades, si no se enfocara de un punto de vista universal*”, dice el mismo Humboldt. El conjunto del espacio en el cual nada lo impresionó tanto “*como aquel hecho de que éste se llena tan abundantemente con vida*”.

Hace 90 años, cuando se conmemoró el primer centenario del natalicio de Humboldt, se resolvió escribir la primera biografía científica del sabio, que luego fue elaborada por nueve científicos especialistas, cada uno en una materia, que Humboldt trató en su tiempo como un conjunto. Poco afortunada fue esta iniciativa porque carecía del lazo espiritual que usó Humboldt para unir los aspectos especiales en un sentido universal.

Fue Hermann Grimm quien criticó muy sabiamente este ensayo, defendiendo a Humboldt y su obra, cuando dijo: “*Ahora nos presentan a Humboldt como un personaje compuesto de varios científicos, que despertó más curiosidad que veneración. Los trabajos resultaron anticuados en sus diferentes aspectos que fueron desarrollados por sus sucesores, quienes se elevaron por encima de él como especialistas modernos mientras descuidaban lo humano, que era para Humboldt la última meta de la ciencia, y que ellos no lo consideraban suficientemente importante dentro de la investigación exacta. Igual a Goethe, quien también solamente era comprendido en su universalismo mientras vivía, ahora Humboldt era presentado casi como un gran diletante, al cual se debía perdonar tanto como admirar*”.

No, no repitamos el error, y más bien aprendamos de él. Hoy más que nunca necesitamos formar dirigentes dotados de elevada conciencia social y profunda preparación universitaria —no solamente preparación profesional especializada— capaces de correlacionar y aprovechar las distintas ramas del saber en bien de la comunidad, en el espíritu humboldtiano.

Esta interrelación de las ciencias es uno de los resultados de sus investigaciones prácticas sobre el terreno del geógrafo, puesto “*que ve en el espacio más pequeño, como consecuencia de una profunda observación, los más variados resultados de ésta, concentrados y expresados en importantes datos numéricos, y luego su meditada comparación entre sí*”. Basado este pensamiento filosóficamente sobre la Teoría del Conocimiento de Kant. “*Para que se pueda realizar lo que la lógica e inteligencia indican que se debe poner en práctica, es necesario conocer la naturaleza del sujeto, sin la cual es imposible realizar lo primero*”. Se basa pues, este pensamiento, que además se caracteriza por una consecuente exclusión de problemas religiosos y metafísicos en sus obras, no obstante su profundo respeto por ellas, en la convicción de que “*la naturaleza no se debe estudiar según objeto o fines, sino según sus causalidades, como fenómenos, para conocerla como un conjunto, y todas las observaciones y conclusiones ganan en importancia y comparabilidad, en la medida como se logre expresarlas en fórmulas matemáticas*”. (Plewe). Es decir, causalidad en el sentido de la física, que no coincide con el concepto general sobre este fenómeno, y hoy en la geografía humana basada en el pensamiento humboldtiano, hablamos de que se debe reemplazar el causalismo por el funcionalismo y los factores culturales

aparentemente determinados por el dinamismo histórico y social.

Esta “*idea de una física de la tierra*” como Humboldt la llama y la interpreta en sus famosas conferencias sobre geografía física en Berlín, que fueron las primeras conferencias de carácter popular sobre ciencias naturales empíricas en Alemania, iniciando así una nueva era cultural, constituyen las bases de su obra cumbre “*El Cosmos*”, en la que ve la naturaleza como un sistema ordenado según determinadas reglas. “*La naturaleza es para la observación reflexiva una unidad dentro de lo complejo; unión de lo diferente en forma y combinación; expresión de las cosas y de la fuerza de la naturaleza como unidad vital. El resultado más importante de la investigación física del pensador es, por lo mismo, reconocer esta unidad en la complejidad, abarcar, desde lo individual, el todo que nos ofrecen los descubrimientos de los últimos tiempos; separar los detalles críticamente, sin ser víctima de su masa; con conciencia del alto destino del hombre, comprender el espíritu de la naturaleza que está cubierta por el manto de los fenómenos*”.

Como en toda la ciencia, así también en la geografía la primera condición es la exacta localización y descripción de los hechos. Tan claro y sencillo como parece esto, resultó apenas después de una larga lucha. Durante largo tiempo, y todavía hoy en muchas partes, la geografía se contenta con una descripción general, una generalización que encierra los naturales peligros de una simplificación que puede resultar hasta falsa. El desarrollo y la perfección de los métodos de investigación espacial son, pues, condición indispensable para obtener un concepto geográfico, o sea integral, de un espacio. Es necesario analizar ciertos aspectos y fenómenos por separado, pero estos no se deben emancipar del conjunto. Tan necesaria como es la especialización, así es de peligrosa la mera colección y coordinación de los resultados de la ciencia, a la cual se dedican muchos institutos exclusivamente con fines económicos o políticos, perdiendo el punto de vista del conjunto, o sea su destino científico final a favor del hombre, tal como lo vio Humboldt: como la coronación de toda la investigación científica. Consiste pues, la mayor importancia de Humboldt —además de haber sido también un excepcional detallista, explorador e infatigable trabajador, porque también en la categoría de hombres como Humboldt, el genio no existe sin trabajo— en su capacidad de comprender y presentar el conjunto, y así lo comprendió y apreció su época y también nosotros. Confirma lo anterior la crítica que se hizo en su tiempo a su obra sobre “Asia Central” que —según ella— no era nada extraordinario, porque sólo relató nuevos hechos, también nuevos errores, pero no dio una nueva orientación. Es decir, era el informe de una exploración, pero nada más; no era comparable, no obstante su valor, con la obra sobre sus viajes equinociales al Nuevo Mundo. Fue el mismo Humboldt quien previó la evolución del pensamiento y de la ciencia cuando dijo: “*En cada siglo dirigen una nueva orientación las ideas de los pensadores. Esto en parte debido a la acción conjunta de las diferentes ramas de las ciencias naturales, que están entre sí en condiciones de favorecerse mutuamente, a través del arte de coleccionar la mayor cantidad de hechos que luego, después de ordenados, se conviertan, a través del camino de la inducción, en ideas generales. Así es*

posible despertar un interés que se niega —quizá sin razón— en el mismo grado, a los estudios especiales”.

Humboldt estaba convencido de que en la vida de los pueblos la casualidad no tiene importancia. “*En cada época de la vida de ellos se reconoce que aquello que está relacionado con el progreso, la razón y el perfeccionamiento de la inteligencia, tiene hondas raíces en los siglos anteriores*”. Si Humboldt opinaba así, se comprende que en el campo político era un liberal de su época. Los contemporáneos decían de él: “*lleva la llave dorada del Chambelán colgada de la cintura, pero en el corazón las ideas de 1789*”. Humboldt era de un modo de ser subjetivo-clásico, formado por el espíritu alemán clásico en combinación con el pensamiento lógico-racional de las ciencias naturales del siglo 18 que tuvo su origen y desarrollo en Francia.

Las ideas de la revolución francesa, resultado de la época del iluminismo y su lucha contra las instituciones políticas y de la metafísica de entonces, quizá la más grande contribución de Francia al desarrollo de la humanidad, eran base del pensamiento político y social de Humboldt a través de toda su vida. Sus ideas políticas tienen sus raíces precisamente en estos años de la revolución francesa —su juventud— y fueron consolidadas luego por su concepción del mundo, basado en las ciencias naturales, según las cuales la naturaleza se encuentra en una constante evolución. La creciente influencia de la reacción, después de 1848, que llegó hasta controlar su correspondencia, amargó duramente los últimos años de su vida.

No era pues tampoco mera coincidencia que su compañero de viaje al Nuevo Mundo, Bonpland, fuera francés, ni que él mismo hubiera vivido en París y escrito su obra fundamental en francés y que en la primera obra publicada aparecieran los dos como autores. Además, Humboldt estaba convencido de que la política no se podía ni debía excluir de la vida. Es más, todo en la vida es política, desde el modo de pensar hasta la acción, y negarla es sencillamente optar por una actitud reaccionaria.

Sin embargo, Humboldt no era un político revolucionario. No pudo serlo por su posición social y formación. Era un liberal de su época, tal como lo describe Goethe refiriéndose a Dumont, cuando dice: “*El es un liberal moderado, como son y deberían ser todas las gentes razonables, y como yo mismo lo soy, y en cuyo sentido me he esforzado por obrar a través de una larga vida. El verdadero liberal busca con todos los medios a su alcance, hacer tanta cosa buena como le es posible, pero se cuida de erradicar con sangre y fuego las deficiencias, muchas veces inevitables. Se esfuerza por medio de una acción inteligente por combatir las deficiencias públicas poco a poco, evitando así el destruir, debido al empleo de medidas fuertes, igual cantidad de cosas buenas existentes. El se contenta en este mundo incompleto con lo bueno existente hasta cuando el tiempo y las circunstancias le permiten alcanzar algo mejor*”.

Maravilloso este liberalismo de una clase privilegiada del siglo pasado. Pero comparando las dos épocas observamos hoy que el mundo entero se encuentra bajo una crisis. La dinámica de la evolución nos lleva con fuerza y velocidad tan singular que al parecer pelagra

el control y la dirección sobre ella. Las fuerzas del equilibrio de antes se encuentran en un antagonismo como consecuencia de la alteración de las estructuras económicas y de los valores éticos y morales en relación con el desarrollo técnico y científico.

Hay menos libertad y más caos. Menos espontaneidad individual. No hay coordinación estructurada en un mayor volumen de masa humana sin rumbo ni directivas propias todavía, pero la pide. El tiempo nuestro necesita científicos que sepan obrar como conductores de estas masas.

Y hoy en este siglo que nos distancia de la época de Humboldt, y singularmente en su segunda parte, hemos sufrido —más que gozado— los adelantos casi miedosos de la técnica, como consecuencia de nuevos conocimientos. Sobre todo, en el campo de las ciencias naturales que han puesto en duda, para muchos hombres, las bases de nuestro pensamiento científico, resultado acumulativo de nuestra cultura y tradición. Los resultados técnicos de la ciencia moderna hacen dudar al hombre de su concepción sobre él mismo y el mundo. Se pregunta especulativamente —todavía con toda la cautela— si existen relaciones entre las verdades que descubre la ciencia, como por ejemplo, en el campo de la física nuclear y de la bioquímica, y los conceptos tradicionales, o también subjetivos, del hombre sobre la vida y la razón de su existencia.

Los cambios durante esta centuria han sido gigantescos y han abarcado la totalidad de los fenómenos de la vida de casi todas las sociedades humanas. Han creado una época de dudas y de falta de orientación intelectual, que afecta en un grado mucho mayor a las masas que a los hombres de ciencia.

La existencia de estas masas y su participación definitiva en todos los campos de la convivencia humana, es la característica de nuestro siglo. Psicología, antropología, política, economía e historia, en fin, todas las disciplinas que se ocupan del hombre como individuo y miembro de una sociedad, forzosamente tienen que investigar las causas que llevaron hacia la formación de esta masa anónima, irresponsable y guiada por instinto y sentimiento (Grassi). Pero también esta masa evoluciona y pide instrucción; pero ni las universidades pueden recibirla, ni su enseñanza es la indicada. Sin embar-

go, el futuro del hombre depende de esta masa y de la cultura que va a recibir. Es tan importante una instrucción, por ejemplo, sobre la energía nuclear, como la producción de ella, para evitar una aplicación catastrófica. Solo esta masa instruída puede evitar un uso indebido, y la ciencia es para ella. Aun cuando parece paradójico, el futuro del mundo depende de estas masas —aunque considerándolas como un conjunto de seres humanos— y si las circunstancias exigen una modificación en el *modus vivendi*, hay que buscarla. Esto también es un objetivo de la ciencia y quizá el más importante en la actualidad.

Sería interesante hacer una comparación crítica, bajo el lema, como dice Robert Oppenheimer “qué es lo que vemos, si miramos al mundo de ayer, y luego lo comparamos con el de hoy?”. Creo que tenemos poca razón de festejar una fecha memorable como la de la muerte de Humboldt, cuando nos damos cuenta de que la ciencia ha avanzado prodigiosamente en sus aspectos técnicos, pero ha descuidado sus obligaciones éticas y humanas. Aun es más: la ciencia ha puesto el dominio de la energía atómica en manos de aquellos que la convierten en una amenaza para la humanidad y no saben honrar, como dice Gerlach, esta maravilla de la naturaleza, que es una ofrenda del Creador al hombre. La ciencia tiene la obligación de evitar este peligro y no debe ponerse fatalmente al servicio de aquellos que no comprenden la magnitud de las proporciones científicas y filosóficas de nuestra generación, quizá la más grande que ha tocado al hombre hasta ahora. La ciencia es universal, no está sujeta a fronteras ni formas de gobierno, ni siquiera a culturas determinadas; sencillamente, su campo de acción es la *humanitas*, como dice Oppenheimer, y no puede ni debe ser un secreto militar. El físico Gerlach observa que “*es la primera vez en la historia de las ciencias naturales que la investigación básica, el estudio del problema hasta hoy más grande de nuestro mundo, es “Top Secret”. “Imaginémonos —dice él— el “Mysterium cosmographicum” de Keppler como secreto militar, y así comprendemos el caótico estado intelectual y de la ciencia de nuestro tiempo*”, y a la vez los frecuentes conflictos que se presentan entre los científicos y los políticos. Es cierto que la ciencia empieza a reaccionar; el memorando de Franck en los Estados Unidos y otro semejante en Alemania y en otras partes del mundo, elaborados por los más grandes científicos, son hitos de una nueva orientación filosófica del mundo, de la cual fue Humboldt uno de los grandes precursores.

HUMBOLDT Y MUTIS

GUILLERMO HERNANDEZ DE ALBA

Expresidente de la Academia Colombiana de Historia,
Correspondiente de la Real Academia de Historia de Madrid
y de otras instituciones nacionales y extranjeras.

Los cinco años empleados por el Barón Alejandro de Humboldt en sus exploraciones de los dominios españoles de Ultramar, en compañía de su *alter ego* meritisísimo Aimé Bonpland, constituyen, como lo expresó uno de sus biógrafos, "La empresa más grandiosa de un particular alemán y un sacrificio hecho únicamente en interés de las ciencias".

Viajero infatigable y entusiasta hasta la emoción poética cuando sus pasos lo condujeron por florestas, bosques, ríos y montañas de nadie conocidos. Los problemas que la física, la geografía, la geología, la botánica y la astronomía le planteaban en el mundo tropical, fueron la base de sus grandes concepciones científicas, a las que dedicó el resto de su dilatada y feliz existencia. Conoció toda suerte de privaciones, sometió a pruebas increíbles su natural robustez, cortejó la muerte con la osadía de su juventud; recogió ingentes tesoros de la naturaleza americana y, en todas partes, dejó huella inolvidable de su desinterés, su generosidad y su sabiduría.

El perfecto equilibrio anímico que lo distinguió, la alegría ingénita de su carácter, su amor a toda belleza, su sentimiento de artista verdadero le convirtieron en el centro de una sociedad que al amanecer del siglo XIX, tenía el encanto de la doncella pudorosa. Su genio científico jamás sacrificó la propia calidad humana de quien ostentaba aristocrático título, menos por herencia familiar cuanto por su natural manera de exquisita cortejanía.

Quienes una vez le conocieron u oyeron hablar de las cualidades que lo adornaban, nunca lo olvidaron, menos aún en nuestra América donde el nombre de Humboldt lo proclama para siempre la corriente antártica, como él viajero infatigable y como él portadora de dones que va regando en su camino.

Buscador de tesoros científicos al descubrir en Cartagena de Indias la existencia en Santa Fe de Bogotá de don José Celestino Mutis, no dudó un momento en cambiar su itinerario y confiar su destino al lento capricho del río grande de la Magdalena y a la fatiga agobiadora de la cordillera andina. Dejaba el descansado pasaje del Istmo de Panamá, pero ese cambio de dirección, adoptado con felicidad, fuera de conducirlo a la amistad inapreciable de Mutis le brindó la ocasión, según sus palabras, "de trazar el mapa del río Magdalena, de determinar astronómicamente la posición de ochenta puntos situados en el interior de las tierras entre Cartagena y Popayán, los cursos superiores del Amazonas y Lima, de reconocer el error de la longitud de Quito, de recoger varios millares de plantas nuevas y de observar sobre una vasta escala las conexiones que ofrecen las rocas de pórfido sienítico y de aracito con el fuego de los volcanes... Hasta esta época ningún

viajero había emprendido describir la Nueva Granada, y el público, excepto España, no conocía la navegación del Magdalena sino por algunas líneas trazadas por Bouguer"¹.

En la ciudad murada neogranadina a la que lo condujo su búsqueda del Istmo para proseguir su viaje, con el fin de incorporarse a la expedición marítima del capitán Baudin, en la que se habían alistado los dos exploradores, tuvo la fortuna de encontrarse con el geógrafo y marino español Fidalgo, el ingeniero militar Esquiaqui, el mejicano Ignacio Caveró y, lo más valioso para los viajeros, hacerse a la amistad indeficiente de un gran prócer, protector de las ciencias, acaudalado en bienes y más rico aún en cualidades ciudadanas e intelectuales; estudioso por demás, promotor de variadas iniciativas para estímulo del desarrollo del Nuevo Reino de Granada; con relaciones sociales, científicas y comerciales en casi toda Hispanoamérica, que fueron puestas por don José Ignacio de Pombo al servicio de Humboldt y Bonpland, acreedores a la generosa hospitalidad de que fueron objeto y pudieron ufanarse durante su estancia en las Américas.

Un pasaporte real expedido en Aranjuez el 7 de mayo de 1799, que era algo más que uno de tantos documentos usuales, abrió con liberalidad a los ilustres exploradores el secreto mundo ultramarino español. Era un mandato de S. M. Carlos IV a sus representantes, de ayudar y permitir al Consejero Superior de Minas de S. M. el rey de Prusia, "el hacer en todas las referidas posesiones las observaciones y experimentos que juzgue útiles como también el coleccionar libremente plantas, animales, semillas y minerales, medir la altura de los montes, examinar la naturaleza de estos y hacer las observaciones astronómicas... y dar al expresado don Federico y a su Ayudante todo el favor, auxilio y protección que necesitasen"². Mas, en la culta sociedad criolla valía más que todo la prestancia intelectual de entrambos jóvenes, la respetabilidad de los conocimientos acumulados a tan temprana edad, que les hizo acreedores, desde el primer momento, al tratamiento de sabios.

Don José Ignacio de Pombo les brindó gustosísimo su casa de campo de Turbaco en cuyos alrededores la flora tropical ostentaba su grandeza. Jamás se borrarían de la memoria del prusiano aquellos días de apacible laborar: "La permanencia que hicimos en Turbaco, dice años después al escribir su relato, fue de las más agradables y de las más útiles para nuestras colecciones botánicas. Aún hoy, después de un largo intervalo de tiempo, re-

¹ Biblioteca de Historia Nacional, vol. XXXIX. E. Posada. Apostillas, 1926, Bogotá, Imprenta Nacional, página 323.

² Ernesto Restrepo Tirado. De Gonzalo Ximénez de Quesada a Don Pablo Morillo. Documentos inéditos sobre la Historia de la Nueva Granada, Imprenta Le Moil & Pascaly, París, 1928, p.p. 120 a 123.

gresando de las orillas del Obi y de los confines de la Dzungaria china, estas florestas de bambúes, esta salvaje abundancia del suelo, estas orquídeas tapizando los viejos troncos de icotea y de higuera de la India, este aspecto majestuoso de montañas nevadas; esta brisa ligera cubriendo a la salida del sol el fondo de los valles; estos boscajes de árboles gigantes que se lanzan como islotas de verdura por encima de un mar de vapores, se representan sin cesar a mi imaginación. Nuestra vida en Turbaco era sencilla y laboriosa: jóvenes, unidos en gustos y caracteres, siempre llenos de esperanzas en el porvenir, en vísperas de un viaje que debía conducirnos a las más altas cimas de los Andes, a la vista de volcanes inflamados, en un país perpetuamente agitado por temblores de tierra, nos sentíamos más felices que en ninguna otra época de nuestra lejana expedición. Los años que se han deslizado después, no todos exentos de amarguras y de penas, han aumentado los encantos de esas impresiones, y gozo en creer que, del fondo de su destierro, en el hemisferio austral, en las soledades del Paraguay, mi desgraciado amigo el señor Bonpland recordará aún muchas veces con delicia nuestras herborizaciones de Turbaco, de la pequeña fuente de Torrecilla, de la primera vista de una *Gustavia* en flor o de la *Cavanillesia* cargada de frutas de castilla membranosas y diáfanas”.

De aquí, de tan inolvidables lugares prosiguieron su camino por el Canal del Dique hasta encontrar el turbulento Magdalena cuyas aguas caprichosas les conducirían a la Villa de Honda desde donde emprenderían el difícil camino de herradura de Río seco, hasta dejarlos en el altiplano. Allí, en Santafé de Bogotá, la metrópoli neogranadina, les esperaba impaciente el gran naturalista don José Celestino Mutis, que desde el mismo momento en que tuvo noticias de su presencia en el virreinato, conoció los grandes títulos que los ilustraban, tan acertadamente calificados por el señor de Pombo, convertido desde entonces en nuncio de los dos célebres viajeros a lo largo de su itinerario de Santafé de Bogotá, Popayán, Quito, Lima, Guayaquil, México y La Habana, hasta donde llegaban las valiosas relaciones del Prócer.

La carta a Mutis dice así:

“Cartagena, abril 20 de 1801

Mi estimado dueño, amigo y señor:

Hoy habrá partido de Turbaco, donde ha estado en mi palacio de paja, el señor Barón de Humboldt, caballero prusiano, M. Bonpland, su compañero de viaje, y M. de Rieux, que sigue con ellos hasta ésa. He dado al primero para usted una carta de recomendación, tan expresiva cuanto lo permite el favor que usted me dispensa, y mis deseos de complacer y servir a dicho Barón, que es seguramente de un mérito singular. Viaja con recomendaciones de su Corte y de la nuestra; ha estado en Río Negro, hasta los Llanos de Casanare; y desde allí vino a La Habana, de donde se dirigió a ésta, y hace un viaje por tierra hasta Guayaquil, donde piensa embarcarse en una de las dos corbetas francesas que a las órdenes del célebre Mr. Baudin, salieron de Francia en septiembre último a dar vuelta al mundo, y deben tocar en Chile, el Callao y Guayaquil. El citado Barón es de una casa ilustre y rica de Prusia: tiene muchos conocimientos en las ciencias naturales y exactas, y es

conocido en Europa por sus observaciones y descubrimientos sobre el galvanismo, o fluido nervioso, muy diferente de la electricidad, y de fenómenos tan raros como éste, sobre que ha publicado dos tomos. Tiene la más alta y justa idea del mérito de usted, que me ha dicho es más conocido entre los extraños que en España, y uno de sus principales objetos de hacer su viaje a ésa es por conocer a usted. Lleva muchos y buenos instrumentos, aunque aquí me ha dejado una parte de ellos para que se los remita a Guayaquil. Ha comparado con éste don Joaquín Fidalgo, Comandante de la expedición de los Llanos, sus observaciones astronómicas, y las ha hallado muy exactas y conformes, lo que hace honor a entrambos. Le he dado la Quinología de usted, que sólo había visto en extracto, y la ha apreciado mucho, lo mismo que el compañero M. Bonpland, que es un buen botánico y muy apreciable. Este es suizo y acompaña al Barón en sus viajes. Darán a usted noticias de toda Europa y de España, que le serán útiles y agradables, como que el primero particularmente ha viajado a pie desde Italia a Dinamarca, y que entrambos son infatigables y diligentes observadores. Los recomiendo particularmente a Popayán donde encontrarán un país virgen y acaso el más rico de este reino en producciones naturales, raras y extraordinarias. La quina, el palo de sándalo que nos traen de Prusia y nos venden a precio de oro, se encuentra allí a cada paso. El corpirache, árbol tan singular como el manzanillo en sus efectos, aunque diversos; el volcán de Puracé que sólo arroja cenizas y azufre puro; las termas de su falda; el río Vinagre; y el cerro de la Tetilla, que es un conductor que ha formado la Naturaleza, son prodigios que no se encuentran en otras partes. Volviendo a nuestros viajeros, tanto por sus cualidades personales, como por sus conocimientos y amor a las ciencias, son de un mérito distinguido.

Ya es demasiado larga y pesada esta carta...

JOSE IGNACIO DE POMBO³

Por su parte Humboldt al reanudar su viaje se apresura a escribir al sabio Director de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada, objeto determinante de su cambio de ruta; así se deduce de la primera carta de Mutis al Barón, inicio de una amistad, de una mutua devoción que sólo la muerte extinguiría.

“Señor Barón, Federico Alejandro Humboldt.

Muy señor mío:

Tan apreciable me ha sido la resolución de continuar vuesa merced su viaje a Quito, viniendo por Santafé, con el único objeto de reconocer la *Flora de Bogotá* y proporcionar a su autor los agradables momentos de su generosa amistad, que reputaré por los más felices de mi vida los días de su residencia en esta capital del Reino.

Conozco bien por mi propia experiencia los trabajos y fatigas que le costará conducir sus delicados instrumentos por unos caminos tan ásperos, que suelen ser intransitables en las estaciones lluviosas. Puede vuesa merced precaver en mucha parte tales incomodidades

³ Guillermo Hernández de Alba. Archivo Epistolar del sabio naturalista José Celestino Mutis, Tomo I, Imprenta Nacional, Bogotá, 1947, p.p. 241 a 243.

disponiendo su salida de Cartagena en la estación más favorable.

De cualquier modo, el sacrificio es muy grande, y para corresponderlo yo por mi parte en lo posible, procuraré suavizarlo, escribiendo anticipadamente a mis amigos en Honda y Guaduas, para que le faciliten a vuesaerced las mejores comodidades que puedan ofrecer aquellas dos villas.

En Santafé será vuesaerced bien recibido; y en los días de su mansión logrará esta capital la fortuna de ser visitada por un sabio tan recomendable, ya que no tuvo la dicha en otro tiempo de conocer a los ilustres académicos. Más afortunada Quito en sus prosperidades por andar citada en tantos libros sabios, vuelve a serlo ahora de algún modo por su desgraciada catástrofe, llamando la atención de otro sabio para indagar y perpetuar a los siglos venideros las revoluciones espantosas de aquella parte de nuestro planeta.

“Deseo a vuesaerced toda felicidad en su viaje: y le suplico haga de mi parte las más reverentes expresiones de mi afecto a su buen amigo y compañero M. Bonpland, esperando entretanto se sirva vuesaerced avisarme su salida de Cartagena para contar con más certeza los días que me aproximan el gusto de conocer a vuesaerced y abrazarlo con los íntimos sentimientos de la más sincera amistad, con que tendré el honor de ser siempre de mi amigo y señor el más afecto y obligado servidor.

Santafé, 29 de abril de 1801”⁴.

A las once de la noche del mismo día en que Mutis firmaba tan afectuosa carta, los viajeros dejaban a Turbaco, rumbo al Magdalena. Desde el primer momento la casualidad puso a Humboldt en contacto con los hombres que buscaban la independencia nacional, fundada en el ejercicio de los Derechos del Hombre. Con ellos el Dr. Rieux, de regreso de las cárceles españolas como implicado en 1794 en los célebres procesos incoados por la traducción de Nariño, el conato de sedición y los pasquines.

“Se puede imaginar fácilmente, escribe Humboldt, con cuánta emoción el señor de Rieux debía subir ese mismo río que él había descendido encadenado como prisionero de Estado. Lo habíamos ya encontrado en La Habana, y su compañía nos era tanto más agradable ahora cuanto él estaba acompañado de su hijo, joven de bella esperanza, que amaba dibujar las plantas del natural”⁵.

Más impresionante aún por el epílogo, que parece arrancado de la leyenda heroica, el relato que sigue:

“Un ciudadano cuyo nombre se ha marcado después en la historia de la revolución de Cundinamarca y que, como Presidente de la República, ha salvado milagrosamente su vida en la batalla perdida de Pasto porque estuvo tres días errante sin alimento en los bosques, fue arrestado al mismo tiempo que el señor de Rieux. Don Antonio Nariño se encontraba detenido en las prisiones de Santafé de Bogotá cuando yo hice la navegación del Magdalena con su hijo, niño de doce años, y con su cuñado el señor Montenegro. Este último había residido

largo tiempo en el Chocó y en la provincia de Antioquia a causa del comercio del oro en polvo (el rescate del oro de los lavaderos). El me hizo conocer, el primero antes que nadie, el pequeño canal de La Raspadura y la proximidad en la cual se encuentra el golfo de Cupica a las bocas del Atrato. Fue por un singular azar que el joven hijo de don Antonio Nariño subía el río en una misma canoa con el compañero de infortunio de su padre, al cual el Virrey Mendieta, cediendo a las solicitudes del célebre botánico señor Mutis, suavizaba la amargura de la prisión, tanto como el rigor de las órdenes de la Corte podía permitirselo. Todo nos hacía esperar entonces la próxima libertad de don Antonio Nariño, uno de los negociantes más instruidos de la América española; pero él no salió de su prisión de Bocache sino para ser instalado como primer magistrado de una República naciente y para afrontar el doble peligro de la defensa exterior y de las revueltas civiles. Hay algo de dramático en esa mezcla de infortunio y de éxito que se me perdonará el haber entrado en algunos detalles sobre las personas que nos acompañaron de Turbaco a Santafé. No he visto al señor Nariño en su prisión durante mi residencia en esta última ciudad, pero algunos años más tarde, ya desprendido de sus grandezas republicanas y militares, en el momento en que él se preparaba a volver a su patria para tomar parte en el Congreso de Cúcuta, ha venido a darme las gracias a París por los cuidados que el señor Bonpland y yo habíamos tenido con su hijo, debilitado con las fatigas de la navegación sobre el río Magdalena. Extraño destino de los hombres que viven en los tiempos en que las grandes agitaciones políticas quebrantan la sociedad humana!”⁶.

No dio el sabio oportunidad en el relato histórico de su *Viaje a las regiones equinocciales* para referirse a las circunstancias de su tránsito a través del virreinato de la Nueva Granada, a pesar del grato recuerdo que le acompañó hasta sus postrimerías, renovado con el trato de colombianos ilustres que le visitaron en su estudio parisiense, como Acosta, Narváez, Roche, Domínguez, Uricoechea y tantos otros. Felizmente quedan sus cartas de América, crónicas llenas de vida, palpantes por las emociones del momento, trasunto de su euforia espiritual y depósito de tantos de sus descubrimientos en personas, seres y cosas. Esparcidos en muchos lugares de obras suyas tardías con relación a su viaje, quedaron también recuerdos y memorias de este Nuevo Reino de Granada y sus gentes⁷.

A Guillermo su ilustre hermano, le escribe entusiasmado:

“Estoy en extremo feliz. Mi salud es tan buena como nunca lo ha sido, inquebrantable mi valor, mis planes me salen bien y adonde quiera que llego soy recibido con obligante solicitud. Me he adaptado tan bien al Nuevo Mundo, a la vegetación tropical, al color del cielo, a las constelaciones, a la vista de los indios, que la

⁴ *Ibidem* p.p. 325 y 326.

⁷ Oeuvres d'Alexandre de Humboldt, Correspondance Inédite scientifique et littéraire, recueillie et publiée par M. De La Roquette, Doyen et Président Honoraire de la Société de Géographie de Paris, etc., Paris, L. Guérin et Cie, Editeurs, 1869, 1er. y 2^o Partie, XLIV y 461 y 499 p.p.

Letres Américaines de Alexandre de Humboldt, 1798-1807, publiées par le Dr. E. T. Hamy, Paris, Gullmote, pres. 1905. XXXIX, 309 p.

⁴ G. Hernández de Alba, *Ibidem*, p.p. 222 y 223.

⁵ E. Posada, *Ibidem*, p. 325.

Europa no aparece a mi imaginación sino como un país que vi en mi infancia”.

“El deseo ardiente de ver al gran botánico José Celestino Mutis, amigo de Linneo, que reside en Santafé de Bogotá, y de comparar nuestros herbarios con los de él, y la curiosidad de escalar la inmensa Cordillera de los Andes, que se extiende de Lima (del lado Norte) hasta la embocadura del río Atrato, en el golfo del Darién, a fin de poder trazar por observaciones personales una carta de toda la América del Sur, desde el río Amazonas al Norte, me llevaron a preferir el camino de tierra hacia Quito, más allá de Santafé y Popayán, a la vía marítima por Portobelo, Panamá y Guayaquil. No envié, de consiguiente, sino mis instrumentos más voluminosos, los libros que no necesitaba y otros objetos por vía marítima, y nos embarcamos en el Magdalena, después de tres semanas que estuvimos en Cartagena.

“La violencia de las olas y de la poderosa corriente nos retuvieron durante cuarenta y cinco días en el Magdalena, tiempo durante el cual nos vimos siempre entre selvas poco habitadas. No se encuentra casa ni otra habitación humana en una extensión de cuarenta millas francesas. No te digo nada del peligro de los saltos, de los mosquitos, de las tempestades e intemperies que se suceden aquí de una manera no interrumpida e incendian la bóveda celeste todas las noches: te he descrito todo esto detalladamente en muchas otras cartas. Navegamos de esta manera hasta Honda, a cinco grados de latitud norte. Dibujé el plan topográfico del río en cuatro hojas, de las cuales el Virrey guardó una copia; dibujé curvas de nivel barométrico de Cartagena a Santafé, estudié el estado del aire en cuatro lugares, pues mis eudiómetros están todos bien; ninguno de mis costosos instrumentos se ha roto. A su regreso a Francia, Bouguer recorrió el Magdalena de bajada: no llevaba ningún instrumento consigo. Visité las minas de Mariquita y Santa Ana, donde D’Elhuyart encontró la muerte...”⁸.

Se detiene en Guaduas en la casa hospitalaria de don Josef de Acosta, cuyo hogar hacía pocos meses alegraba el menor de sus hijos, el más tarde célebre General Joaquín Acosta, ingeniero graduado en París, geógrafo e historiador, a quien tantas veces consultaría Humboldt acerca de la carta geográfica colombiana. Mientras se recuperaba la maltrecha salud del excelente Bonpland, hubo tiempo para recibir allí otra carta de Mutis; que parecía contar las horas que lo separaban de tan esperada visita:

“Señor Barón de Humboldt.

Mi amadísimo señor:

Muy sensible me ha sido la detención de vuesa merced, a quien considero cuidadoso por la enfermedad de su buen compañero M. Bonpland. Yo sospecho que se decida ser una fiebre terciana: y en tal caso sería mejor la resolución de venir a descansar y curarse aquí, donde hay otras proporciones que por allá, sin embargo de las cumplidas asistencias de mi amigo Acosta. Aprovechando el día de la intermitencia y también las horas libres en el día de la accesión, se lograría llegar a esta capital, donde todos los que nos interesamos en proporcionar

las comodidades a tan ilustres viajeros cuidaremos del restablecimiento del enfermo. Sin embargo de estas reflexiones, las que vuesa merced hiciere serán más acertadas; y por lo demás, no hay que tener pena sino la que vuesa merced puede considerar de que nos dilate el tiempo de darle mis primeros tiernos abrazos. Remito esa porción de la *quina naranjada*, por si fuere necesario recurrir a este remedio con la mayor prontitud en caso de alguna malignidad.

Suplico a vuesa merced que el día de la salida del Aserradero no se detenga a comer en Facatativá, porque en Fontibón estará preparada la comida, descansando allí para entrar menos molesto a Santafé.

Mucho he celebrado la fortuna de haber observado vuesa merced la *Myristica*, cuyas flores masculinas difieren absolutamente de la descripción y diseño que hace Aublet de su virola. Aquí hablaremos largamente, y entretanto no hay por qué atarearse demasiado, sino pensar en algún descanso, y templarse al temperamento de estos países altos, en que ha de vivir vuesa merced por algún tiempo, hasta completar sus ideas en las Provincias de Quito, y volver a bajar a los cálidos.

Quedo a la disposición de vuesa merced, de quien soy con todas las veras de mi afecto.

Señor, Su amantísimo,

Mutis”⁹.

Por fin, recorrida la difícil y tremenda ruta de montaña, avistaron El Aserradero y la “boca del Monte”, garganta bendecida que se abre para dar rápido acceso a la maravillosa sabana de Bogotá. Horas más tarde la ciudad virreinal estaba de fiesta por tan extraordinaria visita.

“Nuestra llegada a Santafé, escribe el Barón a su hermano, pareció una marcha triunfal! El arzobispo nos envió su coche, y salieron a recibirnos los notables de la ciudad. Se nos ofreció un banquete a dos millas de la ciudad (en Fontibón), y entramos en ella acompañados por más de sesenta personas a caballo. Como se sabía que íbamos a hacer una visita a Mutis —a quien se le guardan grandes consideraciones por su edad avanzada, por su posición en la Corte y su carácter personal—, se dio cierto brillo a nuestra llegada, honrándolo a él en nosotros. El Virrey, según la etiqueta, no debe comer con nadie en la ciudad; casualmente estaba en su casa de campo en Fucha, y nos invitó a ella. Mutis nos había hecho preparar una casa vecina a la suya, y nos trató con excepcional deferencia. Es un eclesiástico viejo, venerable, de cerca de setenta y dos años, y hombre rico. El Rey gasta en la Expedición Botánica 10.000 pesos anuales. Hace quince años que treinta (sic) pintores trabajan con Mutis; tiene de dos a tres mil dibujos en folio, que son miniaturas, exceptuando la de Banks, de Londres, no he visto biblioteca botánica más grande que la de Mutis”¹⁰.

En tan breve párrafo resumió el sabio alemán las impresiones de su estancia feliz, de dos meses, como huésped inolvidable del ilustre y venerable Director de la Real Expedición Botánica del Nuevo Reino de Granada. El anciano cautivo para siempre a Humboldt y a Bon-

⁸ Hamy, cit. Carta fechada en Contreras de Ibagué, 21 de septiembre de 1801.

⁹ Hernández de Alba, cit. p.p. 224 y 225.

¹⁰ Hamy, ibídem.

pland. Delante de los atónitos viajeros desplegó sus tesoros de ciencia; como ningunos eran ellos los más calificados para valorar la tarea realizada en tantos años. Día tras día debieron dialogar infatigables estos tres hombres jamás satisfechos de su quehacer; soñando Mutis con nuevas empresas científicas y los dos exploradores acrecentando sabiduría y experiencia. Delante de ellos el patriarca cuya amistad con Linneo los unía a tan gloriosa época del mundo científico; amplía ruta abierta por el maestro sueco, continuada y rectificada por Mutis, el español-americano, brindada a ellos ahora para proseguir con la plenitud mental del siglo XIX. Pronto para dar, Mutis los abrumó de cariño y de regalos entre los que figuraron más de un centenar de esas preciosas láminas, ufanía de la flora universal.

Humboldt proclamaría en todas partes su gratitud y en lo venidero se convertiría en el panegirista y defensor de quien desde el primer momento le mereció el dictado de “patriarca de los botánicos”. Lo veneró, honró y recordó siempre. A muchas leguas del anciano Maestro, a quien no volvería a ver jamás, en importantes comunicaciones al Instituto de Francia, al sabio Delambre, a Cavanilles, Director del Real Jardín Botánico de Madrid, expresó, sincero y justo, el aprecio que le mereció y la gratitud por el honor de su amistad, de todo lo cual daría público testimonio en obras científicas que honran la ciencia universal.

El 21 de junio de 1803, desde la capital de México, Humboldt y Bonpland escribieron al Instituto Nacional de Francia:

“Citoyens,

Depuis le mois de brumaire, an VII (23 octobre 1799), ou depuis le commencement de l'expédition dans laquelle nous nous sommes engagés pour le progrès des sciences physiques, nous n'avons cessé de chercher des moyens pour vous faire parvenir des objets dignes d'être conservés dans le Musée national. Sans compter les collections nombreuses de graines adressées au Jardin des Plantes de Paris, et les produits de l'Orénoque dont le citoyen Bressan, ci-devan agent de la République à la Guadeloupe, s'est chargé, nous vous avons envoyé de Santa-Fe de Bogotá et de Carthagène des Indes, deux caisses accompagnées de lettres datées de messidor, an IX (1801-2). L'une de ces caisses contient un travail sur la quinquina du royaume de la Nouvelle-Grenade, savoir: des dessins enluminés de sept espèces de *Cinchona*, avec l'anatomie de la fructification, des échantillons d'herbiers en fleurs et en graines, et les écorces sèches de ce produit précieux digne d'une nouvelle analyse chimique. L'autre caisse renferme une centaine de dessins en grand folio, représentant de nouveaux genres et de nouvelles espèces de la *Flore de Bogotá*. C'est le célèbre Mutis que nous a fait ce cadeau aussi intéressant pour la nouveauté des végétaux que pour la grande beauté des planches coloriées. Nous avons cru, citoyens, que ces collections seraient plus utiles aux progrès de la botanique en les offrant à l'Institut national comme une faible marque de notre reconnaissance”.

En la ciudad de Lima, el 25 de noviembre de 1802, el Barón había escrito al sabio Delambre:

...“Le docteur Mutis qui m'a fait mille amitiés, et pour l'amour duquel j'ai remonté la rivière de la Ma-

deleine en quarante jours, le docteur Mutis m'a fait cadeau de plus de cent dessins magnifiques en grand in-folio, figurant de nouveaux genres et de nouvelles espèces de sa *Flore de Bogotá* manuscrite. J'ai pensé que cette collection, aussi intéressante pour la botanique que remarquable à cause de la beauté du coloris, ne pourrait être en de meilleures mains qu'entre celles des Jussieu, Lamarck et Desfontaines, et je l'ai offert à l'Institut national comme une faible marque de mon attachement...”¹¹.

Lustros más tarde evocaría así la inolvidable memoria de José Celestino Mutis:

“El hombre que durante cuarenta y ocho años de trabajos en el Nuevo mundo, desplegó tan asombrosa actividad, estaba dotado por la naturaleza de la más feliz constitución física. Su conversación era tan variada como los objetos de sus estudios. Si algunas veces hablaba con calor, le gustaba también practicar el arte de escuchar, a que tanta importancia daba Fontenelle, y que tan rara vez veía en su tiempo. Aunque muy ocupado de una ciencia que hace necesario el estudio más minucioso de la organización, Mutis jamás perdía de vista los grandes problemas de la física del mundo. Había recorrido las cordilleras con el barómetro en la mano; había determinado la temperatura media de estas planicies que forman como islotes en medio del océano aéreo; y admirado del aspecto de la vegetación, que varía a proporción que se desciende a los valles, o que se sube a las cimas heladas de los Andes, todas las cuestiones que se conexian con la geografía de las plantas le interesaban vivamente, y casi trató de conocer los límites más o menos próximos entre los cuales se encuentran confundidas, en la pendiente de las montañas, las diferentes especies de *cinchona*. Este gusto por las ciencias físicas, esta curiosidad activa que se dirige a inquirir la explicación de los fenómenos de la organización y de la meteorología, mantuvieron en él todo su vigor, hasta el último momento de su vida. Nada prueba mejor la superioridad de su talento que el entusiasmo con que recibía la noticia de un descubrimiento importante. No había visto los laboratorios químicos desde 1760; y sin embargo, la lectura asidua de las obras de Lavoisier, de Guyton-Morveau y de Fourcroy, le habían sugerido conocimientos muy preciosos sobre el estado de la química moderna. Mutis acogía con bondad a los jóvenes que mostraban disposiciones para el estudio, y les suministraba libros e instrumentos: a sus expensas hizo viajar a muchos de ellos.

“Después de haber hablado de su liberalidad y de los sacrificios que hacía por las ciencias, es inútil ponderar su desinterés. Gozó durante mucho tiempo de la confianza de los Virreyes, que ejercían un poder ilimitado en aquellos países; pero jamás se valió de su crédito sino para ser útil a las ciencias, para hacer conocer el mérito que gusta de permanecer oculto, y para defender con valor la causa del infortunio. No ambicionaba otro suceso que hacer triunfar la verdad y la justicia. Llenó con celo austero, si puede decirse así, los deberes que le imponía el estado que había abrazado; pero su piedad no buscaba el vano brillo del renombre, era dulce

¹¹ Humboldt. Correspondance Inédite etc. 1er. partie p.p. 120 a 131 y 149 a 161.

como lo es siempre que se encuentra unida a la sensibilidad del corazón la elevación del carácter”.

Como suceso digno de memoria guardan las crónicas de Bogotá el de la visita de tan célebres científicos. Su juventud, su gentileza y simpatía se adueñó de todos. Llegaban en momentos en que el amor de las ciencias naturales fomentado por el venerable Mutis, era compartido por damas y caballeros de la sociedad. El periodismo, el teatro, la biblioteca pública, la cátedra de matemáticas en el Colegio Mayor del Rosario y los pasados alardes revolucionarios despertaban la sociedad criolla a cuya cabeza la familia de los Marqueses de San Jorge daba el ejemplo en su afán por poseer las ciencias y las artes. Jorge Tadeo Lozano, hermano del Marqués, había regresado hacía poco de España, después de recibir el título de Químico, y era decidido por la zoología. En torno a la casa de la Real Expedición Botánica menudeaban los hombres proyectos con los jóvenes procedentes de las diferentes provincias, estudiantes de los dos Colegios Mayores de la capital. Todos competían en sus aficiones científico-literarias que expresaban en depurado estilo y brillante concepción.

Rodeados fueron por esta sociedad ansiosa de luces, invitados por el Virrey Mendinueta a quien recónditos pensamientos políticos le hicieron suspicaz y precavido con tan queridos huéspedes; animaron los salones discretos y elegantes de la sociedad y hasta los humildes, que no podían entender la alta calidad mental de los viajeros, registraron en sus diarios íntimos el acontecimiento como lo hizo el maestro sastre José María Caballero que anotó lo que mejor se acomodaba con su genio: “Julio. A 6 entró en Santa Fe el Barón francés (sic); trajo una lira, la que tocaba muy bien, instrumento que aquí no se había visto. Se infiere que era emisario”¹².

Como a un oráculo les escuchó la inflamada juventud estudiosa. Los hombres de luces les admiraron entusiasmados; todos quisieron conocer a los dos sabios; estar cerca para escuchar sus disertaciones y recibir el estímulo para continuar fomentando las ideas progresistas que animaban al Nuevo Reino. A Humboldt se le podría considerar a manera de fundador de la célebre tertulia del *Buen Gusto*, de la que fue animadora la culta dama doña Manuela Sanz de Santamaría de Manrique, y que tanta influencia tuvo en la cultura de la capital del virreinato. En su salón conoció entre otros a Camilo Torres de quien escribió la más excelente semblanza, maravillado de su insigne organización mental. Jamás recató su admiración por tantos próceres como tuvo la oportunidad de conocer y de tratar desprevenidamente o apreciarlos por sus obras y trabajos en el campo científico, como le ocurrió con Francisco José de Caldas, aún antes de conocerlo personalmente. En el hijo de Popayán adivinó al genio, nunca encubrió la admiración que su caso intelectual le produjo; si chocó su temperamento por razones de índole puramente humana, en los escritos, diarios y producciones del prusiano no falta honroso lugar para el criollo ilustre. A su vez Caldas quien, pasado el turbión del desencanto, había cifrado, con suma de razón, su mayor triunfo en trabajar por unos meses al lado del genial berlinés, solo tuvo

para él, para sus ideas científicas respeto, admiración y elogio como lo demuestran muchas páginas de su valioso *Semanario del Nuevo Reino de Granada*.

Por espacio de dos meses Humboldt y Bonpland honraron la capital del virreinato. En ella trabajaron por el progreso del país y buscaron ser útiles a un pueblo que de tal manera supo distinguirlos y amarlos. Además de la carta del río Magdalena, el Barón trabajó una excelente memoria sobre las salinas de Zipaquirá. Visitó la laguna de Guatavita y el célebre salto de Tequendama; herborizó en las cercanías de Santafé en compañía de Francisco Javier Matís, y con su lápiz magistral trazó bocetos de las bellezas naturales del virreinato. En su modesto colaborador Matís apreció todas las cualidades de la escuela de Mutis; con Bonpland le dedicó su nuevo género *Matisia* y lo consagró luego en carta a Wildenow suscrita en México el 20 de abril de 1803: “Matis, le premier peintre de fleurs du monde et un excellent botaniste à Santafe, élève de Mutis”¹³.

Jamás en su larga vida, de satisfacciones y de honores, disfrutó tanto don José Celestino Mutis como ahora, cuando su serena inteligencia encontró la mejor ocasión para expandirse y elevarse. Cuán equivocados los que le tuvieron por hurano, egoísta y reconcentrado, especies que corrían hasta en la misma Europa. Humboldt los desmentiría como lo hizo cuando los envidiosos quisieron amargar las postrimerías de aquel “por cuyo amor subió el río durante cuarenta días”, de ya olvidadas incomodidades y peligros. Presente está su carta a Cavanilles cuando se trató de despojar a Mutis de la gloria de descubridor de las quininas de Santafé de Bogotá, que le disputó con inaudita constancia el respetable médico panameño Sebastián José López Ruiz, a quien secundaron en Madrid, con el ánimo de derribar el valor científico de la *Quinología* de Mutis, Ortega y los célebres expedicionarios del Perú y Chile, Ruiz y Pabón. Herido el joven sabio alemán, escribió entonces:

“He visto con mucha pena lo que ha ocurrido con las Quinas, pues la ciencia no gana cuando se mezclan la hiel y las personalidades. La manera como se ha tratado al venerable Mutis me ha herido el corazón.

“Las ideas que se han esparcido en Europa sobre el carácter de este hombre célebre son falsas hasta más no poder. Me trató en Santafe con una franqueza como la de Sir Joseph Banks: me mostró sin reserva todas sus riquezas de botánica, zoología y física; comparó sus plantas con las que yo tenía y, en fin, me permitió tomar todas las notas que deseé sobre los géneros nuevos de la *Flora de Bogotá*. Está ya viejo, estoy sorprendido de los trabajos que ha llevado a cabo y de los que prepara. Es admirable que un hombre solo haya sido capaz de concebir y ejecutar tan vasto plan.

“El señor López me envió su memoria sobre la *Quina* antes de imprimirla; le dije entonces que su escrito probaba con evidencia que Mutis había descubierto la Quina en las montañas de Tena en 1772, y que él (López) la había visto cerca de Honda en 1774”¹⁴.

¹³ Hamy, cit.

¹⁴ Tan importante carta en la cual, además, da cuenta de sus tareas científicas, está fechada en México el 22 de abril de 1803. Fue hecha publicar por Cavanilles en los “Anales de Ciencias Naturales de Madrid”, 1803, vol. VI, p. 281.

¹² Biblioteca de Historia Nacional, vol. I, La Patria Boba, p. 98

El 8 de septiembre de 1801, cuajados de lágrimas los ojos, el venerable Mutis vio partir a los dos viajeros a quienes con sus cartas, recomendaciones y todo género de cariños, siguió con ternura paternal a través de las rutas tremendas que les llevaban a Popayán y Quito. Donde quiera que llegaban eran sorprendidos por los *chasquis* del doctor Mutis, por las atenciones prevenidas por Pombo, el gran señor de Cartagena de Indias y las que el señorío santafereño les brindaba en sus haciendas como los Lozanos y Caycedos.

Las cartas de Mutis lo dicen todo:

“Señor Barón de Humboldt.

Mi estimadísimo amigo y señor:

“Voy siguiéndole a vuesamerced los pasos mentalmente, ya que no puedo hacerlo con mi persona. Mi corazón persevera enternecido con los últimos abrazos, y necesito violentarme para que mis ojos no publiquen sus ternuras. ¡Tal es la impresión que ha grabado en mi corazón el amabilísimo trato familiar de un amigo que hizo tantos sacrificios para conocerme y honrarme!

“Acabo de saber las molestias del monte de Fusagasugá, agravadas por el fuerte aguacero; y me tiene en gran cuidado la quebrantada salud de mi muy amado Bonpland. No puedo quietarme hasta salir de mis sobresaltos, y a este fin hago este *chasqui* al punto más cierto de la llegada a Ibagué.

“Entre mis muchas inadvertencias, originadas de mi flaca memoria y de la variedad de asuntos de que tratamos, tuve la de olvidar la entrega del adjunto papel: es un diario del descubrimiento de la veta de cinabrio del Quindío, practicado por mi mayordomo Gutiérrez, según las noticias que ya tenía y las instrucciones que le formé; empeñado en esta comisión por los poderosos enlaces que me unían al Marqués de Sonora y al Arzobispo Virrey Góngora. El señor Barón me ha ofrecido hacer un reconocimiento que no creo le será difícil; y para verificarlo con mayor seguridad podrá servir ese diario. Fuera de ser este descubrimiento tan decoroso a mis tareas mineralógicas, no lo sería menos para un ilustre viajero que hará memorables sus jornadas del Quindío por este reconocimiento. Suplico también a vuesamerced que me participe la medida barométrica en el sitio inmediato a la veta, para compararla con la del mayordomo, a quien entregué también al termómetro que le sirvió.

“Adiós, mi amabilísimo señor Barón, hasta la que le seguirá a ésta alcanzándolo en Cartago. Mis tiernas memorias y cordialísimas expresiones a mi muy amado Bonpland. Nuestro común amigo Escallón los acompaña igualmente. Entretanto, mande vuesamerced, con la satisfacción de que soy y seré siempre cual vuesamerced me ha conocido...

Santafe, 12 de septiembre de 1801”¹⁵.

Cuan grato habrá de ser para la memoria de Humboldt renovar en el recuerdo, en estos días, esas relaciones tan fecundas para la ciencia, expresadas en las cartas

¹⁵ El amigo Escallón citado es el doctor Antonio José Escallón y Florez, uno de los más antiguos discípulos de Mutis en su cátedra de Matemáticas y autorizado botánico. Hernández de Alba, cit. 228 y 229 p.p.

íntimas de los dos sabios. El 21 de octubre tornó Mutis a escribir:

“Mi estimadísimo amigo y señor:

“Si es cierta la noticia que me dieron ayer de hallarse vuesamerced cerca de Popayán, sería más abreviada de lo que yo creía la excursión del Quindío, donde lo contemplaba yo todavía el día 15, calculando la entrada desde el día 29 de septiembre, porque hallando bueno el camino, convidaba el tiempo a detenerse para el reconocimiento de esas tierras altas, y si malo, la necesidad obligaba a detenciones indispensables. ¡Qué de cosas buenas habrá vuesamerced observado en ese amenísimo tránsito! Y ¿cuál habrá sido la suerte de mi filón de cinabrio? Sobre todo lo que más me interesa es la salud de vuesamerced y del amabilísimo Bonpland. Conviene tomar algunos moderados descansos para no perder la salud preciosa en las grandes poblaciones, porque así lo exige la aspereza de tales caminos, y también la necesidad de ir conservando las preciosidades descubiertas.

“Después de nuestra triste y necesaria separación, he recibido tres apreciables cartas de vuesamerced, una desde Contreras y dos desde Ibagué. Todas sirvieron para endulzar mis amargas memorias. Si las gentes de Santafe y las señoras principales, entre quienes se han distinguido la Lozano y la Santa María, han sentido la ausencia del amabilísimo Barón¹⁶, cuántos motivos hay para reunir en mí los sentimientos de todos? En la última correspondencia ha resonado por la ciudad el nombre de Humboldt, alegrándonos de ver sus elogios merecidos y publicados en *El Mercurio* de enero, y en el capítulo de Berlín de la *Gaceta*, 23 de abril.

“En esta correspondencia recibí el número 5 de los *Anales*, en que se halla la memoria de Zea sobre las quinas de Santafe, y allí mismo el género dedicado a nuestro buen Bonpland, que hice copiar para remitirlo en ésta. Zea se halla en París desde enero del presente año, con licencia del Rey, para instruirse principalmente en la química, cuyos conocimientos nos son aquí tan necesarios, y espero difundirá en esta capital según sus extraordinarios talentos. Eligió para este estudio a M. Vauquelin, y me habla mucho del amable Jussieu, quien se halla muy irritado con los señores de la *Flora Peruana* por haberse resistido éstos a corregir sus errores, y publicarlos aquel en su nueva edición como correcciones hechas por los mismos autores. Han disparado un suplemento a su *Quinología*, en que según veo por el título de la *Gaceta*, responden a Zea, y también intentan satisfacer los reparos de Jussieu. Veremos cómo salen de estos atolladeros, que los considero más difíciles que los del Quindío. Mi sobrino no pudo acompañar a Zea, interrumpida la comunicación de la Andalucía con la Corte por la peste, donde debía presentarse para agitar su pretensión, y desde luego la hubiera conseguido como Zea, por la grande protección del ex-Ministro Urquijo.

“Nos hemos quedado burlados con los anuncios de la paz. Parece que las miras del nuevo Emperador Alejandro son contrarias a las de su padre, y aun se asegura últimamente que Rusia y Prusia han declarado la gue-

¹⁶ Doña María Tadea Lozano, hija del Marqués de San Jorge de Bogotá, sobrina y esposa de Jorge Tadeo Lozano, químico y zoólogo. La otra dama aludida es doña Manuela Sanz de Santamaría de Manrique, memorable en los fastos culturales de Santafe de Bogotá.

rra a Francia. Todas las noticias, como también esta, necesitan de confirmación, que lograremos tan tarde como esta correspondencia de año y medio, en que se han recibido cartas y noticias públicas del año de 99. Parece haber salido falsa la muerte de la Reina, aunque vino tan circunstanciada en día y causas de su fallecimiento.

“Muchísimo celebré la oportuna observación del eclipse de luna en Ibagué, para que juntamente hiciese vuesa-merced la observación del barómetro. Logre vuesa-merced la oportunidad de Quito y demás estaciones dentro de los trópicos, porque en saliendo de aquí, sus observaciones, por muy finas que sean, quedarán en el número de la ingeniosa teoría del ilustre Toaldo, que es lo más fino que he visto en el asunto de mareas atmosféricas.

“En otra ocasión irán otros papeles, y la Memoria de la sal. Se va a cerrar el correo, y por eso concluyo ésta, con mis expresiones finísimas a nuestro Bonpland. Vuesa-merced reciba de los Lozanos, Portocarrero, Isla, Escallón y Rizo, con singularidad, cuya inclinación a vuesa-merced es desde luego memorable y superior a cuanto yo puedo explicar¹⁷.

“Mande vuesa-merced, pues, con la seguridad de que soy...”.

Mas el climax de la manifestación de este paternal afecto, tan justamente despertado por Humboldt en el sabio Maestro, lo pondera la postrera carta conocida, de las numerosas que debió escribirle don José Celestino. Refiérese en ella a la proposición que le hizo de llevar a su lado, mientras continuara su viaje por América, la severa y genial juventud de Francisco José de Caldas, de quien Mutis, sin conocerlo sino de oídas y por alguna carta, se constituyó en decidido protector hasta hacerlo uno de sus predilectos colaboradores. La humildad del sabio Mutis corre parejas en esa carta con la calidad de su amistad sin par, que no quiso ver sacrificada por un incidente de tan humana explicación. Es bien sensible que falten del archivo de Mutis las cartas de Humboldt, acaso desaparecidas para siempre, lo mismo que las que éste escribiera al señor Pombo que, día a día, al igual de Mutis, le siguió con sus cartas en su itinerario austral. El bello diálogo que se adivina por la expresiones del Director de la Real Expedición Botánica de Santafé de Bogotá, queda así fatalmente trunco, pero se prolonga en las obras geniales de Humboldt y Bonpland y en los términos con que el prusiano se refirió en lo venidero a la grandeza mental del más insigne civilizador del Nuevo Reino de Granada.

De tal manera el primer fruto científico de la inolvidable expedición, la *Geografía de las Plantas o cuadro físico de los Andes equinoxiales y de los países vecinos, levantado sobre las observaciones y medidas hechas en los mismos lugares desde 1798 hasta 1803, y dedicado, con los sentimientos del más profundo reconocimiento,*

¹⁷ Referencia a los señores don José María Lozano de Peralta, marqués de San Jorge, su hermano el hombre de ciencia y catedrático Jorge Tadeo, don José Antonio Portocarrero y Salazar, el P. Miguel de Isla, médico eminente y director de la Facultad de Medicina del Colegio Mayor de Nuestra Señora del Rosario; el ya citado doctor Escallón y don Salvador Rizo, primer pintor y Mayordomo de la Real Expedición Botánica. Hernández de Alba, *ibidem*, I, p.p. 228 y 229.

al ilustre Patriarca de los Botánicos D. José Celestino Mutis, por Federico Alejandro, Barón de Humboldt. Con la efígie del preclaro sacerdote gaditano honraron el tomo primero del más sazornado fruto de las tareas botánicas realizado con la incomparable colaboración de Aimé Bonpland, *Plantes Equinoxiales*, publicado en París en 1808, el año mismo de la muerte de tan insigne hombre de ciencia a quien también dedicaron la obra *Comme une faible marque d'admiration et de Reconnaissance*.

La última carta de Mutis a Humboldt que ha llegado a nuestro conocimiento, a la cual nos hemos referido, dice así:

“Señor Barón de Humboldt.

“¿Qué es esto, mi amadísimo Barón? ¡Qué! ¿Una propuesta hecha con la mayor sinceridad y franqueza será capaz de alterar nuestra constante amistad? ¿Tendría yo la culpa de que Caldas se hubiese aficionado con entusiasmo al ilustre Barón hasta pensar en seguirlo por las dos Américas? ¿Pude yo proceder con mayor franqueza que la que indican las expresiones de mi carta, y remitir apertorias, para que vuesa-merced las leyese, la respuesta y libranza a Caldas? ¿Y no sería mi verdadera intención agregarle un alumno que creí sería de su agrado? Rompa vuesa-merced, pues, su silencio, y como si tal cosa no hubiere pasado, continúe vuesa-merced correspondiendo a su amado amigo.

“He repetido a vuesa-merced en mis anteriores que remití la Memoria original de las salinas con lo demás que participé en ellas. Sáqueme vuesa-merced de este cuidado.

“En el Jardín Botánico de Madrid se ha hecho una grande revolución. Se ha retirado a Ortega y Barnades; y se ha creado por Director, Profesor y único jefe de aquel establecimiento a nuestro amigo Cavanilles.

“Más ruidosa ha sido aquí la separación de Rieux, que ha bajado a Cartagena preso para ser conducido a España. Se dice ser la causa haber engañado al Ministerio.

“De cuántas noticias de mi satisfacción me ha privado el señor Barón, por tan dilatado silencio. Ameme vuesa-merced como le amo; y si vuesa-merced ha concebido algún agravio en mi indiscreta propuesta, merezca yo la indulgencia de tan generoso amigo, a quien he amado y amaré cordialmente todo el resto de mi vida.

“Mis tiernas expresiones al amabilísimo Bonpland, y vuesa-merced mande con satisfacción, pues soy...”

“Santafé, 21 de mayo, 1802¹⁸.

De la ciudad de Quito prosiguieron los viajeros sus agobiadoras jornadas hasta arribar, por fin, a Lima, término austral de sus investigaciones. Desde aquí, antes de embarcarse para Guayaquil de donde continuarían rumbo a México, el Barón escribe una larga carta al Virrey de Santafé don Pedro Mendinueta, dándole pormenorizada cuenta del itinerario seguido desde Santafé de Bogotá y para agradecer, una vez más, también en nombre de su compañero, tantos favores recibidos, así como por las altas recomendaciones para los gobiernos

¹⁸ *Ibidem*, p.p. 240 y 241.

de Quito y Lima que tanto contribuyeron a hacerlas tan útil y tan grata su estancia en las dos importantes ciudades¹⁹. El señor Mendinueta, a fuer de hidalgo no dejó percibir a los viajeros las precauciones políticas de que les hizo rodear en todas partes de acuerdo con su carta reservada de 19 de julio de 1801 dirigida al Excmo. Señor D. Pedro Ceballos, ministro de Estado de la Corona: "Como en los tiempos que alcanzamos, escribí, sea de cualquier modo asunto delicado la internación a estos países de unos extranjeros hábiles e instruídos que en las mismas operaciones e investigaciones científicas, aunque las ejecuten con sincero fin deben adquirir conocimientos que tal vez convendría reservar; sin negarme yo al cumplimiento de lo tan expresamente mandado por S. M. y de que como de hecho no tengo causa suficiente para dudar, me he propuesto estar a la mira de todos sus pasos y prevenir reservadamente a los Gobernadores de los territorios por donde transitaren ejecuten lo mismo, dándome aviso de cualquier cosa que

¹⁹ La traducción del francés, en copia de la época, se conserva en la Biblioteca Nacional de Bogotá; fue publicada por el señor don José Manuel Groot en las páginas LXLVI a LXLVIII del Apéndice al tomo II de su *Historia Eclesiástica y Civil de la Nueva Granada*. Bogotá, Casa Editorial de M. Rivas & Cía. 1890. Fue también dada a conocer por el historiador D. Eduardo Posada en su comentario bibliográfico a la obra del Dr. Hamy, citada. Posada es también autor de un breve estudio "Humboldt en Colombia", incorporado, como su reseña "Cartas de Humboldt" a su obra *Apostillas*, citada en la nota I. Otros dos académicos colombianos, los doctores Diego Mendoza y Nicolás García Samudio, se ocuparon también de la presencia de Humboldt en Colombia. Débese al primero la traducción de algunas de las cartas del Barón, escritas desde América, y al segundo el opúsculo *El viaje de Humboldt a América*, Bogotá, Imprenta de "La Luz", 1934, 32 p.p.

observen digna de mi noticia; o tomando desde luego la providencia que tengan por precisa en mejor servicio del Rey, a cuya soberanía me ha parecido conveniente participarlo por medio de V. E..."²⁰.

Ninguna precaución fue precisa para celar la infatigable tarea de los dos exploradores que encontraron un mundo próximo a irrumpir en el concierto de las naciones libres, con el ímpetu de sus volcanes ecuatoriales. Nuevo Mundo cuya naturaleza y cuyo espíritu desplegaron los dos sabios ante el atento europeo para quien, hasta entonces, eran territorios vedados a su anhelo científico y a su ambición expansionista.

Los dos jóvenes descubridores de tanto tesoro escondido en la naturaleza o inédito en las carpetas y papeles de hombres memorables como Mutis, pudieron expresar plenamente su gratitud hacia la España decadente de Carlos IV, que si agonizaba en la Península florecía, cargada de esperanzas, en los dominios de Ultramar.

"Le ruego, dice Humboldt al Director del Jardín Botánico de Madrid, dé a conocer nuestro reconocimiento por los innumerables favores que debemos a los españoles en todas las partes de América que hemos visitado; seríamos ingratos si no hiciéramos los mayores elogios de la generosidad de la nación española y de su gobierno, que no ha cesado en honrarnos y protegernos"²¹.

²⁰ Restrepo Tirado, cit. p.p. 122 y 123.

²¹ De la Roquette, cit. 1er. partie, p.p. 162 a 170.

EL DIARIO INEDITO DE HUMBOLDT

Por JORGE ARIAS DE GREIFF

CALDAS Y EL MANUSCRITO

Indudablemente es Caldas la persona que primero nos revela la existencia del manuscrito o diario de Alejandro de Humboldt, y lo hace en su correspondencia de los primeros meses de 1802.

La primera referencia directa de Caldas aparece en la carta dirigida a don Santiago Arroyo desde Quito, el 21 de enero de 1802¹, cuando escribe así:

...“Después de abrir sus cofres, me mostró el manuscrito de observaciones astronómicas: me hizo notar la que había hallado de Popayán con su famoso cronómetro, y luego me dijo: *el padre de usted, sin su consentimiento, me ha enseñado un libro manuscrito, en que hallé una observación de la inmersión del primer satélite de Júpiter, calculada; y da la misma longitud que mi cronómetro: lea usted.* He visto un elogio en francés, que no merezco”.

Da luego Caldas idea del contenido aludido. Una transcripción más completa, traducida al español, del elogio, sin embargo, es la que comunica en carta del 6 de marzo, escrita en Chillo, pero fechada en Quito el 6 de marzo de 1802, dirigida a don Santiago Arroyo². Indudablemente fue durante la permanencia en Chillo cuando Caldas tuvo el más completo acceso a estos manuscritos, pues dice así:

...“Aunque la data de esta carta está en Quito, es equivocación: yo me hallo en Chillo, bella casa de campo del Marqués de Selva Alegre, en compañía del Barón y de Bonpland, vivo en un mismo cuarto con este, tengo sus manuscritos a mi disposición”.

Ese mismo día escribe, desde Chillo a don Santiago Arboleda, y es más explícito en referencia al contenido del manuscrito:

...“Por un camino impensado, y sobre lo que usted guardará una entera reserva, excepto al padre, he conseguido copia de una gran parte de los manuscritos del Barón; la memoria sobre los caimanes y los asombrosos descubrimientos de este sabio sobre su organización interna, sobre su respiración, etc.; el viaje a Guadalupe, en que hago con mi medida un papel honroso”...

...“Tengo también sus observaciones sobre el zancudo; aquí admiraré los vastos, los profundos conocimientos de este sabio”...

...“Tengo sus observaciones astronómicas, una excelente instrucción sobre los pararrayos”...

En la carta del 21 de marzo a Santiago Arroyo³, alude Caldas a los comentarios consignados en el Diario sobre los trabajos barométricos de Mutis, y a la reserva del Barón acerca de usos y costumbres, pues, “todo lo escribe en alemán, para ocultarlo más”.

En la atormentada carta a Mutis del 6 de abril⁴, en la que Caldas da cuenta de la desilusionadora negativa del Barón, aparece una transcripción del famoso elogio, esta vez en francés. De aquí en adelante desaparecen las alusiones al Manuscrito de Humboldt en la correspondencia de Caldas, pero ecos de estas noticias han repercutido en las cartas de los amigos del payanés. Citaré aquí únicamente aquellas en las que hay alusión directa al manuscrito:

Carta de Antonio Arboleda a Santiago Pérez, Popayán enero 20 de 1802⁵.

Y otra de Antonio Arboleda a Santiago Pérez, Popayán marzo 20 de 1802⁶.

EL MANUSCRITO

El Barón de Humboldt anotaba las experiencias y observaciones realizadas en su viaje en cuadernos, en los que también redactaba memorias y monografías sobre asuntos específicos. Como esto era realizado simultáneamente en varios campos de actividad, se encuentran intercalados fragmentos que pertenecen, por una parte, a un “Diario Astronómico”, y a una serie de “Observaciones barométricas”, por otra a una “Relación de Viaje” propiamente dicho, y finalmente a unas memorias científicas, resultado de observaciones y experimentos llevados a cabo durante el viaje.

El “Diario Astronómico” consigna las observaciones del Sol y de las estrellas, de los eclipses de Sol y de Luna, de las ocultaciones de estrellas por la Luna, de las inmersiones y emersiones de los satélites de Júpiter, y de las distancias lunares, observaciones estas utilizadas para la determinación de las posiciones geográficas de los lugares por los que pasaba. Para el cálculo de las latitudes tomaba alturas meridianas del Sol o de estrellas, pero para la determinación de las longitudes la operación era

más compleja: periódicamente verificaba el estado de su cronómetro por determinación del tiempo por alturas del Sol, o alturas correspondientes del Sol o de estrellas; la comparación de su cronómetro con las observaciones astronómicas le servía para obtener la longitud; las observaciones absolutas de longitud como eclipses, ocultaciones y fenómenos de los satélites de Júpiter eran, naturalmente, de enorme valor. En este "Diario Astronómico" se encuentran valiosas informaciones sobre el sitio en que las observaciones fueron hechas, lo que permite precisar el lugar de residencia en una localidad, así como indicaciones diversas sobre el desarrollo del viaje. Las observaciones, objeto de un cálculo preliminar por el Barón, registrado en el mismo manuscrito, fueron luego analizadas, recalculadas y comparadas con las observaciones similares realizadas por otros observadores, anteriores o inmediatamente posteriores hechas en los mismos lugares, o con simultáneas llevadas a cabo en sitios diferentes, principalmente en los observatorios astronómicos europeos; este trabajo posterior fue hecho por Oltmanns y publicado poco después del regreso de Humboldt a Europa⁷. Naturalmente buena parte del manuscrito del "Diario Astronómico" no está "inédito", pues se encuentra incorporado en la citada publicación.

En cuanto a la relación de viaje que el Barón escribía en alemán, tampoco es este un relato continuo; interrumpido en numerosas ocasiones por diversos motivos era luego continuado y a veces vuelto a comenzar, lo que da lugar a repeticiones y a omisiones. El mismo Humboldt se quejaba de que la actividad social en las grandes ciudades le obligaba a interrumpir su escrito; de modo que en trayectos del camino en los que disponía de más tiempo, redactaba los trozos faltantes. Adiciones posteriores, con relatos históricos muchas veces, e innumerables notas y noticias, completaron este aspecto de los manuscritos. Estos relatos, en los que su franqueza y agudo análisis los hacen de gran valor documental, pueden considerarse inéditos.

Simultáneamente, como se dijo atrás, aparecen intercaladas las memorias científicas redactadas durante el viaje, casi siempre en francés, excepto aquellas de índole geológica y mineralógica que lo fueron en alemán. Muchas de estas memorias pueden haber servido de base o primer esbozo para algunas de las posteriores publicaciones del Barón, en su obra monumental "El Cosmos", o en artículos publicados en las revistas científicas. Aquellas partes del manuscrito, cruzadas con una raya en tinta, seguramente corresponden a esta categoría, como por ejemplo, la titulada "Sobre los mosquitos de América", redactada indudablemente en el Río de la Magdalena, pero incorporada a la relación de viaje por el Orinoco, publicada en el Capítulo 20 del libro 7º del "Voyage aux Régions équinoxiales du Nouveau Continent", al hablar de los mosquitos del Orinoco.

Si a toda esta falta de orden, causada por la simultaneidad de la redacción de los diversos asuntos en sus cuadernos de viaje, se agrega el desorden resultante de una encuadernación, a veces arbitraria, en los nueve libros en que ahora se encuentran, como puede verse en el índice general que más adelante se presenta, y luego se suma el cúmulo de notas marginales y de anotaciones en papelitos sueltos incorporados y agregados durante más de medio siglo, se tendrá una idea de lo que es el manuscrito conocido como "Diario Inédito".

HISTORIA DE LOS MANUSCRITOS

A su regreso a Europa inició Humboldt la publicación de los resultados de su viaje a la América Equinoccial, no con un relato histórico del viaje, así era lo usado en esa época, sino con la publicación de aquellos trabajos de mayor importancia científica y originalidad, en asocio de otros sabios. Ven así la luz sus trabajos astronómicos, barométricos y geográficos, luego del análisis y reducción de las observaciones hechas por Oltmanns en 1808 - 1810; los trabajos de botánica en los años 1808-1813.

Fue solamente hacia 1816 cuando el Barón se decidió a redactar la relación histórica de su viaje, de la cual es su base o fundamento el manuscrito de apuntes de viaje enriquecido con numerosas anotaciones y posteriores adiciones hechas durante los diez años transcurridos. Van apareciendo entonces en un lapso de otros diez años, los conocidos libros del "Voyage aux régions équinoxiales du Nouveau Continent", en los que el relato y las descripciones llegan hasta la partida de Venezuela hacia Cuba. En este punto el tercer editor de la serie, —tuvo esta obra tres diferentes, para la edición en octavo—, indica dificultades en la continuación de la publicación y anuncia que los dos próximos volúmenes, que serían los últimos, incluirán el "Ensayo Político sobre la Isla de Cuba" y el "Análisis Racional de la Carta de Cuba"; sin embargo, algunas impresiones de la obra incluyeron el relato de la travesía desde Cuba hasta la boca del Sinú, Cartagena y Turbaco, hasta llegar al Río de la Magdalena (Livre XI, Ch. XXIX).

La ruina económica que sus publicaciones le habían causado, las enojosas dificultades con sus múltiples editores, su viaje por Asia, y las nuevas ocupaciones del Barón en Berlín por esos años, obstaculizaron la continuación de la relación histórica de sus viajes. Estos motivos impidieron que hoy disfrutemos de una obra completa; pero el "Diario Inédito", con los apuntes, las noticias y memorias redactadas durante el viaje, y con las adiciones, anotaciones y materiales agregados posteriormente, representa la base para un relato no limitado solamente al recorrido por la actual Venezuela, la Isla de Cuba y los pasos iniciales de la travesía por Colombia.

Página 65 del "DIARIO INÉDITO", Libro VII a et b.

El diario de viaje a diferencia de las memorias científicas y de los registros de observaciones escritos en francés, está escrito en alemán. En esta hoja hay anotación sobre el cultivo y producción de cereales en el Reino de la Nueva Granada, con una comparación entre las temperaturas de los altiplanos andinos ecuatoriales y las de las llanuras bajas del oriente de Europa. Anota cómo los comerciantes y contrabandistas de Cartagena, interesados en la introducción de harina de Norteamérica, han impedido que prosperen los cultivos de cereales del interior, que en una época de protección llegaron a abastecer a las Antillas.

El original está en la "Deutsches Staatsbibliothek" de Berlín.

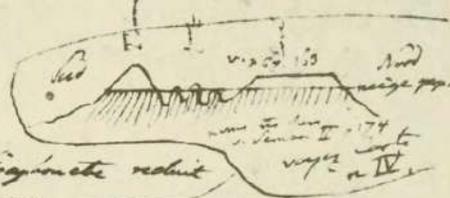
66.

mas distancias lat
 las recibes.

Materiales para formar el plano topografico del plano de Bogota
 Angulo gris en giron del Montserrat a 15 Agosto 1801.

Avec le Pol. Nord magnetique fait la plus au Nord en angle 85°

- + le Pol. de Jujuy le montagne de neige 88°
- + de milieu de 3 petite giron neige 99°
- + Tolima avec trouqui de neige 99°
- + Eclipse de S. Domingo 122° de la ville de
- + de S. Francisco 114° de la ville de
- + Chingaza (Napa de) 67°



De la ligne du Montserrat angles gris avec le Gironete redout

a l'horizon avec le Pol. Nord magnet: a l'est

+ Guadalupe 14° avec l'ind. a l'ouest: avec l'ind. a l'est

+ Guadalupe 16° distance de l'air 1 1/2 lieue marine

+ Bogota 85° (2 l.)

+ Salto de Tequimana 77° (3 l.)

+ Canoes 78° (2 l.)

+ Bogota avec le Pol. Nord et Ouest

+ Fontibon 62° (1 l.) Antioquiens 62° (14 l.)

+ Facatativa 67° (7 1/2 l.) boca del monte id.

+ Serequella 69° (2 l.)

+ Bogota 60° (2 l.) le village de Santa.

+ Tugaita 43° (1 1/2 l.)

+ Tuba (29) 1 1/2 l.

+ Tenjo 46° (2 1/2 l.)

+ Zorachoque 42° (5 l.)

+ Cota 19° (5 l.)

+ Chica 18° (3 1/2 l.)

+ Capica 2° (5 l.)

+ Sumas Pas avec le Pol. Nord magnet a l'ouest 8°

+ Pomas de Fomeque avec Pol. Nord a l'est 80°

+ S. Domingo (Egipe) avec Pol. Nord a l'ouest 71°

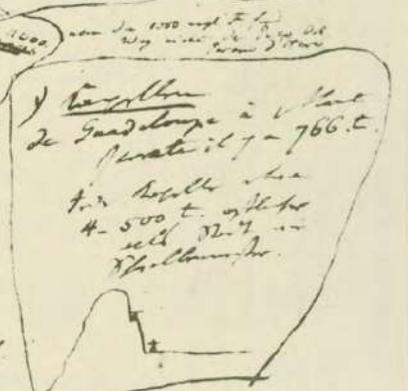
+ S. Diego (Egipe) avec Pol. Nord a l'ouest 56°

+ S. Barbara (Egipe) avec Pol. Nord a l'ouest 54°

+ Mapa de Chingaza avec Pol. Nord a l'est 2° (3 l.)

+ Wagon avec le Pol. Nord a l'ouest 18° (5 l.)

+ Taboic avec le Pol. Nord a l'ouest 18° (5 l.)



Declin magnet: a l'est S. Fe 7° 22'

* a Facatativa
 1-2 lieues de l'est
 du bord de la plaine

Novado de Tolima
 lat. 4° 46'
 lg. 77° 56'
 Abague, ville
 et 4027
 77° 40'
 de Tolima redout
 Nord 87° 18' Ouest.
 Jaja corrigé par
 la declin. magn.

De la Fe
 avec le
 Pol. Nord
 Novado de Tolima
 94° 40'
 Mapa de Chica
 67° 20'
 Fontibon 48° 50'
 (dit 44 lieues)
 Facatativa 60° 30'
 (dit 44 lieues)
 Canoes 87° 0'
 Bogota 82° 20'
 ces angles les
 plus.

Página 66 del "DIARIO INÉDITO", Libro VII a et b.

Materiales para formar el plano topográfico del Llano de Bogotá. Angulos tomados desde Monserrate el 15 de agosto de 1801, con las anotaciones que seguramente sirvieron a Humboldt para un mapa del Altiplano de Bogotá y que complementan los esquemas tomados durante el viaje a Zipaquirá y Guatavita, bocetos que fueron publicados en 1959 en la obra "Alejandro de Humboldt en Colombia" por Enrique Pérez Arbeláez, y que pertenecieron al doctor Rafael Martínez Briceño y y que al parecer hoy se encuentran en Alemania. (Véase "Alejandro de Humboldt 1769 - 1969", frente a Pg. 65, Inter Naciones, 1969. Bad Godesberg).

El original está en la "Deutsches Staatsbibliothek" de Berlín.

Página 206 del "DIARIO INÉDITO", Libro VII a et b.

Observaciones astronómicas hechas en Popayán a partir del 10 de noviembre de 1801, de estrellas en esa fecha y de Sol en los días 12 y 15.

Es en esta página donde aparece el tan conocido elogio a Caldas que se transcribe a continuación conservando la ortografía y algunos vicios del francés de Humboldt (tems por temps, verbi gratia).

"Dans un MSS. du docteur Caldas de Popayan j'ai trouvé l'observation de longitude suivante, qu'a fait cet amateur zélé de l'Astronomie. Il observa le 22 Dec. 1798 à Popayan l'Emersion du I Sat. de Jupiter à 7^h 1' 30" $\frac{1}{4}$ tems vrai. L'almanac dona pour Cadiz 11^h 42' 6" donc Popayan de 4^h 40' 35" $\frac{1}{4}$ à l'oc de Cadiz. Or Cadiz de Paris 34' 25" donc Popayan de 5^h 15' 0" à l'oc de Paris et (en mettant Quito avec les Conaiss. du tems de 80° 15' à l'oc de Paris) on aura diff. des Mérid. de Quito et Popayan d'après Mr. Caldas de 1° 30' (ou 6' en tems) tandis que Bouguer admet 1° 54' (7' 36"). J'ai non la manière de laquelle Mr. Caldas a trouvé le tems et j'ai vu avec plaisir qu'il a pris les haut. correspondentes de \odot à 4-5 secondes de certitude. Ce Mr. Caldas est un prodige en Astronomie. Né dans le tenebres de Popayan n'ayant jamais voyagé plus loin que jusqu'à S. Fe il s'est construit lui-même des Barometres, un Secteur, un Quart de Cercle de bois. Il tire des Méridienes, mesure la lat. par des Gnomons de 12-15 pieds ... Que ne ferait pas ce jeune homme dans un pays ou il a des moyens ou il ne faut pas tout apprendre par soi-même. Les ouvrages de Bouguer et de La Condamine out eu une influence singuliere sur les Américains depuis Quito à Popayan. Le sol de ce pays est devenue classique et on est tenté de lire ce qui se rapporte au sol natal. L'Audience de Quito a peu detruire Les Pyramides, mais elle n'a pas reussi d'etouffer cet étincelle de genie, que renâit de tems en tems dans ces pays et qui entraine dans la Carriere que les Bouguer et La Condamine ont ouvert!".

El original está en la "Deutsches Staatsbibliothek" de Berlín.

207

par la longit. du Pueblo de Perace
le 16 Nov. 1801 Orizaba Capa del Cara

11	28	37	—	77	0	10	5	housi a moment sans avoir été
	29	24	—		20		5	exposé dans des nuages pendant
	31	43	—	78	23	10		9 jours. Cette même cause a rendu
	32	29	—		42	10		applicable l'observation au 1 ^{er} Volcan

à Poyayan jour du départ (maison de S^t Francisco Niago)
le 27 Nov. 1801 Orizaba

12	38	41	—	104	10	10	24	53	39	au point donc retenu du	
	39	13	—		24	10		2	53	36	de 15 ^h en 27 ^h de l'J. H. H.
	40	11	—		41	10					de l'at. observé entre 64 ^h 29 ^h 30 ^h

à Almagre (Cape de S^a Juliana Nazorra) le 7 Dec. 1801

12	19	53	—	95	11	30	25	bonne a add 1' 40"
	20	35	—		29		50	bonne a
	22	15	—	96	8		50	bonne a
	23	3	—		26			bonne a

mais en supposant lat 1° 52' 27" et long 2° 51' 27" on suppose lat 1° 45' que Bouguer donne a l'at. Capa.

à Almagre le 7 Dec. 1801

11	18	3	—	59	43	20		de l'at. 58° 16' 54"
	21	17	—		43	35		lat. 1° 51' 57" donc dans le
	23	11	—		42	25		parallèle de S. Capa del Rio negro
	24	23	—		40	30		

Tache magnetique à Almagre. Donda non division

Incl. 21, 00 oscillat. en 10 min — Z18. Ne fait rien p. a S. Capa
20, 70 les del Rio negro dans le même parallèle mais
plus à l'at et de t. plus bas l'Inclin.
21, 75 start au nord. 23, 20. et les oscillations en
10' de temps Z10. à l'Inclin. de la terre
magnetique fait un angle de 10' avec le point a qui correspond

Puerto Plata

11	37	25	—	76	19	10	38	10	et
	38	16	—		38	10			part de la terre

le 19 Dec. 1801 Orizaba un peu d'at.

Inclina magn. à Puerto Plata
18, 80 osc. Z16 en 10'.
19, 30.

11	53	50	—	83	4	13	34	40	était corrigé de l'apari
	54	30	—		19	30	31	40	mi
	55	28	—		44	10			93° 4' 15" — ob 40' 0"

le 20 Dec. Dimanche à Puerto Plata Orizaba. bonnes.
add 1' 30"

Longitude de Poyayan

Amaguer et Puerto Plata. Orizaba le Condouire
D'après le Com. de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. Or Poyayan d'après l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 14' 24"
Cote de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 22' à l'oc. de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 22' Poy. 5° 14' 24"
après Bouguer de 1° 54' = 7' 36" à l'oc. de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 18' 16" mais la
D'après le Com. de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 15' 24" (p. 99) 5° 18' 16" mais la
Poyayan d'après un autre de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 14' 24" mais la
long. de Bouguer se fonde sur une fautive position de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 14' 24"
alors Poyayan plus occidentale que d'après Bouguer. p. 202. On suppose de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 14' 24"
Poyayan la distance à la mer a cap de chemin projeté par l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 14' 24"
Alcay mais d'en grande la longitude de cette cote que ni de l'at. de l'oc. de Paris p. 99. 5° 14' 24"

Página 207 del "DIARIO INÉDITO", Libro VII a et b.

Otra página del registro de observaciones astronómicas con indicación de las hechas en "Pueblo de Puracé" el 16 de noviembre y en Popayán el 29 del mismo mes, realizadas estas últimas en la casa de Don Francisco Diago (donde se alojó el Barón).

Las observaciones realizadas en Almaguer, en casa de don Gerónimo Mazorra, fueron hechas el día 7 de diciembre.

Humboldt observó en Pasto, el 19 y el 20 de ese mes, en la Plaza de esa localidad.

El estudio de la longitud de Popayán se inicia en esta misma página del "Diario".

El original está en la "Deutsches Staatsbibliothek" de Berlín.

A la muerte de Humboldt en 1859, pasaron sus manuscritos, casi lo único que por esos días no había quedado en poder de su ayuda de cámara, por legado testamentario, a manos de Encke, en ese entonces director del Observatorio de Berlín, amigo íntimo del Barón, y sucesor allí de Bode. Entre este legado se encontraban los nueve volúmenes encuadernados que fueron registrados en ese mismo año en una publicación hecha por Buschmann.

A la muerte de Encke, ocurrida en 1865, el manuscrito quedó archivado en el Observatorio con otros papeles de este notable astrónomo alemán, cuya principal contribución a la mecánica celeste, el método para la integración de trayectorias perturbadas que lleva su nombre, es hoy de empleo corriente tanto en Astronomía como en la joven Astronáutica. Pudo ocurrir también que, por esos días, pasaran los manuscritos a poder de la familia y fueran entonces llevados a Tegel, la residencia familiar. Hermann Schumacher estudió el manuscrito del "Diario" y basó en él buena parte de su conocido trabajo biográfico sobre Mutis, Caldas y Codazzi, publicado en 1884.

Transcurrieron luego largos años de olvido y completo desinterés y, bien sea del Observatorio de Babelsberg en Potsdam, o del castillo de Tegel, fue sacado el manuscrito por las fuerzas de ocupación soviéticas y llevado a Moscú. Allí, en la Biblioteca Lenin, fue identificado, clasificado, y más tarde devuelto, en 1959, a la Biblioteca Alemana del Estado, en Berlín, en donde ha estado a la disposición de los estudiosos y de la Comisión Humboldt de la Academia Alemana de Ciencias de Berlín. Uno de los primeros investigadores que lo conoció, Neftalí Zúñiga, divulgó su existencia. La oportunidad que la Academia de Berlín me brindó de estudiar estos manuscritos, así como la transcripción mecanografiada de la parte correspondiente al actual territorio colombiano, cristalizó en el convenio firmado entre la Academia Colombiana de Ciencias y la Academia Alemana de Ciencias de Berlín para la publicación del original y de la traducción de buena parte de los materiales pertinentes a Colombia.

El índice de los nueve libros encuadernados de los manuscritos inéditos, tal como apareció en *Auserordentl. Beilage zu Nr. 328 der Allg. Zeitung*, 24 november 1859, es así:

- I — Voyage d'Espagne aux Canaries et à Cumana - Observ. Astron. de Juin à Oct. 1799.
- II & VI — (8^o maj.): 1, Voyage à Caripe 1799 - 2, Observ. Astron. Apure - Orénoque - 3, Batabano (Cuba) à Sinu, Cartagena et Turbaco 1801 - 4, Quito 1802 Météor - 5, de Paris à Toulon Oct. 1798 - 6, Voyage d'Italie avec Gay Lussac - Observ. magn 1605.
- III — Voyage de Cumana et S. Fernando de Apure de Nov. 1799 a mars. 1799 (sic.).
- IV — Journal de la navigation sur l'Apure, l'Orénoque, Le Cassiquiare et le Río Negro (Voyage par les Llanos de Caracas à S. Fernando de Apure) - Statistique de Cumana - Punta Araya.
- V — Reise von Cumana nach der Havana (Altes vor der Reise - Dresden, Wien, Salzburg).
- VI — s. verbunden mit II.
- VII — a et b (fol.): Río de la Magdalena - Bogota - Quindíu - Popayan - Quito (Antisana, Pichincha) - Pasto - Volcan Tolima.
- VII — bb et c (ein bider Band fol. min.): Quito (Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Chimborazo, Altai) - Alausi Assuai - Cuenca - Loxa - Amazone - Caxamarca - Lima.
(Ibague à Carthago in 4^o) Popayan à Almaguer-Pasto à Quito (Los Pastos, Cumbal) Roches envoyées à Madrid - Voyage de Popayan à Almaguer (Quinquina, Malacates) Loxa - Trujillo - Lima.
- VIII — (fol.): Voyage de Lima à Guayaquil voy. de Guayaquil à Acapulco - Observ. Astron. de Mexique, Chronologie des mes voyages - Les deux Volcans de Puebla, Voyage d'Acapulco à México - Pachuca, Real del Monte.
- IX — (fol.) Varia: Observ. astr. de México a Guanajuato, Jorullo, Toluca, Veracruz, Cuba - Voyage de la Havane à Philadelphia, Geologie de Guanajuato, Volcans de Jorullo et de Toluca, Voyage de la Veracruz à la Havane et de la Havane à Philadelphia - Jorullo.

El contenido del "Diario Inédito" referente al recorrido de Humboldt por territorio de la actual Colombia, y aparte del trayecto por los ríos Orinoco, Atabapo y Río Negro, que se encuentra en II & VI - 2, Observ. Astron. Apure - Orénoque", y en el cuaderno IV - "Journal de la navigation sur l'Apure, l'Orénoque, le Cassiquiare et le Río Negro", material que sirvió de base para lo correspondiente publicado en el libro VII, capítulo XX, XXI, de la obra "Voyage aux Régions équinoxiales du Nouveau Continent", puede detallarse y ubicarse como sigue:

Libro II & VI: 3 — Batabano (Cuba) a Sinú, Cartagena et Turbaco (1801).

En esta parte del manuscrito, desde el folio 165, se encuentra lo siguiente:

Observación del eclipse de Luna del 29 de marzo 1801 en Punta Gigantes, isla de Barú.

página 166

Observaciones astronómicas hechas en Cartagena el 1º de abril para establecer la marcha del cronómetro. Longitud de Cartagena.	página 167
Cartagena, continuación de la longitud de Cartagena.	páginas 168 - 170
Relación del estado del Nuevo Reyno de Granada que hace el Arzobispo de Córdoba a su sucesor Gil y Lemos, 1789.	páginas 170 - 174
Turbaco - (Cartagena). Estadía en Turbaco, estudio de los volcanes de aire, etc.	páginas 175 - 184
Posiciones tomadas de los marinos españoles, croquis de la navegación desde Batabanó.	página 186
Viaje de la Havana a Quito - diario de observaciones astronómicas durante la navegación (Isla Mucara) en el folio 199, Río Sinú a Cartagena (folios 200 - 202).	páginas 187 - 202
Río Sinú.	páginas 202 - 203
Corozo, Palma dulce, Palmas.	páginas 204 - 205
Materiales de diversos viajes.	páginas 206 - 220
Libro VII a y b:	
Viaje por el Río de la Magdalena - relación de viaje de Turbaco a Mahates y a Barrancas Nuevas y luego remontando el Río Magdalena hasta Honda.	páginas 9 - 17; 22 - 24; 30 - 37
Experimentos sobre la respiración del cocodrilo, memoria en francés. Experimentos hechos durante la permanencia en Mompox.	páginas 17 - 22
Sobre los mosquitos de la América - memoria en francés escrita durante el viaje por el Magdalena. Un trazo sobre el manuscrito indica que este fue utilizado por Humboldt en otra publicación.	folios 24 - 29
Educación en Santa Fe.	folio 33
Comercio del Río Magdalena. (faltan los folios 41 - 43).	folios 39 - 40
Descubrimiento de las Quinas en Santa Fe, noticia histórica.	página 44
Viaje de Honda a Santa Fe - Descripción de Honda y del camino por Guaduas a la capital.	páginas 45 - 58; 61 - 64
Carta del Río de la Magdalena - Explicación de lo ocurrido posteriormente con las copias.	páginas 59 - 60
Cereales.	página 65
Materiales para el plano topográfico del llano de Bogotá.	páginas 66 - 67
Cerveza de Quina, nota sobre una bebida fermentada de Quina.	páginas 68 - 69
Viaje al cerro de Guadalupe. Descripción y observación realizadas allí.	páginas 69 - 73
La ciudad de Santa Fe. Relato histórico y descripción, nota sobre pintores.	páginas 74 - 78
Viaje a Monserrate - Relación del ascenso y observaciones realizadas.	páginas 78 - 82
Addenda et Corrigenda - Adiciones referentes al viaje por el Orinoco.	páginas 84 - 85
Observaciones astronómicas hechas después de la partida de Turbaco, abril 19, 1801. El manuscrito contiene aquellas hechas en Mahates y luego a lo largo del río hasta Honda, medidas de anchura del río en varios lugares, observaciones en Honda, Mariquita, Santa Ana y Santa Fe.	páginas 86 - 95
Longitud de Santa Fe, discusión de diversas observaciones.	páginas 96 - 98
Lugares del Río Magdalena levantados con la brújula. Longitudes corregidas a lo largo del río, observaciones hechas por Cabrer.	página 99
Continuación de observaciones en Santa Fe, discute la altura de la ciudad, observaciones magnéticas.	páginas 100 - 105
Chemin - relato histórico.	página 106
Viaje a Zipaquirá y al lago de Guatavita.	páginas 108 - 112 y 140 - 148
Viaje al Salto de Tequendama - Relación del viaje.	páginas 113 - 116 y 134 - 139
Meteorología después de abril de 1801.	página 117

Eau bouillante. Notas que incluyen observaciones hechas en diversos lugares de América. Tabla de observaciones hechas por Caldas.	página 130
Medidas barométricas.	página 131
Electricidad.	página 132
Biblioteca Pública de Quito.	página 149
Notas varias sobre elefante fósil de Chile, esmeraldas, fósiles de Soacha y Timaná y sobre mineralogía.	páginas 150 - 152
Viaje de Santa Fe a Popayán. Relación del viaje por Ibagué, Quindío y Valle del Cauca.	páginas 153 - 162
Medida del Tolima, operación trigonométrica desde las afueras de Ibagué.	páginas 163 - 165
Materiales para el plano de Popayán.	página 166
Obsidianas.	página 166
Viaje al Puracé - Relato del viaje, estudios geológicos, etc. Incluye estudio del agua del Río Vinagre (folio 184).	páginas 171 - 186
Barniz de Pasto. Monografía en francés.	páginas 188 - 190
Volcán de Pasto.	páginas 190 - 195
Notas varias.	página 197
Observaciones astronómicas hechas después del 20 de septiembre. Incluyen el eclipse de Luna del 21 en Ibagué, discusión de las longitudes obtenidas con el cronómetro.	páginas 198 - 202
Observaciones en Cali y Popayán (el famoso elogio a Caldas está en el folio 206), en Pueblo de Puracé, Almaguer y Pasto.	páginas 204 - 208
Observación hecha en Santa Fe, nota referente a observaciones de Caldas en Popayán.	páginas 216 - 217
Noticia biográfica escrita el 4 de agosto de 1801 en Santa Fe.	páginas 217 - 221
Notas sobre botánica y geografía de plantas.	páginas 255 - 264
Adiciones posteriores sobre el Chocó, la minería del platino y el oro y sobre la acuñación.	páginas 267 - 270
Viaje de Popayán a Almaguer.	folios A - F
Santa Fe. Relato sobre la permanencia en Santa Fe redactado en el camino a Pasto luego de la salida de Popayán.	folios 192,n - 194,n
Quindío - Relato del viaje por el Quindío.	folios 195,n - 201,n
Visión global geognóstica - Descripción de los Andes y geología.	folios 201,a - 213,n
Santa Ana - Monografía sobre la explotación minera en el pueblo vecino a Honda y Mariquita.	folios 215,n - 218,n
Cuatro planchas del Río Magdalena, dibujadas en Santa Fe.	folios 219,n - 220,n
Nota: En este cuaderno hay también abundante material correspondiente a la actual República del Ecuador: longitud de Quito (209 - 216). Medida del Cotopaxi (223 y 224), Pichincha (225 y 226). Provincia de Quito (228 - 232). Viajes al Antisana (232 - 248) y Pichincha (249).	
Libro VII bb et. c:	
Viaje de Pasto a Quito. Relación del viaje.	folios 202,n - 207,n

EL MANUSCRITO Y CALDAS

Para cerrar el ciclo iniciado con las noticias que da Caldas del manuscrito, reseñaré aquí algunas de las referencias al payanés que aparecen en estos manuscritos del Barón de Humboldt, y que pueden separarse en tres grupos: alusiones a Caldas consignadas en sus diarios, recogidas en Santa Fe, Popayán, principalmente, y Quito, ciudad esta última en donde trabajaron juntos en varias oportunidades; notas marginales añadidas con posterioridad al viaje y tomadas principalmente del "Semanario" publicado en Santa Fe, y finalmente documentos y cartas suministrados o enviados por Caldas a Humboldt y que se incorporaron a sus manuscritos. En orden de aparición en ellos, son:

Libro V:

Está incorporada al "Diario" de Humboldt una hoja manuscrita por Caldas con observaciones barométricas hechas en Popayán en los días 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 30 y 31 de mayo y 2 y 17 de junio de 1801. Hay un comentario al final agregado por Humboldt.

folio 113, recto y verso.

Libro VII a et VII b:

Cita referencias al temblor de Honda, el 16 de junio de 1805, tomadas de Caldas (Semanario), y de Restrepo.

página 46

Nota referente a la latitud de Santa Fe determinada por Caldas, tomada del Semanario; la compara con la propia.

página 98

Cita la observación barométrica de Caldas en Guadalupe que apareció en el "Correo Curioso", e incluye un cuadro de observaciones barométricas, hechas por Caldas, correlacionadas con las calculadas mediante fórmula, a partir de la temperatura de ebullición de agua. Información suministrada al Barón en Quito. Esta tabla es la misma que Caldas comunicó a Santiago Arroyo en carta del 5 de agosto de 1801.

página 117

Indica Humboldt que en compañía de Caldas ha hecho en Quito el 26 de marzo de 1802, una investigación más exacta de la altura barométrica de esa ciudad.

página 131

Nota tomada del Semanario sobre la altura del Tolima.

página 163

Nota referente a Caldas en la relación del Barón del ascenso al Puracé.

página 182

La famosa cita a la observación de emersión de un satélite de Júpiter por Caldas y conocido elogio, escrito por Humboldt a su paso por Popayán, a la vista de los trabajos astronómicos del payanés, ausente en Quito.

página 206

Al estudiar la longitud de Quito, dice el prusiano que la observación del primer satélite de Júpiter hecha por Caldas lo ha consolado y le ha hecho inspirar confianza en sus longitudes conseguidas con el cronómetro.

página 216

Notas tomadas de Caldas y Restrepo.

página 228

En la relación del viaje al Antisana, nota referente a Caldas y a Acosta.

página 234

En el relato sobre las pirámides de Quito, hay nota referente al Semanario.

folio sin número.

Libro VII bb et c:

Está el manuscrito incompleto de la Carta de Caldas a Humboldt, Otavalo, 17 de noviembre de 1802, registrada como

folios 474 - 476 y 475.

NOTAS

1. POSADA, EDUARDO. Editor.
Cartas de Caldas. Bogotá, Imprenta Nacional, 1917. pp. 114 - 120.
2. _____
Cartas de Caldas. pp. 125 - 127.
3. _____
Cartas de Caldas. pp. 133 - 141.
4. _____
Cartas de Caldas. pp. 146 - 152.
5. _____
Cartas de Caldas. pp. 321 - 324.
6. _____
Cartas de Caldas. pp. 325 - 329.
7. OLTMANNNS, JABBO.
1808 - 10 *Voyage d'Alexandre de Humboldt et Aimé Bonpland. Quatrième Partie: Astronomie et Magnétisme. Recueil d'Observations Astronomiques d'Operations trigonometriques, et de Mesures Barometriques, faites pendant le cours d'un voyage aux Régions Equinoxiales du Nouveau Continent, depuis 1799, jusqu'en 1803, redigées et calculées, d'après les tables les plus exactes. Par Jabbo Oltmannns. Paris, Chez F. Schoell Imprimerie de L. Haussman.*

EL MAPA DE HUMBOLDT DEL RÍO MAGDALENA

Por JORGE ARIAS DE GREIFF

Las dos semanas que el Barón esperaba pasar en Santa Fe se convirtieron en otros tantos meses, pues la permanencia se alargó mientras Bonpland se restablecía de sus dolencias. Humboldt aprovechó este tiempo en diversas tareas, entre ellas el dibujo del mapa del Río de la Magdalena, cuyo curso había remontado durante los meses inmediatamente anteriores, abril, mayo y junio, del año de 1801. En su "Diario" y en la correspondencia dejó indicaciones al respecto: Dice así en el "Diario"¹ . . . "ese retardo me dio, por otra parte, la oportunidad de terminar el mapa del Río Magdalena en cuatro hojas, de calcular mis observaciones astronómicas", . . . En carta a su hermano Wilhelm², dice: "Dibujé el plano topográfico del río Magdalena en cuatro hojas, de las cuales di al Virrey una copia".

Hermann Schumacher en su conocida obra³ alude a las tareas realizadas por Humboldt en Santa Fe y, concretamente al mapa, diciendo así: "En primer lugar entregó a Mutis y al Virrey, un dibujo que se encontraba en cuatro hojas, del Río Magdalena desde la boca hasta los rápidos de Honda". Phil Hakspiel⁴, basado en Schumacher, agrega a las noticias anteriores la siguiente observación: "El original de este diseño, dibujado con lápiz en cuatro hojas, se halla todavía entre los papeles dejados por el autor".

Posteriormente a su estadía en Santa Fe agregó el Barón al manuscrito de lo que hoy se conoce con el nombre de "Diario Inédito", una larga noticia motivada por una serie de hechos a los que su trabajo cartográfico y la copia dejada habían, mientras tanto, dado lugar. Dice así Humboldt⁵: "Yo he permitido hacer una sola copia de mi Carta para el señor Mutis en Santa Fe. Parece que el señor Cabrer ha hecho copia de esta copia para el Virrey Mendinueta (y) que otra ha sido enviada a Cartagena al señor Pombo". Durante el viaje de regreso a Europa, Humboldt, en 1804, se encontró en la Habana con Mendinueta; por él supo el interés de la corona en los trabajos cartográficos que había realizado en el virreinato, pues Mendinueta le dijo haber visto una orden del Rey, del año anterior, deseando saber la exactitud de tales trabajos, y aunque aceptó haber enviado copia del mapa a Cartagena negó haberlo hecho también a Madrid. El Barón, en la larga anotación a que aquí se alude, se queja de que, habiendo hecho él el primer croquis del Magdalena, mientras se dedicaba a la anatomía comparada, los españoles, que han recorrido su curso durante trescientos años, hubiesen manifestado interés por este trabajo, pero para poner en duda su exactitud,

y que hubieran enviado a Talledo, con algunos pilotos de Cartagena desprovistos de instrumentos adecuados para verificarlo.

En el primer tomo de la obra del General Antonio B. Cuervo⁶, y en un apéndice que contiene un inventario de mapas colombianos existentes en el depósito hidrográfico, figura, en el "Índice de Planos", Primera Serie, Nro. 7, la siguiente mención: "Río Magdalena por Humboldt 4 planchas". ¿Es esta la copia que Mendinueta negó haber mandado a Madrid, envió que en realidad sí hizo?, o bien, ¿es la copia enviada a Pombo en Cartagena, que luego pasó al Apostadero Naval y de allí, rutinariamente, al Depósito Hidrográfico en la Madre Patria?

Los bocetos del curso del río.

Hizo Humboldt numerosas observaciones astronómicas a lo largo del viaje por el río con la finalidad de determinar la posición geográfica de lugares del curso del Magdalena; la lista es la siguiente: Barrancas Nuevas del Rey, Isla del Cotorreo, Hacienda de Pinto, Mompo, El Regidor, Morales, Badillas, Paturria, Isla de las Brujas, Garrapatas, Resguardo del Carare, Boca de Nares, Guarumo y Honda. Desde algunos de estos sitios realizó triangulaciones y tomó rumbos que le permitieron fijar la ubicación de otros lugares y completar algunos detalles. Además los tiempos de navegación le permitieron inferir la situación de lugares intermedios en el curso del río. Los así determinados, de una menor exactitud que aquellos en los que hizo observaciones astronómicas, fueron los siguientes: Boca del Opón, Boca del Sogamoso, Palmar, Santa Martica, San Agustín, Tenerife, Zambrano, Guasimal, Tetón, Isla de Pedrito y Buena Vista.

Entre los manuscritos inéditos que integran el "Diario", que se pueden consultar hoy en la Biblioteca Alemana del Estado en Berlín, se encuentran dos hojas, dibujadas por ambos lados, con los bocetos del curso del río, registradas como folios 219 y 220 del Libro VII a et b. Contiene el folio 220, en uno de sus lados, el dibujo del río desde Barrancas Nuevas hasta Pinto, con un detalle del curso del Bajo Cauca, la boca del San Jorge y el brazo de Loba. Notas a lado y lado del dibujo informan sobre los tiempos de navegación entre los lugares de las orillas, y hay una indicación con el título de "Primeros esquemas del curso del Río Grande de la Magdalena", con una explicación de los métodos empleados para realizar el

trabajo. En el mismo folio, por el otro lado, está el curso desde Pinto hasta Morales con una discontinuidad en el dibujo pues el croquis se salía del papel, lo que indica que estaba siendo dibujado "in situ". Las notas que en esta página aparecen se refieren a la temperatura del agua en el río, a los tiempos de navegación entre lugares, y, una agregada posteriormente, al Danubio.

El folio 219 contiene, de un lado, el dibujo desde Morales a la boca del Nare, con las respectivas duraciones de navegación y una nota sobre la manera de obtener las distancias entre lugares; y por el otro, el dibujo final de Nare a Honda. Debe anotarse que la numeración por folios no corresponde al orden de los dibujos, es la puesta en Moscú. La original de Humboldt, cuando existe, numera las páginas.

Una hoja adicional, la página 99 del Libro VII a et b del "Diario", en la que recopila los resultados preliminares de las observaciones astronómicas y anotó otros trabajos a lo largo del río, fue sin duda elaborada en Santa Fe, previamente a la tarea de dibujar el mapa en cuatro hojas. Las observaciones de Cabrer realizadas en el altiplano, que Humboldt incorporó a sus trabajos astronómicos⁷, están consignadas aquí mismo.

Se reproducen en facsímil, para ilustrar estas notas, las cinco páginas del "Diario Inédito", a las que se acaba de hacer mención.

Las observaciones astronómicas y barométricas, realizadas y consignadas durante el curso de la navegación, se encuentran en el citado "Diario", registradas como páginas 86 a 94 del Libro VII a et b.

El Mapa descubierto en Bogotá.

El motivo principal de esta nota es el mapa que acaba de descubrir el Académico doctor Eduardo Acevedo Latorre en la Biblioteca "Luis Angel Arango" del Banco de la República, en Bogotá. Se trata de un dibujo original en cuatro secciones, que luego fueron unidas y pegadas a una tela. El mapa tiene unas dimensiones generales de 32 cms. x 142 cms. Las particulares de cada una de las cuatro secciones, como se encuentran hoy, de Norte a Sur son: 31,7 x 28,4; 31,6 x 36,5; 31,6 x 38,4; 31,6 x 38,8. El mapa está dibujado en papel similar al que el Barón empleó para los cuadernos de su "Diario", y que es el mismo que utilizó en el dibujo original para la Geografía de las Plantas, que también posee la citada biblioteca, y el mismo en el que hizo escribir un informe para el Capitán General de Caracas, que reposa en el Archivo del historiador José María Restrepo; este tipo de papel no parece encontrarse en nuestros archivos sino en los mencionados documentos, todos directamente relacionados con el paso de Humboldt por estas tierras. Por otra parte, la calidad del trabajo cartográfico, la finura del dibujo del río y la presentación general, hacen decir a

los eruditos que no había en Santa Fe quién pudiese realizar un trabajo de calidad similar. Quizá se exceptúe Cabrer, a quien el Barón personalmente culpó de la copia o copias que del mapa se hicieron a su partida.

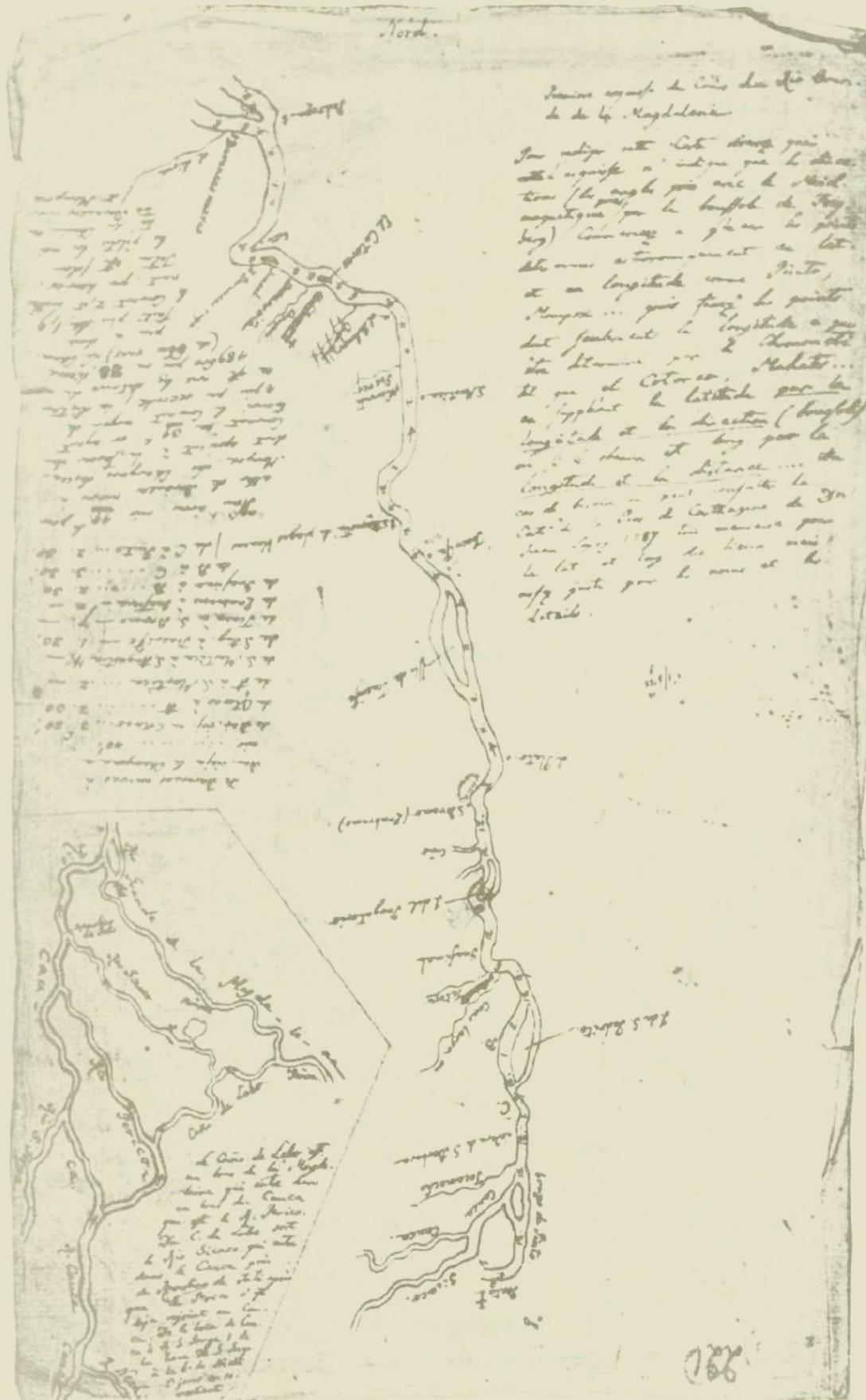
En cuanto a la relación entre los bosquejos y el mapa, un rápido examen muestra cómo los lugares de las orillas, afluentes del río y demás accidentes geográficos que aparecen en los primeros, son casi totalmente los mismos que están consignados en el segundo, con algunas variaciones en la ortografía, que el Barón tomó muchas veces de oídas y que luego en Santa Fe, pudo tener oportunidad de rectificar. Un caso, por ejemplo, es el siguiente: el nombre "S. Bramo", es modificado luego en el bosquejo e indicado entre paréntesis como "Zanbramo" y corregido en el mapa como "Zambrano"; pero esto no fue hecho en forma sistemática, pues otros errores persisten tal como quedaron en los bosquejos. Claro está que el mapa elaborado en la capital del virreinato incluye mucha información adicional, tanto la tomada por Humboldt en su viaje terrestre desde Honda y en sus excursiones a los alrededores de Santa Fe, como la obtenida en la consulta de los archivos y bibliotecas coloniales, además de los datos proporcionados por los levantamientos de Cabrer.

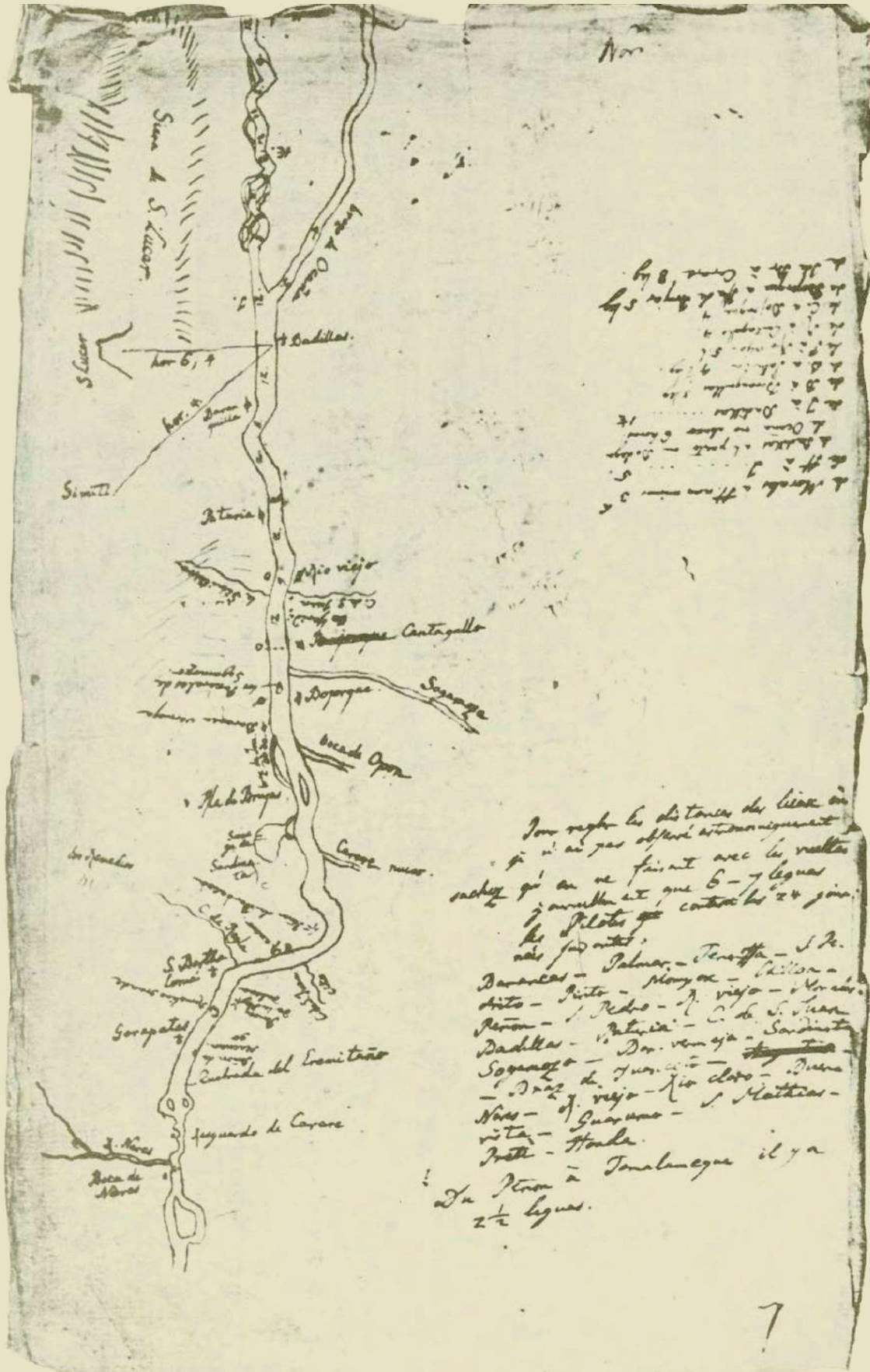
Un detalle interesante del mapa lo constituye la cartela de la Angostura del Carare y boca del río Nare y el trazo de un túnel propuesto para salvar los rápidos mediante un canal utilizable por las embarcaciones. Numerosas noticias e informaciones adicionales sobre el río y los cuadros de resultados de las observaciones científicas, realizadas durante la navegación, complementan este magnífico hallazgo.

Es esta, a mi modo de ver, la copia, hecha en Santa Fe por el propio Humboldt, y dejada a Mutis, como lo indica en el pasaje del "Diario"⁵. Si bien en la carta a su hermano dice el Barón haber dejado el mapa al Virrey, lo que hizo más tarde decir en forma ambigua a Schumacher³, quien seguramente conoció ambos textos, que el prusiano entregó la copia a Mutis y al Virrey, parece más seguro aceptar la cita del "Diario" en vez de lo comunicado en la carta², la que por otra parte es, en algunas otras informaciones, inexacta. El mapa reseñado por Cuervo como existente en Madrid debe ser entonces una de las copias no autorizadas por Humboldt y elaboradas inmediatamente después de su partida.

El Mapa publicado en el Atlas.

De los diseños llevados a Europa por el Barón, aquellos esquemas dibujados durante la navegación y que hoy se encuentran entre los manuscritos del "Diario Inédito", y el mapa dibujado durante la permanencia en Santa Fe, complementados, tanto con las informaciones geográficas que sobre la provincia de Antioquia y el curso del río





Página 99 del "Diario Inédito" de Humboldt.
Libro VII a et b.

Cauca le suministró José Manuel Restrepo, como con el mapa del Magdalena desde sus fuentes hasta los cuatro grados de latitud que Francisco José de Caldas le entregara en Quito, y con el diseño de las costas vecinas a la desembocadura, tomado de los trabajos y mapas de la expedición Fidalgo, que el jefe de Escuadra don José de Espinosa y Tello había ya divulgado en el viejo continente⁸, hizo Humboldt dibujar y grabar un mapa por Michaelis, el cual se publicó incluido en la obra "Atlas Geographique et Physique du Nouveau Continent", París, 1814, en donde figura como plancha 24⁹.

Este mapa, hoy casi desconocido, tuvo mucha influencia en nuestra cartografía, así como el que ilustró la edición tan conocida del "Voyage aux Régions équinoxiales du Nouveau Continent"¹⁰. Muchos de los mapas colombianos de la primera mitad del siglo XIX se basaron en aquellos que Humboldt hizo grabar y publicar en sus obras, y copiaron sus aciertos y yerros. Una curva acentuada del río, que aparece en ellos, no lejos de la Boca del Opón, y que por otra parte no se ve en los dibujos de Humboldt, bien sea en los bocetos hechos en el viaje o en el dibujo de Santa Fe, fue religiosamente incluido en los mapas de Restrepo y de Mosquera y sólo desapareció con los trabajos posteriores de Codazzi.

Vale la pena añadir que en la Cartografía Colombiana fueron incorporados los trabajos de la expedición de Fidalgo a través, precisamente, de los mapas de Humboldt.

CONCLUSIONES

Las cuatro páginas, folios 219 y 220, del Libro VII a et b, hoy en la Biblioteca Alemana del Estado en Berlín, son los esquemas dibujados durante la navegación por el Magdalena.

La copia hecha por el Barón, del mapa en cuatro hojas, y dejado a Mutis, es el mapa descubierto por Acevedo Latorre en la Biblioteca Luis Angel Arango, en Bogotá, en donde se encuentra en la actualidad.

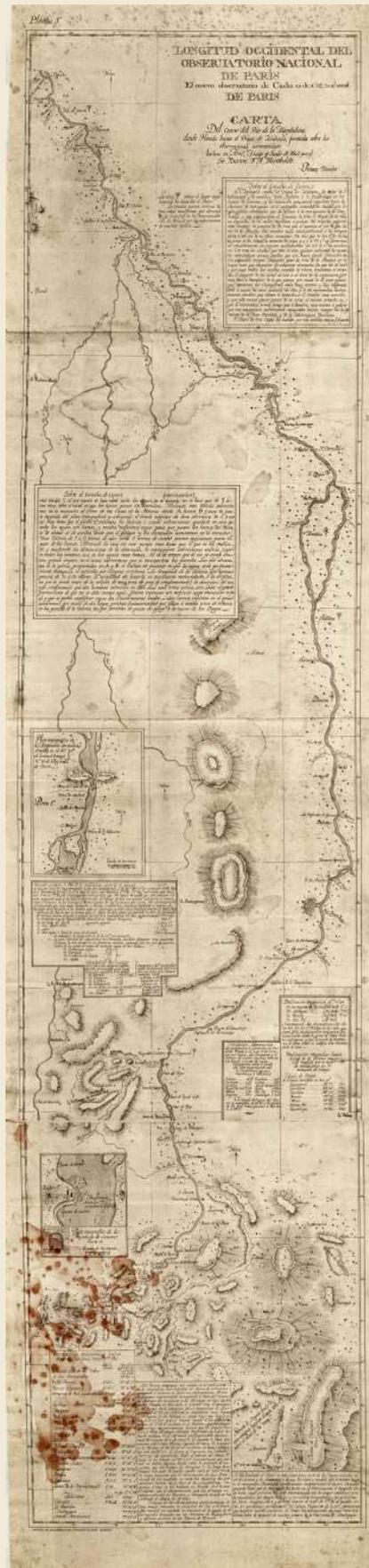
Una de las copias no autorizadas por Humboldt, reposa, o al menos se encontraba al finalizar el siglo XIX, en el Depósito Hidrográfico de Madrid.

El ejemplar del mapa en cuatro secciones, que el Barón llevó consigo a Europa y que fue la base, seguramente, para el mapa del Magdalena, publicado en su "Atlas" en 1814, no se encuentra, al menos con los manuscritos del "Diario Inédito", entre los papeles de Humboldt.

Ilustran estas notas los facsímiles de los esquemas que el Barón trazó en el viaje y cuyos originales, como se dijo ya, reposan en la Biblioteca Alemana del Estado en Berlín, y una reproducción, a tamaño natural, del mapa dibujado en Santa Fe. Agradece el autor las filminas de los primeros que le facilitó la Biblioteca de Berlín, y la autorización para reproducir el mapa que gentilmente le concedió la Biblioteca Luis Angel Arango.

NOTAS

1. ALEJANDRO DE HUMBOLDT. "Diario Inédito", Libro VII a et b, página 108. Biblioteca Alemana del Estado, Berlín.
2. Véase, por ejemplo: ENRIQUE PÉREZ ARBELÁEZ: "Alejandro de Humboldt en Colombia", página 211, Bogotá, 1959. Editorial Iqueima.
3. HERMANN SCHUMACHER. *Südamerikanische Studien, Drei lebens und Cultur-Bilder*. Mutis, Caldas, Codazzi, página 119, Berlín, 1884.
4. PHIL HAKSPIEL: Alejandro Humboldt en sus relaciones con Colombia y Venezuela, Boletín de Historia y Antigüedades, N° 90, 1912.
5. ALEJANDRO DE HUMBOLDT. "Diario Inédito", Libro VII a et b, páginas 59 y 60.
6. ANTONIO B. CUERVO: Índice de Planos importantes para Colombia que existen en el Depósito Hidrográfico de Madrid, en: "Colección de Documentos Inéditos Recopilados por Antonio B. Cuervo", Bogotá, 1891, páginas 533 - 541.
7. OLTMANNS JOBBO: "Voyage aux Régions Equinoxiales du Nouveau Continent. Recueil d'observations astronomiques d'operations trigonometriques et de mesures barometriques... Astronomie et Magnetism". Tomo II, Libro VI, páginas 237 - 238 y página, 246 París, 1808.
8. ESPINOSA y TELLO JOSÉ DE: "Carta Esférica del Mar de las Antillas y las costas de Tierra Firme...". Londres, 1810.
9. HUMBOLDT, A. DE: *Atlas Géographique et Physique du Nouveau Continent...* Paris, 1814.
10. ATLAS DE COLOMBIA. Bogotá, Lit. Arco, 1967. Plancha N° 21.



Imaginarios de naturaleza y el futuro de la biodiversidad

● Luis Germán Naranjo

WWF Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 20 de junio del 2019

Resumen

La aceleración creciente de la crisis ambiental global demanda con urgencia respuestas contundentes de la comunidad de naciones y de la sociedad. A pesar del incremento de la conciencia colectiva acerca del deterioro de la biodiversidad y de los numerosos instrumentos, políticas acuerdos y convenios internacionales existentes para enfrentar este problema, los indicadores del estado de los ecosistemas, especies, poblaciones y servicios ecosistémicos continúan su declive incesante. Es necesario por lo tanto poner en marcha acciones distintas a las que hasta ahora han producido las numerosas iniciativas emprendidas durante los últimos cincuenta años, orientadas a la construcción de un poderoso imaginario social de naturaleza encarnado en todos los niveles de la sociedad.

Palabras clave: Biodiversidad; Imaginarios sociales; Ambientalismo; Conservación.

Nature imaginaries and the future of biodiversity

Abstract

The ongoing acceleration of the global environmental crisis calls for urgent and powerful responses both from the nations and the society. Despite the increasing consciousness about the deterioration of biodiversity, and the number of existing instruments, policies, agreements and international conventions to face this problem, indicators of the status of ecosystems, species and populations are in constant decline. It is thus necessary to initiate a new set of actions, different from those derived so far from the initiatives that have been launched over the last 50 years, aimed at the construction of a powerful social imaginary of Nature to be incarnated at all levels of society.

Key words: Biodiversity; Social imaginaries; Environmentalism; Conservation.

Introducción

A partir de la creación “oficial” del movimiento ambiental, con la celebración del primer día de la Tierra el 22 de abril de 1970, la sociedad global ha recibido advertencias cada vez más frecuentes y alarmantes sobre el deterioro de los ecosistemas, la disminución de poblaciones de vida silvestre, el número creciente de especies amenazadas de extinción y la pérdida progresiva de lo que hoy conocemos como servicios ecosistémicos. Pero hasta la publicación de los boletines de prensa que anunciaron el último informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) a finales del 2018, los medios de comunicación masiva nunca habían divulgado la noticia de una fecha límite para una crisis que podría cambiar de forma irreversible las condiciones de vida en el planeta.

La información recopilada en dicho documento precisa que, a menos que la humanidad consiga disminuir en un 45 % las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) para el

año 2030, será imposible cumplir con la meta de estabilizar el incremento de la temperatura global sin sobrepasar en más de 1,5° C el promedio de la era preindustrial (**Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2018). Este límite se considera crítico, pues sobrepasarlo implicaría consecuencias tan devastadoras como la pérdida total de los arrecifes de coral, un incremento de 10 cm del nivel medio del mar, la alteración drástica en la distribución de cosechas tan importantes para la humanidad como el arroz, el maíz y el trigo y, desde luego, la modificación de la composición de biotas regionales como resultado de la desaparición de muchas especies y el desplazamiento geográfico de otras (Hoegh-Guldberg, *et al.*, 2018).

Correspondencia:

Luis Germán Naranjo, Ignaranjo@wwf.org.co

Recibido: 8 de enero de 2019

Aceptado: 3 de mayo de 2019

Editor: Elizabeth Castañeda

Por otra parte, este límite temporal permite abrigar la esperanza de que al fin se lograrán las respuestas contundentes que otros anuncios no han conseguido obtener del concierto de naciones, a pesar de su alarmante contenido. Por mencionar unos pocos casos sobresalientes, ni la evaluación de ecosistemas del milenio (**Millennium Ecosystem Assessment Program**, 2005), ni la determinación de la transgresión de los límites planetarios hecha por el Centro de Resiliencia de Estocolmo (**Rockström, et al.**, 2009; **Steffen, et al.**, 2015), ni el anuncio del inicio de la sexta extinción masiva de especies (**Ceballos, et al.**, 2015), consiguieron poco más que una abundante cobertura noticiosa.

Si bien es cierto que, en gran medida, el cuerpo de información científica que documenta el cambio global ha sido responsable de los avances en materia de gestión ambiental a diferentes escalas, también lo es que la humanidad se encuentra lejos de asumir la responsabilidad que le corresponde en la protección y el manejo responsable del patrimonio natural. Como lo ha puesto de relieve la última versión del Informe Planeta Vivo (**Grooten & Almond**, 2018), el continuo y marcado descenso de varios indicadores de la pérdida de la biodiversidad global con respecto a la línea de base de 1970, demuestra el alcance limitado de las acciones resultantes de los compromisos políticos de los países para frenarlo. Según lo señaló la Dra. Anne Larigauderie, Secretaria Ejecutiva de la Plataforma Intergubernamental Científico-normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (*Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, IPBES): “...el fracaso en asignar prioridad a políticas y acciones tendientes a detener y revertir la pérdida de diversidad biológica, y la continua degradación de las contribuciones de la naturaleza a las personas, pone en serio peligro las posibilidades de cualquiera de las regiones y de casi todos los países de lograr sus objetivos de desarrollo a nivel mundial” (**IPBES**, 2018).

Lo apremiante de estos nuevos llamados de alerta lleva a preguntarse cuáles son los impedimentos para lograr medidas mucho más efectivas de protección del patrimonio natural. Pues a menos que la humanidad logre eliminar dichas barreras, nos veremos abocados a la pérdida irreversible de las condiciones que hicieron posible su florecimiento.

Hitos y limitaciones en la construcción del ambientalismo

Desde la celebración del primer día de la tierra en 1970 hasta el final del siglo XX, la conciencia pública sobre los problemas ambientales creció de manera exponencial. Esto se tradujo en el desarrollo de una amplia y compleja legislación sobre el tema en la inmensa mayoría de los países, en el establecimiento de derechos y obligaciones ciudadanas, en la definición de funciones del Estado y de los organismos públicos responsables en materia ambiental, en la formulación y aplicación de políticas ambientales de distintas escalas y en la defensa del derecho ciudadano

a un ambiente sano (**Rodríguez-Becerra & Espinoza**, 2002). Este desarrollo es atribuible, en gran medida, a la serie de conferencias convocadas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) para abordar los problemas relacionados con el deterioro del patrimonio natural de la Tierra, en las cuales se empezó a construir paulatinamente la agenda ambiental global que desembocó en instrumentos tan importantes como las tres convenciones internacionales: Cambio climático, Diversidad biológica y Desertificación, formuladas en la cumbre de Río de Janeiro en 1992 (**Guhl-Nannetti & Leyva**, 2015).

Sin embargo, una mirada retrospectiva a la relativamente breve historia del ambientalismo global también revela que, a pesar de los importantes logros conseguidos hasta ahora, las raíces de los problemas que se pretenden atacar siguen tan robustas y afianzadas como siempre. Por una parte, y como también lo señalan **Guhl-Nannetti & Leyva** (2015), las convenciones originadas en la cumbre de Río han abordado los síntomas de los impactos antropogénicos sobre la naturaleza, pero no atacan sus causas. En consecuencia, los motores del cambio ambiental continúan operando y el deterioro de la biosfera se hace cada vez más profundo. De acuerdo con estimaciones recientes, menos de la tercera parte de las ecorregiones terrestres están relativamente libres de modificación antrópica, en tanto que la quinta parte se ve alterada extensivamente por la intervención del hombre y su fisonomía está dominada por asentamientos humanos, sistemas de producción agropecuaria, redes de infraestructura lineal y actividades industriales (**Kennedy, et al.**, 2019).

La degradación y la pérdida de ecosistemas, sumadas a factores tales como la sobreexplotación, la expansión de especies invasoras y las alteraciones del clima a distintas escalas, continúan causando la disminución de un número cada vez mayor de poblaciones de vida silvestre. Entre 1970 y 2014 la abundancia promedio de 16.704 poblaciones de 4.005 especies de vertebrados declinó en un 60 % (**Grooten & Almond**, 2018). Esta reducción es un indicio del riesgo creciente de extinción de muchas especies: los valores actuales del Índice de la Lista Roja de especies de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), correspondiente a los cinco grupos taxonómicos en los cuales se han evaluado todas las especies por lo menos dos veces (Aves, Mammalia, Amphibia, Anthozoa y Cycadaceae), van en disminución, lo cual refuerza la preocupación por la aceleración de las tasas de extinción de muchos tipos de organismos (**Butchart, et al.**, 2018).

El desfase entre los instrumentos para abordar la problemática ambiental y los resultados conseguidos (Figura 1), también es evidente en otras escalas geográficas. A pesar de que la gesta ambientalista en América Latina siguió de cerca e incluso contribuyó a perfilar las tendencias globales en materia de conservación y uso sostenible de la biodiversidad (ver, por ejemplo, el papel visionario de la Convención del Hemisferio Occidental para la Protección de la Naturaleza

y la Vida Silvestre, negociada bajo los auspicios de la Unión Panamericana en **Rodríguez-Becerra & Espinoza, 2002**), su declinación en la región ha sido vertiginosa. La disminución media anual del índice planeta vivo para el Neotrópico entre 1970 y 2014 fue de 4,8 % y, aunque su cálculo representa apenas las tendencias poblacionales de 1.040 poblaciones de 689 especies de vertebrados (**Deinet, et al., 2018**), una disminución total de 89 % hace presumir que la situación de una de las biotas más ricas del planeta se encuentra en estado crítico.

Por último, el mismo desfase discutido para las escalas global y regional, se presenta a escala nacional y es particularmente notable en Colombia (Figura 2).

Además de haber contado con instrumentos legislativos y de política ambiental desde el inicio de la era republicana (**Rodríguez-Becerra & Espinoza, 2002**), la nación ha sido una abanderada en materia de formulación de políticas ambientales, en paralelo con la evolución de distintos instrumentos en el plano internacional, como se ha puesto de relieve en el análisis histórico recogido en el Plan Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos (**Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012**). Con la Constitución Política de 1991, el país elevó el manejo y la protección de los recursos naturales y el medio ambiente a la categoría de norma constitucional, es decir, se reconoció la obligación del Estado y

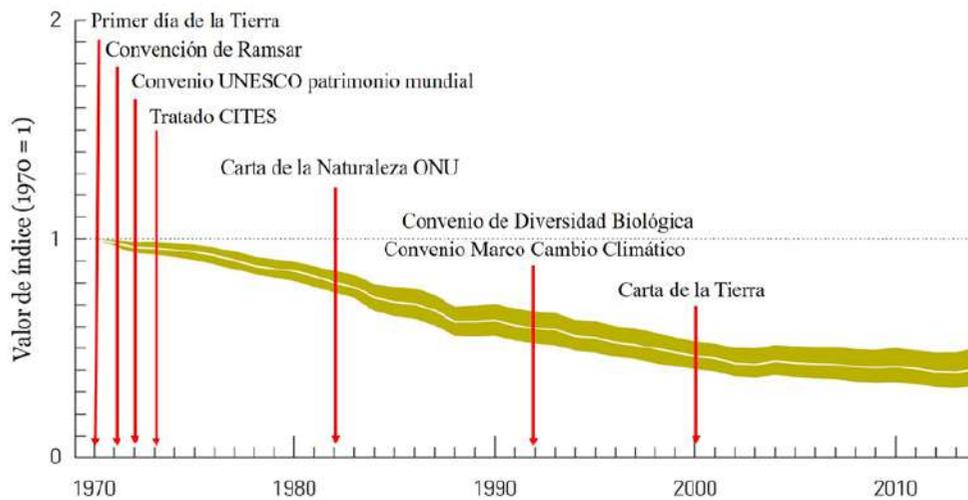


Figura 1. El desempeño limitado de la gestión mundial de la biodiversidad: algunos hitos históricos del ambientalismo global a partir de 1970 y el Índice Planeta Vivo. Fuente: elaboración propia a partir de la figura 20 en **Deinet, et al. (2018)**.

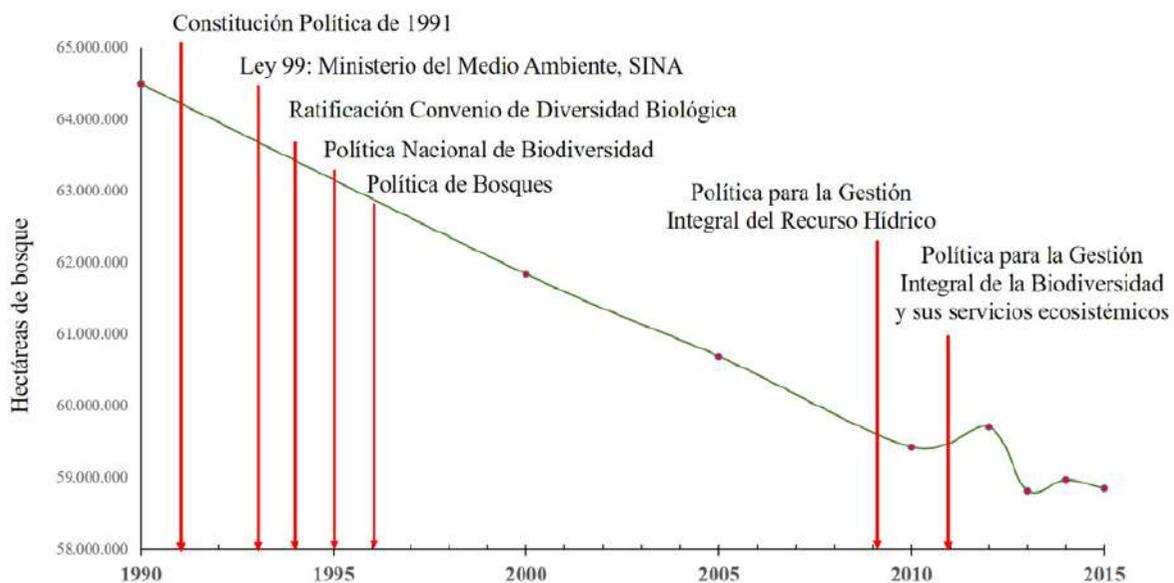


Figura 2. Pérdida de la cobertura forestal en Colombia desde 1990 y algunos desarrollos de la gestión ambiental en el país en el mismo período. Fuente: elaboración propia a partir de datos de **IDEAM (2015)**.

las personas de proteger las riquezas culturales y naturales nacionales, estableciendo el derecho de los colombianos a tener un ambiente sano y adoptando el desarrollo sostenible como modelo para orientar el crecimiento económico, el mejoramiento de la calidad de vida y el bienestar social de la nación. Desde entonces, es innegable que el estado colombiano ha hecho importantes esfuerzos para mejorar la gestión del patrimonio natural, entre los que se cuentan la creación y puesta en marcha de su sistema ambiental, la ratificación de numerosos acuerdos, convenios y convenciones internacionales para la conservación de la biodiversidad, el desarrollo de normas e instrumentos y el incremento significativo de la cobertura de sus áreas protegidas.

A pesar de estos avances, los indicadores recientes del estado de la biodiversidad colombiana son preocupantes. De los 323 ecosistemas continentales examinados en la actualización de la lista roja para el país, el 27 % se encuentra en estado crítico, el 17 % está amenazado y el 15 % se considera vulnerable (Etter, *et al.*, 2016). Según otros indicadores recogidos en el informe Colombia Viva (WWF-Colombia, 2017), la degradación y la pérdida de ecosistemas afecta por igual los ámbitos terrestre, marino y de agua dulce, lo cual se traduce en la pérdida del hábitat de muchas especies y, sumado a la sobreexplotación, desemboca en el incremento del número de especies amenazadas en aquellos grupos incluidos más de una vez en los libros rojos de la fauna y la flora colombianas: 54 en el nuevo libro rojo de los peces dulceacuícolas (Mojica, *et al.*, 2012), 21 en el de reptiles (Morales-Betancourt, *et al.*, 2015) y 27 en los de aves (Renjifo, *et al.*, 2014, 2016). Hoy, el 2,22 % de las especies presentes en el país se encuentra en una de las tres categorías de amenaza de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

Visiones encontradas: ambientalismo y desarrollo

Para entender el limitado alcance de los logros de la gestión ambiental a distintas escalas, es preciso examinar el contexto del desarrollo económico y social en el cual ha tenido lugar su evolución. En primer lugar, la explosión demográfica (de tres a seis millardos de personas en solo 50 años) y el rápido crecimiento económico (de 15 veces en ese mismo período) consecuencia del desarrollo técnico y científico posterior a la segunda guerra mundial, delimitaron el inicio de lo que hoy se conoce como la “gran aceleración del Antropoceno” (Steffen, *et al.*, 2011a) y, al mismo tiempo, determinaron el advenimiento del movimiento ambientalista mundial. Por otra parte, los impresionantes logros de la revolución tecnológica en ese período (reducción de la mortalidad infantil, incremento en la productividad agropecuaria, mejoramiento de la asistencia médica, mayor afluencia económica, entre otros), contribuyeron a generar la noción del antagonismo entre el cuidado de la naturaleza y el desarrollo económico.

De alguna manera, esta aparente contradicción ha estado presente a lo largo de otros momentos históricos, pero desde el comienzo de la gran aceleración del Antropoceno ha sido

más evidente y ha permeado las tres grandes etapas del ambientalismo moderno en la cultura occidental establecidas por Ramachandra Guha (Ulloa, 2002). En la primera de ellas, el manejo del patrimonio natural se centró en la preservación de espacios poco transformados y el desarrollo de estrategias para evitar la extinción de especies icónicas, y al estar disociado de los procesos de desarrollo económico, los sectores involucrados no consideraron las externalidades de los sistemas de producción. En este contexto, es obvio el conflicto entre la conservación y los sectores productivos cuyas actividades estaban basadas en la extracción de recursos, en la expansión de la agroindustria y en la construcción de grandes obras de infraestructura.

En la segunda etapa, marcada por el concepto de desarrollo sostenible producto del informe Brundtland (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo - CMMAD, 1987), emergió la noción de que el bienestar de la sociedad dependía de los bienes y servicios que ofrece la naturaleza, aunque no con la fuerza suficiente como para que el sector productivo y el ambiental abandonaran sus respectivas orillas. Es cierto que en este período se establecieron los primeros controles y mecanismos de prevención de los efectos de la actividad antrópica en el ambiente, y que la sociedad civil incrementó su participación en los procesos de adopción de decisiones sobre el manejo del medio ambiente, pero la naturaleza siguió siendo vista, ante todo, como proveedora de recursos y materias primas.

Por último, la cooptación de la agenda ambiental por parte del modelo de desarrollo mercantilista global ha contribuido a hacer más profunda la brecha entre la conservación de la biodiversidad y el desarrollo económico, dado que el reduccionismo empresarial simplifica la visión integral y sistémica del ambiente en su afán por mejorar la competitividad y la productividad de los sectores productivos (Guhl-Nannetti & Leyva, 2015).

A lo largo de las tres etapas prevaleció, entonces, una visión utilitaria de la naturaleza, herencia de la racionalidad occidental y manifiesta en una variedad de versiones según Rodríguez-Becerra & Espinoza (2002): la minería de los recursos naturales renovables, el uso racional y la conservación de los recursos naturales, el conservacionismo, la gestión ambiental del Estado y el desarrollo sostenible. Todas ellas mantienen la división ontológica entre la naturaleza y la humanidad y, al hacerlo, impiden la construcción de una relación entre sociedad y naturaleza en la que se entienda que el bienestar de los seres humanos depende del manejo respetuoso de los atributos y funciones de la biodiversidad.

No obstante, la evolución de los enfoques de conservación de la biodiversidad poco a poco ha dado cabida a enfoques holísticos que, de alguna manera, contribuyen a cerrar la brecha entre naturaleza y sociedad. Por una parte, la discusión acerca de los servicios ecosistémicos, intensificada a partir de la evaluación de ecosistemas del milenio (Reid, *et al.*, 2005), llevó a considerar que ésta debía ir más allá de la utilidad y la racionalidad para trascender adecuadamente

los valores socioculturales de los ecosistemas (Scholte, *et al.*, 2015). Pero, además, el desarrollo del concepto de “panarquía”, según el cual sistemas naturales, humanos y las combinaciones de ambos se entrelazan en ciclos adaptativos interminables de crecimiento, acumulación, reestructuración y renovación (Holling, 2001), ha conducido a entender los sistemas socioecológicos como unidades de análisis y manejo más aproximadas al estado actual de la biosfera.

Lecturas de la naturaleza en el Antropoceno

El reconocimiento del Antropoceno, la época geológica en la que las actividades de los seres humanos se han convertido en una fuerza geofísica, desató una oleada de propuestas para reorientar el rumbo de la sociedad global en su relación con el medio ambiente. Como lo plantearon Steffen, *et al.* (2011b), este reconocimiento es un recordatorio de que el Holoceno fue un período estable y propicio en el que las sociedades humanas, como las conocemos, se desarrollaron y florecieron, por lo que su disrupción actual demanda respuestas urgentes y contundentes: hemos ingresado a una nueva fase de la experiencia humana como habitantes de un mundo que será cada vez más diferente del que hoy conocemos.

El carácter global y la urgencia del cambio ambiental propio de esta época ha desembocado en la aceleración de la agenda internacional en torno a diferentes aspectos, como lo demostraron los acuerdos logrados en la cumbre de cambio climático de París en el 2015, aunque debe reconocerse que los avances en su gestión y refrendación han sido desiguales y no alcanzan la velocidad de respuesta requerida. Por otra parte, aunque la sociedad global está cada vez mejor informada acerca de esta problemática, el cuerpo de información que sustenta la búsqueda de soluciones mantiene la brecha entre la humanidad y el resto de la naturaleza, como veremos a continuación.

La enorme proporción de la superficie terrestre en donde la influencia humana sobre la fisonomía, la composición, la estructura y, muy seguramente, la función de los ecosistemas es visible, según lo señalaran Vitousek, *et al.* (1997), llevó a algunos autores a considerar que la conservación, concebida como el mantenimiento de las condiciones “naturales” de un conjunto de ecosistemas, es una empresa poco menos que fútil, pues no es posible prometer el retorno de la Tierra a un estado prístino, propio de los paisajes previos al surgimiento de la humanidad (Kareiva, *et al.*, 2007). Según estos mismos autores, una alternativa para frenar los impactos negativos de las acciones humanas sobre los ecosistemas debería basarse en el incremento de la domesticación de la naturaleza, lo cual podría, además, contribuir a incrementar el bienestar de la sociedad y fortalecer la economía global.

Este planteamiento condujo a una reacción airada por parte del “establecimiento” de la conservación (Soulé, 2013), basada en que aún había grandes segmentos del planeta mínimamente alterados y, por lo tanto, susceptibles

de ser mantenidos como repositorios de la naturaleza que perdemos. Como epítome de este punto de vista, Wilson (2016) propuso la audaz idea de destinar la mitad de la superficie de la Tierra a la conservación estricta, como medida extrema para salvar la mayor cantidad posible de la biodiversidad restante. Pero, independientemente de los argumentos de uno y otro bando en esta controversia, resulta interesante observar que ambas orillas coinciden en apreciar el carácter ajeno de la humanidad con respecto a la naturaleza, pues mientras el primero la concibe de la manera utilitaria ya mencionada, el segundo la equipara a los remanentes de lo que fueran los paisajes y ecosistemas previos al desarrollo de las sociedades complejas.

Ante la encrucijada ambiental contemporánea y sus implicaciones para el bienestar humano, surge una tercera aproximación para enfrentarla a partir de lo que sus proponentes denominan los límites planetarios (Rockström, *et al.*, 2009; Steffen, *et al.*, 2015). Este marco conceptual define un espacio operativo seguro para la humanidad con base en la identificación de umbrales relacionados con procesos globales críticos, más allá de los cuales la humanidad no podría subsistir a la manera de las sociedades complejas existentes en la actualidad. A partir de tales umbrales se propone un enfoque de custodia planetaria basado en acciones simultáneas en múltiples escalas, la consideración de consecuencias ecológicas y socioeconómicas, los incentivos para el comportamiento de custodia, el fortalecimiento de las conexiones de la gente con los lugares que valora y el uso de transiciones demográficas como oportunidades de custodia (Chapin, *et al.*, 2011).

A diferencia de las propuestas anteriores, la custodia planetaria plantea la idea de la dependencia de los seres humanos con respecto al resto de la naturaleza. Sin embargo, al centrar sus análisis en las condiciones que hacen posible la existencia humana como la conocemos, remite la gestión ambiental a un ámbito antropocentrista en consonancia con la visión de la naturaleza como espacio ajeno a lo que somos. Esta lectura, no obstante, es apenas una entre muchas que han circulado históricamente. En distintos momentos también se la ha visto como fenómeno colectivo del mundo, como esencia, cualidad o principio que informa acerca del funcionamiento del mundo, o como inspiración, guía y fuente de autoridad sobre los asuntos humanos (Coates, 1988). Con excepción de la última categoría, las demás consideran la naturaleza como un ente externo a la especie humana, y quizás por ello ha prevalecido la concepción de verla como el medio en el cual se inscribe su existencia. Entre las muchas limitaciones que entraña dicha lectura quizás la más importante es que la mayor parte de la humanidad, que debería estar involucrada en una decisión tan trascendental como la de escoger el futuro de su descendencia, queda excluida (Naranjo, 2016). En consecuencia, es importante desarrollar modelos que conduzcan a la construcción social de imaginarios de naturaleza para el Antropoceno.

Territorios, paisajes e imaginarios de naturaleza

La idea de naturaleza que subyace las visiones utilitarias, así como gran parte de las propuestas y mecanismos desarrollados para enfrentar la crisis ambiental, son un legado de la modernidad que se sustenta en la aspiración a racionalizar la economía, así como en la eficacia y en lo instrumental y, en ese marco, el grado de desarrollo tecnológico se considera como medida del grado de autonomía de las sociedades humanas con respecto a las fuerzas de la naturaleza (Rivera, *et al.*, 2006). Cuando esta se concibe principalmente como espacio físico para el usufructo, la optimización de su mantenimiento o la producción de determinado recurso, se dejan de lado o se ignoran imaginarios sociales en los que la realidad física y material del entorno tiene una poderosa carga simbólica.

Estas aproximaciones reduccionistas al medio ambiente son desafortunadas en la medida en que todo paisaje encarna la experiencia y las aspiraciones de sus habitantes y, por lo tanto, contiene núcleos de significado que expresan pensamientos, ideas y emociones. Un paisaje no solo nos presenta el mundo tal como es, sino que, de alguna manera, también es una construcción de ese mundo (Nogué, 2008) acorde con el sistema político en el que opera la cultura que lo construye, con sus patrones de uso de la tierra, sus preferencias estéticas y sus convenciones sociales (Nassauer, 1995).

El diálogo entre las sociedades y los paisajes hace posibles múltiples formas de entender la naturaleza y, en consecuencia, la coexistencia de dichas lecturas no debería verse como fuente de contradicciones y conflictos, sino como la oportunidad de construir nuevas relaciones con ella a partir de las dinámicas que tienen lugar entre las culturas territoriales y los paisajes donde se desenvuelven las sociedades. Después de todo, el sentido de lo real se apoya en un imaginario social constituido por imágenes de la realidad física y material del entorno en interacción con el sentido que se le da a dichas imágenes (Rivera, *et al.*, 2006), y teniendo en cuenta que no solamente determina y crea una percepción de lo que es aceptado como real, sino que mantiene y cuestiona el orden social (Randazzo-Eisemann, 2012). En este sentido, sería posible replantear mediante la construcción de nuevos imaginarios de naturaleza, la visión utilitaria e instrumental responsable, en buena medida, del cambio global.

Por otra parte, dado que la comprensión del entorno es un fenómeno intersubjetivo en cuanto es compartido, experimentado e interpretado con otros y por otros, la construcción de nuevos imaginarios de naturaleza debe ser un ejercicio ampliamente participativo que propicie una nueva cultura del territorio, como lo ha propuesto Álvarez-Munarriz (2011). Según este autor, tal proceso implica un modelo de interpretación del territorio que propende por la protección y gestión sostenible de los espacios que la sociedad considera valiosos a través de cambios en los estilos de vida y la implementación de acciones responsables e innovadoras.

La adopción de los imaginarios de naturaleza como condición de una nueva relación de la humanidad con el resto de los elementos que la componen es una propuesta tan ambiciosa como lo fueron en su momento el informe Brundtland (CMMAD, 1987) o la Carta de la Tierra (Earth Charter Initiative- ECI, 2000). Pero a diferencia de estos documentos, cuyos mensajes estaban dirigidos, ante todo, a los estados o a organizaciones de distinta índole, su concreción depende de una serie de condiciones cuyo cumplimiento trasciende la responsabilidad de dichos actores.

Por una parte, es imperativo lograr el reconocimiento general de que la humanidad no es un ente colectivo separado de la naturaleza. La admisión de que nuestra supervivencia y bienestar dependen de la funcionalidad de los ecosistemas y, por lo tanto, de las relaciones con otros seres vivos, es un principio de la ética biocultural que transforma la pregunta filosófica central de cómo debemos vivir los seres humanos en la de cómo debemos cohabitar la Tierra (Rozi, 2013).

En segundo lugar, es necesario replantear la valoración social de lo natural como aquello que no ha sido tocado por la acción humana (Nassauer, 1992). Cuando se equipara la noción de naturaleza con la idea de lo prístino, suele obtenerse una lectura equivocada de la integridad ecológica, pues es factible que un paisaje que parece natural no sea prístino, y que paisajes ecológicamente saludables no parezcan naturales, por lo cual la construcción colectiva de imaginarios de naturaleza debe considerar distintas formas de conocimiento, valores y prácticas ecológicas (Rozi, 2013). Un diálogo intercultural en el que, además del conocimiento científico, intervengan otras lecturas de la naturaleza es fundamental en la interpretación de los atributos que un colectivo social considera esenciales y, por lo tanto, dignos de preservarse. Asimismo, contribuiría a armonizar las políticas y los instrumentos de gestión ambiental con las aspiraciones de quienes serán responsables de su ejecución (Rodríguez-Becerra & Espinoza, 2002).

Un tercer requisito, relacionado con el anterior, es la comprensión del papel que juegan las formas de apropiación de la naturaleza en la formación y la consolidación de las identidades territoriales. Según Nogué (2008), la materialidad del paisaje está teñida de elementos intangibles que convierten cada lugar en algo único, lo cual conduce a la aparición de lo que conocemos como sentido de lugar. Los territorios adquieren una identidad singular ligada a la memoria colectiva, y ello constituye la base del apego local por una geografía, pues el sentido de lugar implica el aprecio local por las dimensiones estéticas, culturales y espirituales de los ecosistemas concebidas como servicios ecosistémicos valiosos (Chapin, *et al.*, 2011). Desde este punto de vista, podría decirse que existen tantas naturalezas como identidades territoriales, lo que debería traducirse en propuestas de gestión medioambiental fundamentadas en la identificación de los elementos constitutivos de los sentidos de lugar.

Un momento para construir la naturaleza que queremos

Teniendo en cuenta el carácter “multiescalar” de lo que sería un proceso de reformulación colectiva de imaginarios de naturaleza, conviene examinar su factibilidad en el contexto nacional colombiano. A lo largo de la historia del país, sus habitantes hemos entendido el territorio a partir de modelos simplificadores que no reconocen la complejidad y la vulnerabilidad de la base natural, y de ideas muchas veces lejanas, incluso opuestas a la complejidad de nuestro medio biofísico (Carrizosa, 2014). Aunque la revisión histórica de estas concepciones de la naturaleza en Colombia excede el alcance de este trabajo, el examen de algunas de ellas ofrece la posibilidad de determinar oportunidades y detectar obstáculos en la construcción de imaginarios que permitan mitigar y prevenir la erosión del patrimonio natural del país.

A partir de la bien conocida dicotomía en el modelo de apropiación del territorio iniciado con la conquista española, que privilegió la ocupación de las mal llamadas “tierras templadas” sobre la de los paisajes selváticos de las tierras bajas (Palacio, 2006), es posible reconocer algunos elementos que han determinado la configuración de las relaciones entre sociedad y naturaleza en Colombia. El primero de ellos consiste en la domesticación del paisaje como requisito para el desarrollo de la civilización. Esta noción, sin duda utilitaria, es responsable de la asimetría en la transformación de los paisajes colombianos, centrada en la planicie del Caribe y la región andina por sus condiciones climáticas más favorables a los españoles y la existencia de sistemas agrícolas y poblados indígenas en torno a los cuales establecer los primeros asentamientos coloniales (Carrizosa, 2014). La posterior ocupación de otros territorios, como los valles interandinos y sectores del piedemonte llanero, siguió este mismo modelo, buscando replicar sistemas de producción de ultramar en el proceso civilizatorio republicano.

La distinción entre la tierra domesticada y la naturaleza enemiga oculta formas complejas de apropiación social del paisaje que han persistido durante siglos y que responden a los factores ambientales determinantes propios de los espacios megadiversos de la selva lluviosa (Palacio, 2006), lo que favorece dos lecturas opuestas de dichos ambientes. La primera consiste en la visión de estos ecosistemas como fuentes de recursos en el marco de sucesivos modelos económicos extractivistas, como la explotación de la quina, el caucho, las pieles de animales silvestres, las maderas finas, los metales preciosos y los hidrocarburos. La segunda los contempla como espacios silvestres que albergan una rica biodiversidad, apreciada únicamente por los especialistas y por fuera de la cultura de masas (Andrade & Castro, 2012).

La persistencia de estas lecturas es sin duda uno de los mayores obstáculos de la gestión ambiental en la Colombia contemporánea, pues la existencia de una periferia “natural”, más allá del “centro” en el que se desenvuelve el país civilizado, es vista todavía como la oposición entre la

anarquía y el caos frente al orden de la racionalidad (Serje, 2011). En el momento actual, cuando el país busca corregir el rumbo de su historia, estamos frente a una oportunidad única de romper este paradigma, para lo cual no solo es necesario promover un cambio cultural del significado de la biodiversidad en el territorio, como lo han señalado Sandino, *et al.* (2011), sino también emprender la construcción de un imaginario que permita una relación más armónica de la sociedad con el patrimonio natural de la nación.

Una tarea de estas dimensiones implica enfrentar una revisión crítica de los sistemas ambientales territoriales existentes (Carrizosa, 2014), cada uno de los cuales corresponde a la expresión paisajística de un determinado sentido de lugar, así como analizar las transiciones ecológicas de regiones reconocidas por su gran biodiversidad y su fragilidad ambiental, cuya verdadera dimensión solo podrá expresarse a mediano y largo plazo (Andrade, *et al.*, 2018). Pero, además de estos insumos, que sin duda demandan el involucramiento de actores con conocimiento y experiencia analítica acordes con el tamaño del problema, el más importante requisito consiste en la popularización de ese conocimiento, de forma tal que promueva una participación social sin precedentes para convertir la conciencia de la responsabilidad individual frente al resto de la naturaleza en el más importante elemento de la tan anhelada y siempre elusiva “colombianidad”.

Conclusiones

A pesar de las múltiples acciones que ha emprendido la humanidad desde los albores del ambientalismo para frenar la pérdida de la biodiversidad global, el deterioro del patrimonio natural es cada vez más acelerado, pues las convenciones y acuerdos internacionales relacionados con esta problemática apenas han abordado los síntomas del impacto antropogénico sobre la naturaleza, pero no sus causas. El desfase entre los instrumentos de política ambiental y los resultados conseguidos es evidente en distintas escalas geográficas.

El limitado alcance de la gestión ambiental es, en gran medida, una consecuencia del antagonismo cultural entre el cuidado de la naturaleza y el desarrollo económico. La visión utilitaria de los ecosistemas y de la biodiversidad impide la construcción de una relación de sociedad y naturaleza basada en el entendimiento de que el bienestar de los seres humanos depende del manejo respetuoso de los atributos y funciones de la biodiversidad.

Quizás sea necesario, entonces, retomar lecturas de la naturaleza diferentes de las que han circulado históricamente, para así construir nuevos imaginarios de naturaleza que hagan posible su conservación y el bienestar de la sociedad. La concepción de la naturaleza como fenómeno colectivo del mundo, como principio que informa acerca de su funcionamiento o como inspiración, guía y fuente de autoridad, son oportunidades que es preciso explorar en la coyuntura de la crisis ambiental global.

El diálogo entre las sociedades y los paisajes hace posibles múltiples formas de entender la naturaleza y ofrece la oportunidad de establecer nuevas relaciones con ella a partir de las dinámicas que tienen lugar entre las culturas territoriales y sus paisajes. La construcción de nuevos imaginarios de naturaleza debería considerar al menos tres grandes elementos: la admisión de que la supervivencia y el bienestar humanos dependen de la funcionalidad de los ecosistemas; la inclusión de lecturas de la naturaleza adicionales a la de la ciencia occidental, y la comprensión del papel de las formas de apropiación de la naturaleza en la formación y consolidación de identidades territoriales.

Conflicto de intereses

Ninguno que declarar.

Referencias

- Álvarez-Munarriz, L. (2011). The Cultural Landscape Concept. AIBR, *Revista de Antropología Iberoamericana*, **6**: 63-86.
- Andrade, G. I. & Castro, L. G. (2012). Degradación, pérdida y transformación de la biodiversidad continental en Colombia, invitación a una interpretación socioecológica. *Ambiente y Desarrollo*, **16** (30): 53-71.
- Andrade, G. I., Chaves, M. E., Corzo, G., Tapia, C. (Editores) (2018). *Transiciones socioecológicas hacia la sostenibilidad: gestión de la biodiversidad en los procesos de cambio de uso de la tierra en el territorio colombiano*. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. 220 p.
- IPBES. (2018). Las contribuciones de la diversidad biológica y la naturaleza continúan en peligroso declive, alertan los científicos | IPBES. Fecha de consulta: 3 de enero de 2019. Disponible en: <https://www.ipbes.net/news/comunicado-de-prensa-las-contribuciones-de-la-diversidad-biol%C3%B3gica-y-la-naturaleza-contin%C3%BAan->
- Butchart, S. H. M., Visconti, P., Hilton-Taylor, C. (2018). Riesgo de extinción: la lista roja de especies amenazadas de la UICN. In *Informe Planeta Vivo 2018: apuntando más alto*. WWF, p. 104-105.
- Carrizosa, J. (2014). Colombia Compleja. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, D.C.
- Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., Garcia, A., Pringle, R. M., Palmer, T. M. (2015). Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances*, **1**: e1400253-e1400253.
- Chapin, F. S., Power, M. E., Pickett, S. T. A., Freitag, A., Reynolds, J. A., Jackson, R. B., Lodge, D. M., Duke, C., Collins, S. L., Power, A. G., Bartuska, A. (2011). Earth stewardship: Science for action to sustain the human-earth system. *Ecosphere*, **2**: 1-20.
- Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo - CMMAD. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Fecha de consulta: 15 de diciembre de 2018. Disponible en: http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LLECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf.
- Coates, P. (1988). *Nature, western attitudes since ancient times*. University of California Press, Berkeley - Los Angeles. 246 p.
- Deinet, S., McRae, L., Freeman, R. (2018). Indicador de población: el índice planeta vivo. En: Grooten, M. & Almond, R. (Editores): *Informe Planeta Vivo 2018: apuntando más alto*. WWF, Gland, Switzerland. p. 90-95.
- Earth Charter Initiative - ECI (2000). *La Carta de la Tierra*. Fecha de consulta: 27 de diciembre de 2018. Disponible en: <http://cartadelatierra.org/invent/images/uploads/Text%20in%20Spanish.pdf>
- Etter, A., Andrade, Á., Amaya, P., Arévalo, P. A. (2016). La lista roja de los ecosistemas terrestres de Colombia. En *Biodiversidad 2015. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Primera edición. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. p. 29-30.
- Grooten, M. & Almond, R. (Editores) (2018). *Informe Planeta Vivo 2018: apuntando más alto*. WWF, Gland, Switzerland. 144 p.
- Guhl-Nannetti, E. & Leyva, P. (2015). La gestión ambiental en Colombia, 1994-2014: ¿un esfuerzo insostenible? FESCOL-Foro Nacional Ambiental-QUINAXI.
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindí, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K. L., Engelbrecht, F., Guiot, J., et al. (2018). Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems. pp. 175-311 In: In: Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I.Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.): *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.
- Holling, C. S. (2001). Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, **4**: 390-405.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global warming of 1.5°C. Special Report: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Fecha de consulta: 27 de diciembre de 2018. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/> <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Kareiva, P., Watts, S., McDonald, R., Boucher T. (2007). Domesticated nature: Shaping landscapes and ecosystems for human welfare. *Science*, **316**: 1866-1869.
- Kennedy, C. M., Oakleaf, J. R., Theobald, D. M., Baruch-Mordo, S., Kiesecker J. (2019). Managing the middle: A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. *Global Change Biology*, **25**: 1-16. Doi: 10.1111/gcb.14549
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). *Política nacional para la gestión integral de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (PNGIBSE)*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Millennium Ecosystem Assessment Program. (Editor) (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment*. World Resources Institute, Washington, DC. 68 p.

- Mojica, J., Usma, J. S., Álvarez-León, R., Lasso C. A.** (Editors) (2012). Libro rojo de peces dulceacuícolas de Colombia 2012. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, WWF-Colombia y Universidad de Manizales, Bogotá, D.C. 319 p.
- Morales-Betancourt, M., Lasso, C. A., Páez, V., Bock, B.** (2015). Libro rojo de reptiles de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Universidad de Antioquia, Bogotá, D.C. 258 p.
- Naranjo, L. G.** (2016). La proximidad de los opuestos naturaleza y cultura en el Antropoceno. En: Ruiz, C. E. (Editor). Ciencia y humanismo, 50 años - Revista Aleph. Universidad de Caldas – Universidad Autónoma de Manizales, Manizales. p. 133-152.
- Nassauer, J. I.** (1992). The appearance of ecological systems as a matter of policy. *Landscape Ecology*. **6**: 239-250.
- Nassauer, J. I.** (1995). Culture and changing landscape structure. *Landscape Ecology*. **10**: 229-237.
- Nogué, J.** (2008). Paisaje y sentido de lugar. pp. 207-228. En: Días-Fierros, F. & López-Silvestre, F. (Editores). Olladas críticas sobre a paisaxe. Consello da Cultura Galega, Santiago de Compostela. 312 p.
- Palacio, G.** (2006). Fiebre de tierra caliente, una historia ambiental de Colombia (1850-1930). ILSA, Bogotá. 183 p.
- Randazzo-Eisemann, F.** (2012). Los imaginarios sociales como herramienta. *Imagonautas*. **2**: 77-92.
- Reid, W., Mooney, H. A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S. R., Chopra, K., Dasgupta, P., Dietz, T., Duraiappah, A., Hassan, R., Kasperson, R., et al.** (2005). Ecosystems and human well-being - Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment. Island Press, Washington, D.C. 563 p.
- Renjifo, L. M., Amaya-Villarreal, A. M., Velásquez-Tibatá, J., Burbano-Girón, J.** (2016). Libro rojo de aves de Colombia. Volumen II: ecosistemas abiertos, secos, insulares, acuáticos continentales, marinos, tierras altas del Darién y Sierra Nevada de Santa Marta y bosques húmedos del centro, norte y oriente del país. Editorial Pontificia Universidad Javeriana e Instituto Alexander von Humboldt, Bogotá, D.C. 465 p.
- Renjifo, L. M., Gómez, M., Velásquez-Tibatá, J., Amaya-Villarreal, A.M., Kattan, G. H., Amaya-Espinell, J.D., Burbano-Girón, J.** (Editores) (2014). Libro rojo de aves de Colombia, Volumen I: bosques húmedos de los Andes y la costa Pacífica. Editorial Pontificia Universidad Javeriana e Instituto Alexander von Humboldt, Bogotá, D.C. 202 p.
- Rivera, C. C., Duque, A. M., Naranjo, L. G.** (2006). De María a un mar de caña: imaginarios de naturaleza en la transformación del paisaje vallecaucano entre 1950 y 1970. Universidad Autónoma de Occidente. 285 p.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A.A., Chapin, F. S., E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, et al.** (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*. **461**: 472-475.
- Rodríguez-Becerra, M. & Espinoza, G.** (2002). Gestión ambiental en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington, D.C. 64 p.
- Rozzi, R.** (2013). Biocultural ethics: From biocultural homogenization toward biocultural conservation. En: Rozzi, R., Pickett, S. T. A. Palmer, C., Arnesto, J. J. & Callicott, J. B. (Editores). Linking ecology and ethics for a changing world. Springer Netherlands, Dordrecht. p. 9-32.
- Sandino, J. C., Aldana-Domínguez, J., Andrade Pérez, G. I., Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.** (2011). Biodiversidad y territorio, innovación para la gestión adaptativa frente al cambio global: insumos técnicos para el Plan de Acción Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Bogotá. 365 p.
- Scholte, S. S. K., van Teeffelen, A. J. A., Verburg, P. H.** (2015). Integrating socio-cultural perspectives into ecosystem service valuation: A review of concepts and methods. *Ecological Economics*. **114**: 67-78.
- Serje, M.** (2011). El revés de la nación: territorios salvajes, fronteras y tierras de nadie. Universidad de los Andes. ¿p.?
- Soulé, M. E.** (2013). The “New Conservation.” *Conservation Biology*. **27**: 895-897.
- Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., McNeill, J.** (2011a). The Anthropocene: Conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. **369**: 842-867.
- Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Crumley, C., Crutzen, P., Folke, C., Gordon, L., Molina, M., et al.** (2011b). The Anthropocene: From global change to planetary stewardship. *AMBIO*. **40**: 739-761.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockstrom, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., Folke, C., et al.** (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*. **347**: 1259855-1259855.
- Ulloa, A.** (2002). Pensando verde: el surgimiento y desarrollo de la conciencia ambiental global. pp. 205-226. En: Palacio, G. & Ulloa, A. (Editores). Repensando la naturaleza. Universidad Nacional de Colombia – Sede Leticia, Instituto Amazónico de Investigaciones, Instituto Colombiano de Antropología e Historia, Colciencias., Bogotá. 246 p.
- Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenko, J., Melillo J. M.** (1997). Human domination of earth's ecosystems. *Science*. **277**: 494-499.
- Wilson, E. O.** (2016). Half-Earth, our planet's fight for life. Liveright Publishing Corporation, New York. 272 p.
- WWF-Colombia** (2017). Colombia Viva: un país megadiverso de cara al futuro, Informe 2017. WWF Colombia, Cali, Colombia. 162 p.

Estudio, curaduría y nuevos registros de odonatos presentes en la colección del Museo de La Salle

✉ José A. Cuéllar-Cardozo^{1,*}, ✉ María Fernanda Lozano-Bernal², ✉ José-Warles Díaz-Guamán²

¹ Bioprospección y Conservación Biológica, Universidad de La Salle, Bogotá, D.C., Colombia

² Museo de La Salle, Universidad de La Salle, Bogotá D.C., Colombia

Resumen

Colombia es el quinto país con más especies de odonatos de Latinoamérica, con 437 especies distribuidas en 11 familias, lo que representa el 7,2 % de la riqueza mundial. Esto se ve reflejado en la gran cantidad de especímenes presentes en muchas colecciones del país. La colección del Museo de La Salle (MLS) tiene registros desde 1968 y adolece de problemas de identificación taxonómica y de modo de preservación, que a largo plazo pone en riesgo los ejemplares y su información asociada, por lo que en el presente estudio se propuso la actualización taxonómica y el mejoramiento de las condiciones de almacenamiento de los odonatos depositados en el museo. Para ello, los especímenes se identificaron hasta el último nivel taxonómico posible y simultáneamente se tomaron acciones de conservación curativa y de optimización del almacenamiento. Como resultado, se identificaron un total de 903 individuos, repartidos en 81 especies provenientes de 14 departamentos, de los cuales el más representativo fue Huila con 363 especímenes; la mayoría de los ejemplares se recolectaron entre el 2010 y el 2017. Mediante una revisión bibliográfica se encontraron nuevos registros para varios departamentos del país, siendo Cundinamarca el de mayor cantidad. Se concluyó que la colección del Museo de La Salle posee piezas valiosas de información en cuanto a la distribución espacial y temporal de los odonatos en el país. Asimismo, se resalta la importancia de una correcta técnica de preservación y almacenamiento de los ejemplares para su conservación a lo largo del tiempo.

Palabras claves: Colecciones biológicas; Colombia; inventario; odonatos; Museo de La Salle.

Study, curation and new records of odonates present in the collection of the Museum of La Salle

Abstract

Colombia is the fifth country with the most Odonata species in Latin America totaling 437 distributed among 11 families, which represent 7.2% of the world's richness. This is reflected in a large number of specimens present in many collections in the country. The collection of the Museum of La Salle has records since 1968 and it evidences problems in the taxonomic identification and the preservation mode that can put at risk the specimens and the information they represent in the long term. Taking into account this, the objective of this project was to carry out a taxonomic update and to improve the storage conditions of the odonates deposited in the museum. For this, the specimens were identified up to the minimum possible taxonomic level and, at the same time, we undertook curative conservation and storage optimization actions. As a result, a total of 903 individuals were identified belonging to 81 species distributed in 14 departments, Huila being the most representative with 363 specimens, most of them collected between 2010 and 2017. Through a bibliographic review, we found new records for several departments of the country, Cundinamarca being the one with the largest amount. We concluded that the collection of the Museum of La Salle has valuable pieces of information regarding the spatial and temporal distribution of Odonata species in the country. Likewise, we highlight the importance of using the correct technique for specimen preservation and storage.

Key words: Biological collections; Colombia; Inventory; Museum of La Salle; Odonata.

Introducción

Los odonatos, libélulas y caballitos del diablo, son unos coloridos insectos que aparecieron a finales del Carbonífero. Los adultos se caracterizan por presentar mandíbulas desarrolladas, grandes ojos compuestos, dos pares de alas y un abdomen alargado. Por otra parte, las larvas presentan una morfología adaptada al medio acuático y se reconocen por

su labio hipertrofiado, utilizado para cazar (Corbet, 2004; Grimaldi & Engel, 2005). Durante todo su ciclo de vida, estos insectos están muy asociados con los cuerpos de agua,

*Correspondencia:

José A. Cuéllar-Cardozo; josecuellar1094@gmail.com

Recibido: 3 de enero de 2019

Aceptado: 2 de julio de 2019

Editor: Elizabeth Castañeda

por lo que constituyen excelentes indicadores de la calidad de las fuentes hídricas y los bosques riparios, así como del grado de conservación del ambiente (Paulson, 2006).

El orden Odonata está conformado por tres subórdenes, 24 familias, 600 géneros y cerca de 6.500 especies repartidas por todo el globo, con excepción de la Antártida (Sánchez-Herrera & Ware, 2011). En el Neotrópico se encuentra la mayor diversidad de odonatos debido a la gran cantidad y variedad de ambientes acuáticos que, conjuntamente con las barreras geográficas, ha permitido procesos de endemismo y la especiación de muchos grupos (Kalkman, *et al.*, 2008). Colombia está catalogado como el sexto país en diversidad de odonatos, con aproximadamente 437 especies repartidas en 11 familias que representan el 7,2 % de la riqueza mundial de libélulas (Bota-Sierra, *et al.*, 2018; Bota-Sierra, *et al.*, 2018a; Pérez-Gutiérrez & Palacino-Rodríguez, 2011).

La mayoría de las investigaciones en nuestro país se han enfocado en realizar inventarios de especies, además de estudios de taxonomía y filogenética (Palacino-Rodríguez, 2016). Sin embargo, gran parte de las colecciones biológicas presentes en varias de las regiones del país no han sido revisadas en su totalidad, con los consecuentes vacíos de información en cuanto a la distribución espacial y temporal de muchas especies de odonatos (Palacino-Rodríguez, 2013). En el caso de la colección de odonatos del Museo de La Salle, gran parte del registro exhibe una identificación taxonómica desactualizada y carente de registro en las bases de datos correspondientes, por lo que el objetivo del presente estudio fue actualizar la identificación taxonómica de la colección de odonatos del Museo de La Salle, así como la técnica de preservación y las condiciones de almacenamiento de los ejemplares ahí depositados. Asimismo, se hizo una revisión bibliográfica para definir qué departamentos del país no habían registrado las especies de odonatos presentes en la colección.

Materiales y métodos

Los odonatos depositados en la colección de invertebrados del Museo de La Salle fueron identificados hasta el mínimo nivel de resolución taxonómica posible (género y especie), utilizando las claves y descripciones de Ris (1930), Borror (1942), Leonard (1977), Limongi (1983), Westfall Jr. (1988), De Marmels (1990), Garrison (1990, 1994), Garrison, *et al.* (2006, 2010), Belle (1992), Carvalho (1992), Zloty, *et al.* (1993), May (1998), Novelo-Gutiérrez (2002, 2005), Meurgey & Poiron (2011), Vargas-Salgado, *et al.* (2013), Garrison & von Ellenrieder (2015) y Gutiérrez, *et al.* (2015). Varios organismos solo pudieron ser identificados hasta el nivel de familia debido a la falta de algunos de sus caracteres morfológicos.

Simultáneamente con la identificación taxonómica, se revisó el estado de preservación y se hizo la curaduría física de los ejemplares a partir del análisis de las condiciones de almacenamiento y el estado de los especímenes. Consecuentemente, se propuso una actualización del método de preservación con base en un modelo utilizado en las

colecciones de diversos museos para minimizar los daños ocasionados por la manipulación y optimizar el espacio ocupado por los ejemplares (Paulson, n.d.).

Para ello, se cambiaron las unidades de conservación. La primera fase consistió en la colocación de los ejemplares adultos en una cámara húmeda con alcohol etílico durante 48 horas, evitando la proliferación de microorganismos que pudiera comprometer el ejemplar, para lograr el cambio de posición necesario para su adecuación en los sobres. En la segunda fase se unieron las partes desprendidas, como el abdomen, las alas o las extremidades de los ejemplares con deterioro físico, utilizando como adhesivo un compuesto de acetato de polivinilo (PVA) marca TALAS® de alta calidad y estabilidad en el tiempo. Por último, la tercera fase consistió en la elaboración de las nuevas unidades de conservación, en la cual se utilizaron sobres hechos de polipropileno no estático ultratransparente de 1.25 µm de grosor, en los que se insertó una cartulina propalcote® libre de ácido de 250 g y 8 x 15 cm (Simmons & Muñoz, 2005). Al respaldo de las cartulinas se adhirieron las etiquetas con la información de recolección y la identificación taxonómica actualizada utilizando carboximetilcelulosa (CMC) en agua destilada. Cabe aclarar que se usaron tintas a base de carbón para el registro de la información, las cuales son las más recomendadas debido a su estabilidad fisicoquímica y larga duración (Williams & Hawks, 1986).

Resultados

Se identificaron un total de 903 individuos, 507 anisópteros y 396 zigópteros (Tabla S1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/830/2542>). La colección de odonatos se compone de 81 especies, repartidas en 9 familias y 41 géneros. Los odonatos depositados cubren un periodo que se extiende desde 1968 hasta el 2017 y están distribuidos en un rango altitudinal entre los 234 y los 2.600 msnm. En síntesis, la colección del Museo de La Salle contiene individuos de 24,2 % de las especies descritas para Colombia según la última revisión de Pérez-Gutiérrez & Palacino-Rodríguez (2011).

En esta colección, la familia con la mayor proporción de ejemplares fue Libellulidae, con el 51 % del total de los especímenes, correspondiente a 464 individuos, en tanto que Platystictidae fue la familia con la menor proporción, solo tres individuos que representan el 0,3 % del total de odonatos en la colección.

El departamento del Huila fue la región con más especímenes, un total de 363 ejemplares, en tanto que en el Cauca y La Guajira se había hecho la menor cantidad de recolecciones, con tan solo tres individuos en cada departamento. En cuanto a los datos de altitud, esta característica estaba registrada solamente en el 71 % de los especímenes; al revisar en detalle las distribuciones, se encontró que la mayoría de especies de odonatos se capturó en altitudes menores de 1.000 msnm, con un total de 28 especies registradas, en tanto que en altitudes mayores de 2.000 msnm se

registró la menor cantidad de especies. Asimismo, sobresale el dato de que 21 especies de odonatos presentaron un amplio rango altitudinal con individuos recolectados en altitudes que variaban entre los 200 y 2.500 msnm. Con respecto al sexo de los especímenes, se registraron un total de 599 machos y 195 hembras, además de 111 individuos en los que no se pudo determinar el sexo debido a su mal estado de preservación.

Para constatar el crecimiento de la colección año tras año, se hicieron tres mapas del país y en cada uno se consignaron el número de registros y el porcentaje equivalente de cada departamento. El primer mapa (Figura 1) corresponde al periodo de 1968 a 1977, con un total de 73 registros equivalente al 8,06 % del total de individuos y 65 especies registradas (8,19 % del total de especies), siendo este el periodo en el que se registró la menor cantidad de individuos recolectados. El segundo mapa (Figura 2) corresponde al periodo de 2000 a 2009, con 114 registros, es decir, 15,91 % del total de especímenes, y 127 especies, o sea, 16,01 % del total. Por último, el tercer mapa (Figura 3) corresponde al periodo que va desde el 2010 hasta el 2017,

en el cual el número de registros fue de 429, correspondiente al 47,4 % del total de recolecciones, y de 412 especies, es decir, el 51,95 % de las contenidas en la colección, siendo este el periodo con el mayor número de registros y especies. Cabe aclarar que en los periodos que no se reflejan en los mapas no hubo capturas de insectos del orden Odonata, por lo que no se incluyeron en el análisis.

Mediante una revisión de la bibliografía disponible para Colombia, además de las bases de datos del Servicio de Información en Biodiversidad (SIB) para Colombia y de la *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF), se encontró que aproximadamente la mitad (50,6 %) de las especies registradas en la colección representaba nuevos registros para varios departamentos de Colombia. Los departamentos con mayor cantidad de nuevos registros fueron Cundinamarca, con diez nuevos registros, Valle del Cauca, con ocho, y Huila, con siete. Asimismo, se encontraron nuevos registros para 13 de los 14 departamentos representados en la colección, lo que demuestra que aún existen grandes vacíos en cuanto al estudio de odonatos en varias regiones del país (Palacino-Rodríguez, 2016).

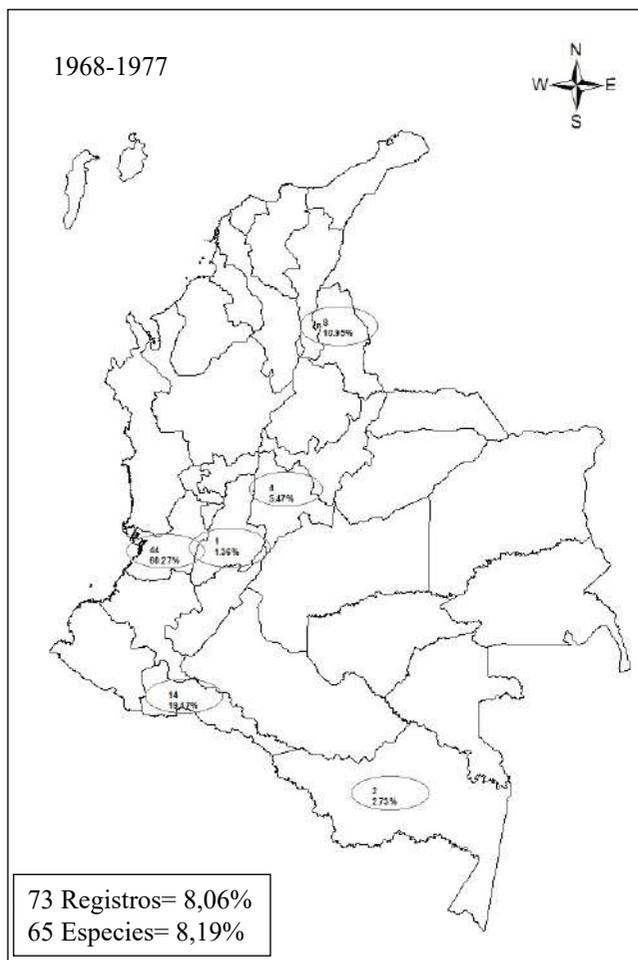


Figura 1. Mapa de los registros de odonatos del Museo de La Salle recolectados en el periodo comprendido entre 1968 y 1977.



Figura 2. Mapa de los registros de odonatos del Museo de La Salle recolectados en el periodo comprendido entre 2000 y 2009.

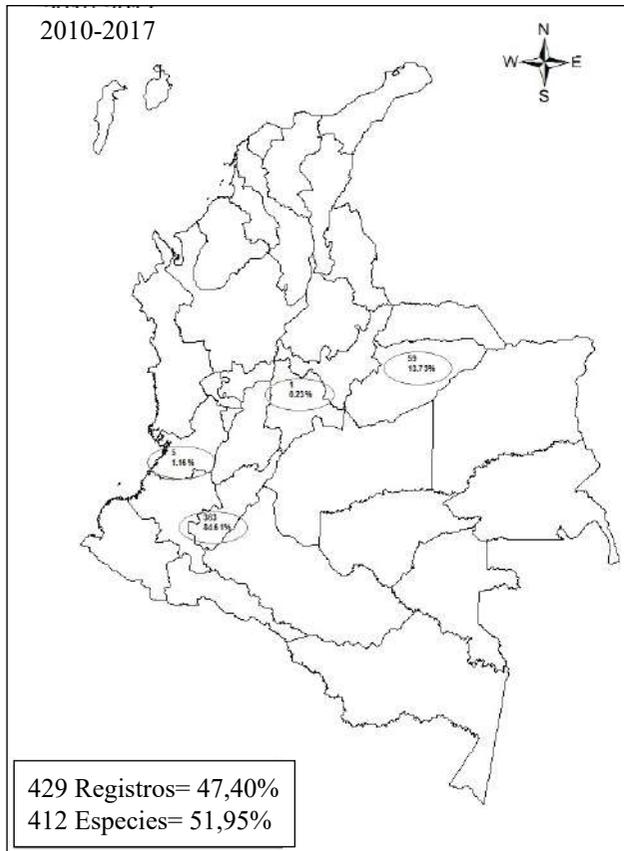


Figura 3. Mapa de los registros de odonatos del Museo de La Salle recolectados en el periodo comprendido entre 2010 y 2017.

Conclusión

Es importante recalcar la importancia de la preservación de ejemplares en los museos como una forma de llevar el registro de la fauna de odonatos del país. Se resalta, asimismo, el hecho de que varios de los ejemplares presentes en la colección de invertebrados del Museo de La Salle constituyen nuevos registros en diferentes departamentos de Colombia, lo que actualiza la información de reportes anteriores, a pesar de que varios de los especímenes fueron recolectados hace más de 50 años. También se evidencia la importancia de la correcta preservación de los ejemplares, incluidos aspectos como el cuidado y el manejo de la colección para evitar el deterioro durante las consultas y permitir su crecimiento futuro. Por último, este estudio y el de **Palacino-Rodríguez (2009)** constituyen los únicos que se han hecho sobre las colecciones de odonatos en Colombia, y se espera que sirvan de base para posteriores estudios en torno a las colecciones de odonatos en el país.

Contribución de los autores

José A. Cuéllar-Cardozo y José-Warles Díaz-Guamán: participación en la fase metodológica y en la redacción final del documento. María-Fernanda Lozano-Bernal: interpretación de los resultados y discusión.

Material suplementario

Tabla S1. Lista de especies de odonatos, número y distribución por sexo y estadio de los individuos depositados en la colección de invertebrados del Museo de La Salle en Bogotá, Colombia. Vea la tabla 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/830/2542>

Conflicto de intereses

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

Referencias

- Belle, J.** (1992). Studies on ultimate instar larvae of neotropical Gomphidae, with the description of *Tibiagomphus* gen. nov. (Anisoptera). *Odonatologica*. **21** (1): 1-24.
- Bota-Sierra, C. A., Corso, A., Janni, O., Sandoval-H, J., Viganò, M., Sánchez-Herrera, M., Palacino-Rodríguez, F.** (2018). Seventeen new dragonfly records from Colombia and the confirmation of the synonymy of *Philogenia monotis* and *P. tinalandia* (Insecta: Odonata). *Zootaxa*. **4462** (2): 115-131. Doi: 10.1080/13887890.2018.1462262
- Bota-Sierra, C. A., Sánchez-Herrera, M., Palacino-Rodríguez, F.** (2018). Odonata from protected areas in Colombia with new records and description of *Cora verapax* sp. nov. (Zygoptera: Polythoridae). *Zootaxa*. **4462** (May): 115-131.
- Carvalho, A. L.** (1992). Revalidation of the genus *Remartinia* Navás, 1911, with the description of a new species and a key to the genera of neotropical Aeshnidae (Anisoptera). *Odonatologica*. **21** (3): 289-298.
- Corbet, P. S.** (2004). Dragonflies behaviour and ecology of Odonata (Revised Edition). (P. S. Corbet, Ed.) (Harley Boo). Colchester: Harley Books.
- De Marmels, J.** (1990). A new record of *Mesamphiagrion occultum* (Ris) and *Cyanallagma ovigerum* (Calv) (Zygoptera: Coenagrionidae). *Notul. Odonatol.* **3** (5): 65-80.
- Garrison, R. W.** (1990). A synopsis of the genus *Hetaerina* with descriptions of four new species (Odonata: Calopterygidae). *Transactions of the American Entomological Society*. **116** (1): 175-259.
- Garrison, R. W.** (1994). A revision of the New World genus *Erpetogomphus* Hagen in Selys (Odonata: Gomphidae). *Tijdschrift Voor Entomologie*. **137** (2): 173-269.
- Garrison, R. W. & von Ellenrieder, N.** (2015). Damsel flies of the genus *Argia* of the Guiana Shield (Odonata: Coenagrionidae). *Zootaxa* (Vol. 4042). Doi: 10.11646/zootaxa.4042.1.1
- Grimaldi, D. & Engel, M. S.** (2005). *Evolution of the Insects*. Cambridge University Press. Doi: 10.1073/pnas.0703993104
- Gutiérrez, Y., Freitas, H. L., Oliveira, E. E.** (2015). *Acanthagrion viridescens* (Odonata: Coenagrionidae): Description of the final larval stadium and biological notes. *Zootaxa*. **4057** (1): 125-134. Doi: 10.11646/zootaxa.4057.1.8
- Kalkman, V. J., Clausnitzer, V., Dijkstra, K.-D. B., Orr, A. G., Paulson, D. R., van Tol, J.** (2008). Global diversity of dragonflies (Odonata) in freshwater. *Hydrobiologia*. **595** (1): 351-363. Doi: 10.1007/s10750-007-9029-x

- Leonard, J. W.** (1977). A revisionary study of the genus *Acanthagrion* (Odonata: Zygoptera). Miscellaneous Publications Museum of Zoology, University of Michigan. **153**: 188. <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/56397>
- Limongi S, J.** (1983). Estudio morfo-taxonómico de *náyades en algunas especies de Odonata (Insecta) en Venezuela (I)*. Universidad Central de Venezuela.
- May, M. L.** (1998). *Macrothemis fallax*, a new species of dragonfly from Central America (Anisoptera: Libellulidae), with a key to male *Macrothemis*. International Journal of Odonatology. **1** (2): 137-153. Doi: 10.1080/13887890.1998.9748101
- Meurgey, F. & Poiron, C.** (2011). The true *Dythemis multipunctata* Kirby, 1894, from the West Indies and proposed new taxonomic status (Odonata: Anisoptera: Libellulidae). Zootaxa. **3019**: 51-62.
- Novelo-Gutiérrez, R.** (2005). La larva de *Enallagma novaehispaniae* Calvert, 1902 (Odonata: Zygoptera: Coenagrionidae). Folia Entomológica Mexicana. **44** (2): 219-224. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=42444210>
- Novelo-Gutiérrez, R.** (2002). Descripción de las larvas de *Perithemis intensa* Kirby, 1889 y *P. domitia* (Drury, 1773), con notas sobre otras larvas del género en México (Odonata: Anisoptera: Libellulidae). Folia Entomológica Mexicana. **41** (3): 321-327. <http://biblat.unam.mx/pt/revista/fofia-entomologica-mexicana/articulo/descripcion-de-las-larvas-de-perithemis-intensa-kirby-1889-y-p-domitia-drury-1773-con-notas-sobre-otras-larvas-del-genero-en-mexico-odonata-anisoptera-libellulidae>
- Palacino-Rodríguez, F.** (2009). Dragonflies (Odonata: Anisoptera) of the collection of the *Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia*. Boletín Del Museo de Entomología de La Universidad Del Valle. **10** (1): 37-41.
- Palacino-Rodríguez, F.** (2013). Five new records of dragonflies from Putumayo (Colombia). Boletín Del Museo de Entomología de La Universidad Del Valle. **14** (2): 16-21.
- Palacino-Rodríguez, F.** (2016). Two decades of progress in over one hundred years of study: Present status of Odonata research in Colombia. Odonatologica. 163-188.
- Paulson, D. R.** (n.d.). Collecting & Preserving Specimens Collecting Dragonflies (Odonata) and Maintaining a Collection. Slater Museum of Natural History. <https://www.pugetsound.edu/academics/academic-resources/slater-museum/biodiversity-resources/dragonflies/collecting-preserving-specim/>
- Paulson, D. R.** (2006). The importance of forests to Neotropical dragonflies. In Fourth WDA International Symposium of Odonatology (p. 79-101).
- Pérez-Gutiérrez, L. A. & Palacino-Rodríguez, F.** (2011). Updated checklist of the odonata known from Colombia. Odonatologica. **40** (3): 203-225.
- Ris, F.** (1930). A revision of the *Libelluline* genus *Perithemis* (Odonata). Miscellaneous Publications University of Michigan Museum of Zoology. <http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/56266>
- Sánchez-Herrera, M. & Ware, J. L.** (2011). Biogeography of dragonflies and damselflies: Highly mobile predators. Global Advances in Biogeography. **14**: 291-306.
- Vargas Salgado, L. G., Do Lago Carvalho, A., Parise Pinto, Á.** (2013). Larval taxonomy of *Macrothemis* Hagen, 1868 (Odonata: Libellulidae), with descriptions of four larvae and a key to the fourteen known species. Zootaxa. **3599** (3): 229-245. Doi: 10.11646/zootaxa.3599.3.2
- Westfall Jr., M. J.** (1988). *Elasmothemis* gen. nov., a new genus related to *Dythemis* (Anisoptera: Libellulidae). Odonatologica. **17** (4): 419-428.
- Zloty, J., Pritchard, G., Esquivel, C.** (1993). Larvae of the Costa Rican *Hetaerina* (Odonata: Calopterygidae) with comments on distribution. Systematic Entomology. **18**: 253-265. Doi: 10.1111/j.1365-3113.1993.tb00665.x

Viabilidad y germinación *in vitro* de taxones de las tribus Cymbidieae y Epidendreae (subfamilia Epidendroideae, Orchidaceae)

● Adriana Paola Bonilla-Sánchez*, ● Hilda Rocío Mosquera-Mosquera

Grupo de Genética y Biotecnología vegetal y Microbiana, Universidad del Tolima (GEBIUT), Ibagué, Colombia

Resumen

Las orquídeas Epidendroideae presentan el polen organizado en polinios con diferente grado de compactación; cada polinio puede contener hasta 4 millones de granos de polen. En este estudio se evaluó la viabilidad y la germinación *in vitro* del polen aglutinado en polinios. Se evaluó la calidad polínica de siete taxones en dos tribus utilizando métodos palinológicos *ex vitro* (tinción con acetocarmin glicerol al 2 %) y directos (germinación *in vitro*) en tres medios, M1, M2 y M3. La viabilidad con acetocarmin fue superior al 85 % en los siete taxones estudiados. El mayor porcentaje de germinación *in vitro* se obtuvo en *Catasetum tabulare*, con un 16 %; en el resto de taxones los valores oscilaron entre el 2 % y el 5 % a las 72 horas de observación. El medio M3 fue el más exitoso, con 18 y 20 % de germinación en los taxones estudiados. Aunque la viabilidad del polen es alta, presenta tasas muy bajas de germinación, probablemente por el alto grado de compactación y la ausencia de aperturas, lo que la hace lenta y poco efectiva en medios artificiales. Los resultados ratificaron que no todo el polen viable germina, y que existe un alto grado de especificidad y dependencia frente a las sustancias estimuladoras de la germinación del polen provenientes del estigma de las orquídeas, lo que hace necesario seguir profundizando en el análisis de la biología del polen de la subfamilia Epidendroideae para comprender un poco más sus procesos de multiplicación natural.

Palabras clave: Biología polínica; Polinio; Tétradas; Tubo polínico.

Viability and *in vitro* germination of taxa from Cymbidieae and Epidendreae tribes (subfamily Epidendroideae, Orchidaceae)

Abstract

The pollen in Epidendroideae orchids is organized in pollinia with different degrees of compaction; each pollinium can contain up to 4 million pollen grains. In the present study, we analyzed the effect of the compaction of the pollinium on the viability and germinative capacity of the pollen. We evaluated the pollen quality of seven taxa from two tribes using *ex vitro* palynological methods (staining with acetocarmine glycerol 2%) and direct methods (*in vitro* germination) in three media: M1, M2, and M3. Viability with acetocarmine was over 85% in the seven taxa studied. The highest percentage of *in vitro* germination was obtained in *Catasetum tabulare* with 16%; in the rest of the taxa, the values oscillated between 2% and 5% at 72 h of observation. The M3 medium was the most successful with 18% and 20% germination in the taxa studied. Although the viability of pollen is high, it has very low germination rates probably affected by the high degree of compaction and the absence of openings, which makes germination in artificial media slow and ineffective. The results confirm that not all viable pollen can germinate and that there is a high degree of specificity and dependence on the stimulating substances for the germination of pollen present in the stigma of the orchids, which makes it necessary to continue deepening in the analysis of the pollen biology of the subfamily Epidendroideae to understand a little more its processes of natural multiplication.

Key words: Pollen biology; Pollen tube; Pollinium; Tetrads.

Introducción

Los miembros de la subfamilia Epidendroideae, incluidos Cymbidieae y Epidendreae, se caracterizan por exhibir flores hermafroditas y zigomorfas (Díez, 2001), en las cuales el atributo más notable es una estructura conocida como columna, conformada por la fusión del androceo y el pistilo, que resulta en la presencia de un solo estambre con granos

de polen agregados de diversa forma que reciben el nombre de polinios (Dressler, 1981). El polinio se puede definir como un conglomerado de tétradas polínicas con diferentes

*Correspondencia:

Adriana Paola Bonilla Sánchez; apbonillas@ut.edu.co

Recibido: 6 de mayo de 2019

Aceptado: 8 de julio de 2019

Editor: Elizabeth Castañeda

grados de cohesión, que puede albergar alrededor de 4 millones de granos de polen por unidad (Damon & Nieto, 2012; Johnson & Edwards, 2000). Pueden tener textura granular, séctil o compacta (Hesse, *et al.*, 1989; Dressler, 1993; Freudenstein & Rasmussen, 1997; Johnson & Edwards, 2000; Rothacker, 2007), o pueden ser enteros o bipartidos (con sutura) (Mosquera, *et al.*, 2019). El polinio es dispersado desde la antera por el polinizador y puede depositarse como una unidad completa en el estigma (debido a su compactación) o separarse por másulas cuando su textura es séctil (Singer, *et al.*, 2008).

Si bien el análisis de la estructura del polinio permite interpretar el proceso de dispersión del polen, no es fácil determinar si su compactación dentro del polinio incide en el porcentaje de su viabilidad y germinación, además de las posibles repercusiones en el proceso de fecundación del óvulo. Por ello, las herramientas biotecnológicas agrupadas en métodos directos *in vitro* y las técnicas indirectas basadas en parámetros fisiológicos, como el color de la reacción bioquímica por el uso de gelatina de acetocarmín glicerol, son primordiales para determinar la calidad del grano de polen (Aramediz, *et al.*, 2013), de lo cual dependen fenómenos como la polinización, el mejoramiento genético, los procesos de reconocimiento polen-pistilo, la fertilización, etc. (Rejón, 2010).

El objetivo de este estudio consistió en evaluar la viabilidad y la germinación *in vitro* del polen aglutinado en polinios en siete taxones pertenecientes a las tribus Cymbidieae y Epidendreae. Los resultados obtenidos han permitido reconocer las estrategias de dispersión y reproducción de las cuales hacen uso estas especies. Los métodos estandarizados en el laboratorio son una herramienta útil para la conservación del polen de parentales empleados en procesos de propagación *ex vitro*. Por tal razón, la información que se presenta aquí constituye un aporte valioso para la comprensión de la enorme diversidad, variabilidad y amplia distribución de la subfamilia Epidendroideae.

Materiales y métodos

Área de estudio y sitios de muestreo. El estudio se desarrolló en tres puntos fitogeográficos de la ciudad de Ibagué. La primera zona correspondió a la Fundación Orquídeas del Tolima (Reserva de la Sociedad Civil), donde se recolectó la mayor parte de las muestras florales, situada a 4° 25' N y 75° 15' O en una zona de vida de bosque premontano bajo, con una temperatura promedio de 24 °C, una altitud de 1.321 m s.n.m. y una precipitación promedio anual de 1.993 mm. El segundo punto de muestreo fue el Jardín Botánico San Jorge, reserva natural situada a 4° 26' N y 75° 13' O en una zona de formación de bosque premontano bajo, con una temperatura promedio de 24 °C, una altitud de 1.133 m s.n.m. y una precipitación promedio de 1.993 mm. El último punto de recolección comprendió al área boscosa de El Silencio (bosque premontano alto), perteneciente al área rural del Cañón del Combeima (Ibagué), situado a 4° 36'

N y 75° 19' O, con una temperatura promedio de 18 °C, una altitud de 2.586 m s.n.m. y una precipitación promedio oscilante de 1.816 mm.

Material estudiado. Se analizaron los polinios frescos recolectados a partir de flores en estado de anthesis de siete taxones (*Catasetum tabulare* Lindl., *Oncidium* sp., *Anguloa clowesii* (Ruiz & Pav.) Lindl., *Gongora* sp.) en la tribu Cymbidieae y (*Cattleya trianae* Linden & Rehb.f., *Epidendrum ciliare* L. y *Epidendrum* sp.) en la tribu Epidendreae, de la subfamilia Epidendroideae.

Métodos palinológicos. Para determinar la calidad del gametofito masculino, se evaluaron dos técnicas de análisis, una *ex vitro* (viabilidad) y otra *in vitro* (germinación), de la siguiente manera.

Determinación de la viabilidad del polinio. En el análisis de la viabilidad se empleó la metodología propuesta por Ordóñez (2014), la cual tiene como fundamento la coloración del contenido protoplasmático de los granos de polen. Los polinios contienen tétradas, y para verificar la viabilidad, se tuvo en cuenta cada grano de polen que las conformaba, pues todos tenían el potencial de germinar. Los polinios fueron colocados en el portaobjetos con tres o cuatro gotas de acetocarmín glicerol al 2 %, y posteriormente se disgregaron hasta obtener una muestra homogénea. Esta preparación se dejó reposar durante un minuto, luego se cubrió con láminas cubreobjetos y, por último, se refrigeró a 4 °C en posición horizontal. Las muestras se leyeron bajo un microscopio de campo claro a 40 x a partir de las 3 horas de su montaje. Se analizaron 500 granos de polen por muestra, equivalentes a 125 tétradas polínicas. El resultado se expresó como el porcentaje de granos viables comparado con el número total de granos de polen multiplicado por cien. Se consideró como viables aquellos granos que registraban una coloración rojo carmín intensa en el citoplasma, y como granos no viables, los que presentaban ausencia de coloración o irregularidades en su morfología.

Germinación del polen *in vitro*. Para evaluar la capacidad germinativa del polen, se emplearon tres medios de cultivo diferentes: el medio M1, de consistencia sólida, propuesto por Pritchard & Prendergast (1989), y el medio M2, medio líquido que corresponde a la modificación del medio BK (Brewbaker & Kwack, 1963) realizada por Tsai & Chang (2010). El medio M3 fue diseñado por los autores para mejorar la respuesta germinativa *in vitro*: es sólido e incluyó el estigma de cada flor, agar al 1 %, agua destilada y pH igual a 5,7 y no contenía sacarosa. Una vez solidificado el agar, se agregó de manera uniforme la sustancia estigmática de cada especie en evaluación recogida en un pincel. Los medios de cultivo en estado sólido se vertieron en cajas de Petri (20 ml) y el medio en estado líquido se usó en portaobjetos. Los polinios fueron hidratados, macerados y luego depositados en cada medio de cultivo. Se analizaron 500 granos de polen por polinio, con 10 repeticiones por cada taxón.

Todos los tratamientos se incubaron en oscuridad a una temperatura que oscilaba entre 25 y 27 °C. La germinación

se detuvo 72 horas después de la siembra agregando a cada medio 2 a 3 gotas de acetocarmin glicerol al 2 %. Este colorante permitió la diferenciación de las tétradas y mejoró la observación de los tubos polínicos. Se consideraron como granos de polen germinados aquellos que emitieron un tubo polínico con una longitud mayor o igual al diámetro del polen. Por último, se contaron los granos de polen germinados en un mínimo de 10 campos ópticos, y los resultados se expresaron como el porcentaje de polen con posibilidad de germinar comparado con el número total de granos de polen por campo multiplicado por cien.

Análisis estadístico. Se utilizaron las pruebas de Shapiro-Wilk y Anderson Darling para determinar si los datos seguían una distribución normal. Para evaluar el nivel de significación con respecto a las diferencias en los porcentajes de viabilidad y germinación del polinio, se compararon las medianas empleando la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, y se consideraron significativos valores de p menores que 0,05 ($p \leq 0,05$). Tanto en las pruebas de viabilidad como de germinación, se contabilizó un total de 5.000 granos de polen (500 x 10 repeticiones independientes), y en cada placa y caja de Petri se evaluaron 10 campos de observación óptica. Estos análisis se ejecutaron con el paquete estadístico R-Project, versión libre.

Resultados

Viabilidad del polinio. El método citológico para determinar la calidad del polen en orquídeas con polinios compactos usando acetocarmin glicerol al 2 % evidenció altos niveles de viabilidad (Figura 1). Según los resultados, los mayores porcentajes de viabilidad se presentaron en los taxones *Gongora* sp. (93 %), *Anguloa clowessi* (91 %), *C. tabulare* (89 %) y *Oncidium* sp. (88 %). Dado que la prueba de Kruskal-Wallis no evidenció diferencias significativas al comparar las medianas de viabilidad, con un valor de p igual a 0,3971 y un alfa de 0,05, es posible afirmar que los cuatro taxones evaluados en la tribu Cymbidieae tuvieron la misma disponibilidad de granos de polen viables, como se observa en la Figura 2A.

Por otra parte, en la tribu Epidendreae el mayor porcentaje de viabilidad se observó en la especie *Cattleya trianae* (94 %), seguida por *Epidendrum ciliare* y *Epidendrum* sp., con un 92 y 91 % de viabilidad, respectivamente. Por su parte, la prueba estadística arrojó un valor de p de 0,2871 y un alfa de 0,05, lo que permitió inferir que no hubo diferencias significativas al comparar las medianas de viabilidad polínica en estas tres especies (Figura 2B).

Germinación del polinio. En la tribu Cymbidieae el mayor porcentaje de germinación a las 72 horas de evaluación se presentó en la especie *C. tabulare*, con un 16 % de germinación, a diferencia de los taxones *A. clowessi*, *Gongora* sp. y *Oncidium* sp., los cuales evidenciaron muy bajos porcentajes de germinación (4, 4 y 5%, respectivamente), con un margen de error de 0,05 (Figura 3A). Los resultados con la prueba de Kruskal-Wallis arrojaron un valor de p igual

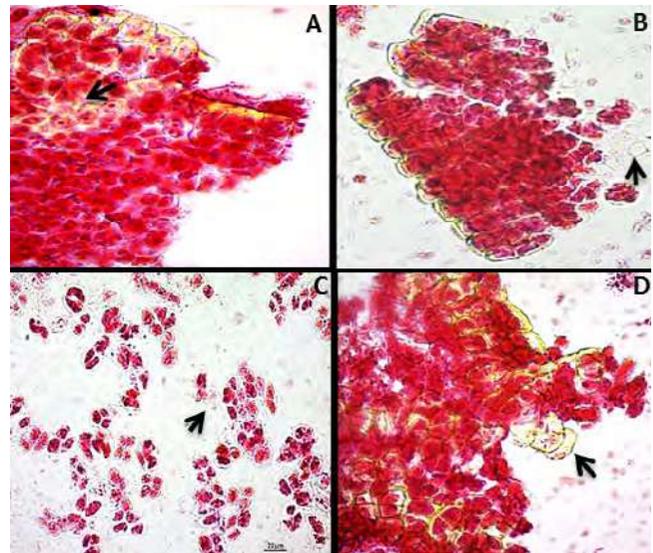


Figura 1. Tétradas polínicas en las que se observan granos de polen inviable (flecha) en contraste con el gran número de polen viable de los taxones con coloración rojo intenso: **A)** *Cattasetum tabulare*. **B)** *Oncidium* sp. **C)** *Cattleya trianae*. **D)** *Epidendrum* sp.

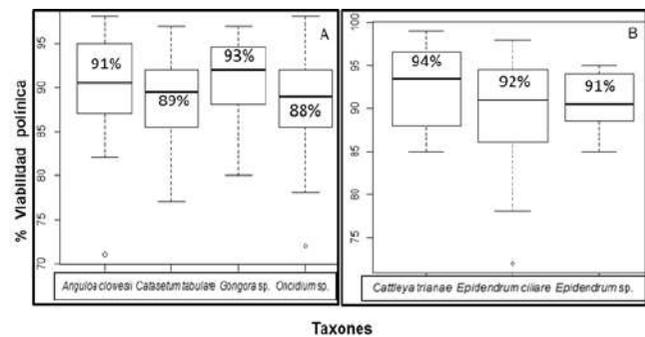


Figura 2. Comparación de medianas de la viabilidad polínica en los taxones de las tribus **A.** Cymbidieae y **B.** Epidendreae

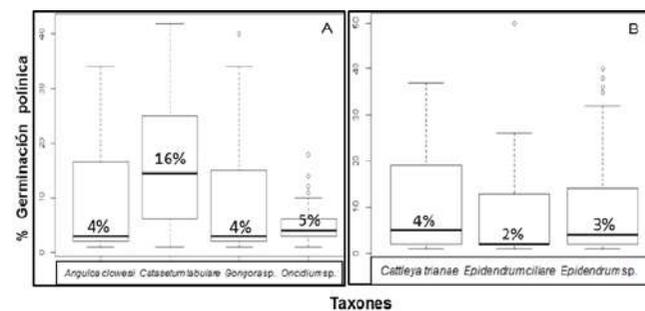


Figura 3. Comparación de la germinación del polen mediante las medianas obtenidas para cada taxón analizado en las tribus **A.** Cymbidieae y **B.** Epidendreae

a 6,356e-09 y 3 grados de libertad, hallándose diferencias significativas entre las medianas al comparar la germinación del polen en los cuatro taxones estudiados.

En la tribu Epidendreae, con porcentajes de germinación bajos y un valor de p de 0,2023 y 2 grados de libertad, no hubo diferencias significativas entre las medianas, es decir, los taxones tenían la misma probabilidad de germinación, siendo *Cattleya trianae* la especie de mayor germinación, con 4 %, seguida de *Epidendrum ciliare* y *Epidendrum* sp., con 2 y 3 %, respectivamente (Figura 3B).

En la mayoría de taxones predominó un crecimiento reducido y lento de tubos polínicos que difícilmente logró superar dos veces la longitud del grano de polen, siendo esta la medida estándar de una elongación efectiva en polen germinado (Figura 4 A-B). En este estudio el polen de *Oncidium* sp., evidenció los mayores problemas a la hora de exhibir el tubo polínico a los tres días de evaluación (Figura 4C), a diferencia del comportamiento del polen de *A. clowessi*, en el cual se observó la presencia de una vacuola que actuó como una herramienta hidráulica impulsando la mayor parte del citoplasma hacia la punta del tubo polínico (Figura 4D). Por último, en la Figura 4E se observa un núcleo redondeado que al parecer corresponde a la célula vegetativa, el cual guio la punta del tubo polínico.

Respuesta germinativa en los tres medios de cultivo. Los ensayos de germinación evidenciaron los efectos positivos del medio M3 (basado en el uso de mucílago estigmático), con un porcentaje de germinación polínica que alcanzó el 18 % a las 72 horas de evaluación. Usando los medios M1 y M2, cada uno suplementado con sacarosa al 1 y 10 %, respectivamente, hubo una menor respuesta en la emisión del tubo polínico, con un porcentaje de germinación de 3 % en ambos medios (Figura 5A). Este resultado se ratificó con el análisis no paramétrico de comparación de medianas, el cual determinó diferencias altamente significativas entre las medianas del medio germinativo M3 y los medios M1 y M2 al evaluar los polinios de la tribu Cymbidieae, con un valor de p menor de $2,2 \times 10^{-16}$ y 2 grados de libertad.

Respecto a la tribu Epidendreae, la mayor respuesta germinativa se vio en el medio M3, con un 20 % de polen susceptible de germinar, comparado con los medios M1 y M2, en los cuales se mantuvo el patrón de baja respuesta germinativa, con valores de 3 y 2 %, respectivamente (Figura 5B). En esta tribu los resultados obtenidos evidenciaron la existencia de diferencias altamente significativas (Kruskal-Wallis: p menor a $2,2 \times 10^{-16}$ y 2 grados de libertad) entre las medianas correspondientes a la germinación de polen con los tres medios.

Discusión

Probablemente los altos porcentajes de viabilidad del polen exhibidos en este estudio se deben a que los polinios se usaron en estado fresco, inmediatamente después de ser extraídos de la antera, y se procesaron con acetocarmín glicerol al 2 %. En este sentido, **Yuan, et al.** (2018) también notaron que el almacenamiento del polinio a temperatura ambiente durante cuatro semanas preservaba las características del polen, pero a partir de ahí, este perdía funcionalidad. Así mismo, al evaluar la viabilidad del híbrido *Phalaenopsis*

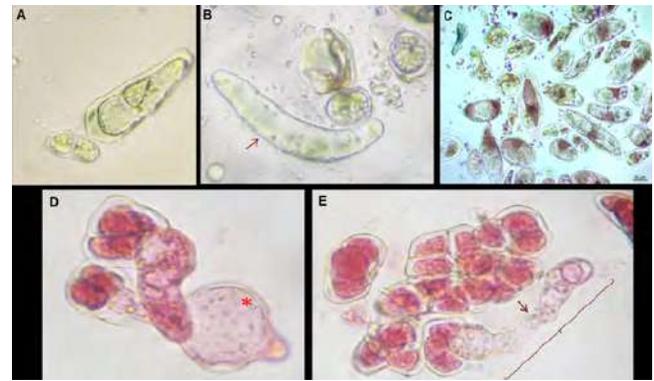


Figura 4. Germinación de las especies **A** y **B.** *Gongora* sp., **C.** *Oncidium* sp., y **D** y **E.** *Anguloa clowessi*, a las 12 horas de observación en medio M3.

*: fuerza impulsora de la vacuola; flecha: longitud del tubo polínico

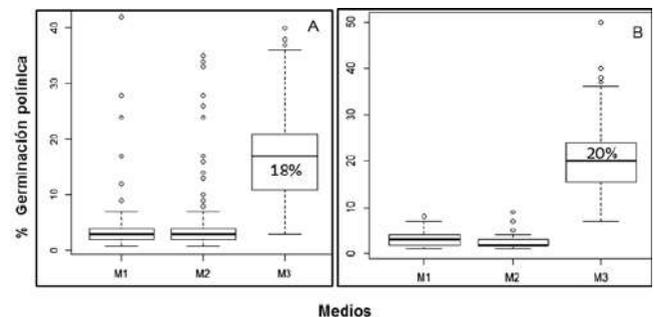


Figura 5. Comparación de medianas al evaluar la germinación del polen en tres medios de cultivo *in vitro* en **A.** polinios de la tribu Cymbidieae y **B.** polinios de la tribu Epidendreae

a diferentes temperaturas mediante tinción con TCC y germinación *in vitro*, estos autores reportaron que el polen había sido viable hasta por 40 semanas almacenándolo a 4 °C, pero pasado este tiempo, era necesario almacenarlo a -20 y -80 °C.

En términos generales, se cree que el polen de las orquídeas puede permanecer intacto y viable dentro del polinio durante periodos relativamente largos. Si se compara la viabilidad de los siete taxones estudiados con los de orquídeas con polinios menos compactados, la tendencia a conservar las características del polen durante largos periodos se mantiene. Es el caso de algunas orquídeas europeas de la subfamilia Orchidoideae con polinios séctiles, en las cuales también se han observado altos niveles de viabilidad reflejados en su coloración citoplasmática al emplear, no solo el colorante acetocarmín glicerol, sino, además, el azul de lactofenol (**Neiland & Wilcock**, 1995). Al parecer, la alta viabilidad o la longevidad observada en orquídeas que exhiben y dispersan su polen a manera de agregados polínicos tiene un componente adaptativo, como lo señalan **Johnson & Edwards** (2000), desarrollado como forma de contrarrestar el tiempo que puede transcurrir desde la captura del polinario por el polinizador hasta la entrega del polinio al estigma, lo cual puede tardar varios días.

Por otra parte, al analizar la viabilidad del polen granular de *Vanilla planifolia* (subfamilia Vanilloideae) conservado durante dos meses, **Borballa, et al.** (2014) encontraron elevados porcentajes de polen viable con dos métodos de tinción, pero consideraron que se trataba de una sobreestimación de los resultados al emplear la tinción con carmín acético. En este sentido, se cree que la prueba de viabilidad con acetocarmín glicerol al 2 % sería efectiva para determinar la calidad del contenido citoplasmático de orquídeas con polinios compactos, pero estos resultados deben sustentarse con el empleo de métodos más rigurosos de análisis, ya que, en ocasiones, con el carmín puede sobreestimarse la fertilidad del polen, apreciación que coincide con lo planteado por **Towill & Walster** (2000) e **Iglesias & Tivo** (2005).

En cuanto a la germinación *in vitro*, el comportamiento anormal del polen de *Oncidium* sp. observado en el proceso de su germinación, se debe a una extensa vacuolización y al aumento exagerado en el volumen de estos granos de polen. En un desarrollo normal, estos procesos ocurren después de la extensión del tubo polínico (**Pacini**, 1994); sin embargo, las vacuolas suelen desaparecer debido a la formación de un nuevo citoplasma o al almacenamiento de carbohidratos y lípidos, pero en el caso de *Oncidium* sp., no se observaron tubos correctamente definidos.

Ordóñez (2014) reconoce que el éxito de la germinación *in vitro* depende en gran medida del genotipo en evaluación. En *Oncidium* y otras orquídeas como *Lycaste*, *Notylia*, *Coelogyne* y *Dendrobium*, de floración masiva, existen antecedentes de autoincompatibilidad gametofítica, expresada en la abscisión de la flor mas no en la inhibición del crecimiento del tubo polínico (**Johansen**, 1990), lo cual contrasta con la escasa aparición de tubos polínicos o la falta de crecimiento en el presente estudio, factores considerados por **Büyükkartal** (2003) como una anomalía con respecto a la germinación *in vitro*, lo que podría explicar la falta de expresión y de dominancia de la punta del tubo polínico evidenciada al usar el medio germinativo M3.

Es posible que las variaciones en los porcentajes de germinación también estén relacionadas con la diferencia en la floración y la disponibilidad de polen en los distintos materiales (**Garduño, et al.**, 2011). En este sentido, *C. tabulare* presentó un comportamiento peculiar, ya que se registraron mayores niveles de germinación con el polen recolectado en el mes de marzo que los porcentajes obtenidos con polen recolectado en la misma planta en el mes de septiembre, cuando la germinación decreció sorpresivamente, aun cuando se mantenían las condiciones controladas de incubación. Este hecho influyó en los resultados de expresión polínica en *C. tabulare*, aunque el polen de esta especie tuvo el mejor comportamiento (con un 16 % de germinación). Por tal motivo, se considera conveniente hacer evaluaciones futuras en las que se determine si las condiciones ambientales están influyendo directamente en el adecuado desarrollo de la antera y el polen y en su función como progenitores. En este sentido, **Kakani, et al.** (2005) han mencionado que durante la floración el polen puede

verse afectado por las altas temperaturas, ya que al ser liberado de las anteras pasa a ser una unidad funcional independiente, la cual está expuesta a los cambios medioambientales (**Snow & Spits**, 1991).

El proceso de germinación de las orquídeas está mediado en gran parte por la formación de una gran vacuola en la célula vegetativa (**Cocucci**, 1973), lo que se evidenció en la germinación de *A. clowessi*, y, aunque la célula generativa no se observó claramente, en los polinios de las orquídeas se ha reportado su presencia en forma circular antes de emitirse el tubo polínico, y cómo una vez ingresa por este canal toma forma de huso (**Pandolfi & Pacini**, 1995).

Excepto en *C. tabulare*, la germinación de los seis taxones restantes osciló en un rango de 3 a 5 %. Estos bajos porcentajes son acordes con el tiempo de evaluación empleado en este estudio, es decir, tres días de inmersión en los diferentes medios, el cual probablemente fue relativamente corto si se tiene en cuenta que bajo condiciones normales de germinación, el periodo entre la germinación del polen y la fecundación en las orquídeas es prolongado, por lo que el polen germinado y los tubos polínicos deben sobrevivir en los ovarios antes de entrar en los sacos embrionarios maduros durante un tiempo bastante prolongado. Tales periodos pueden ser de mínimo cuatro días, como en *Gastrodia elata*, o tardar 10 meses, como sucede en *Vanda suavis* (**Arditti**, 1992).

Aunque estos métodos de germinación son muy útiles y efectivos, sigue siendo difícil evidenciar el desarrollo total del tubo polínico *in vitro*, porque, al parecer, la mayoría de medios no logran satisfacer las necesidades fisiológicas de este tipo de polen con textura compacta. De allí que nuestra conclusión general coincida con la de la mayoría de trabajos, en los cuales se señala que, independientemente del medio y las condiciones empleadas en la germinación *in vitro* en orquídeas, esta es baja y lenta (**Pritchard & Prendergast**, 1989).

Hay poca información sobre la germinación del polen agregado en polinios de la familia Orchidaceae. En el caso de la tribu Cymbidieae, se reportó la germinación en la especie *Cymbidium elegans*, en la cual **Pritchard & Prendergast** (1989) encontraron poca significación estadística en la germinación comparada con especies que presentaban polinios organizados en másulas. Estos resultados coinciden con los bajos niveles de germinación hallados en este estudio en las especies *A. clowessi*, *Oncidium* sp. y *Gongora* sp. Con respecto a la tribu Epidendreae, no se han registrado estudios sobre la biología del polen, por lo cual los resultados de la presente investigación son un aporte importante para la comprensión de este proceso. Por otra parte, a nivel de familia, sí se conocen reportes acerca de la germinación de Orchidaceae frente a otras tribus, como es el caso de la especie *Phalaenopsis aphrodite* (tribu Vandae), también con polinio compacto, en la cual se registró la germinación del polen a partir de los 60 días de exposición en medio líquido bajo condiciones controladas de incubación (**Chen & Fang**, 2016).

Por lo tanto, no es factible asegurar que la poca germinación de las tétradas polínicas en los taxones estudiados se relacione con fenómenos de esterilidad, como lo han reportado algunos autores en híbridos de orquídeas (**Von Kichner, 1992**), en tanto no se demuestre lo contrario con estudios *in vivo* basados en técnicas de polinización manual y evaluación directa de los niveles de germinación en estigmas receptivos. Según **Rejón, et al. (2010)**, hay que tener en cuenta que los factores óptimos de la germinación en un medio *in vitro* nunca serán iguales a las germinaciones producidas en el pistilo y, por lo tanto, el porcentaje que se obtenga siempre será diferente al que en realidad se tiene en la flor *in situ*.

La viabilidad y el éxito germinativo son factores clave en la producción de frutos y en la dispersión efectiva de las semillas, lo cual influye en la permanencia y la propagación de las poblaciones, así como en la supervivencia a largo plazo de las especies (**Cabrera, et al., 2010**). Por ello, se deben continuar desarrollando investigaciones que mejoren las técnicas descritas hasta ahora. El presente análisis debe ser visto como una primera evaluación del potencial germinativo, sin descartar el potencial parental a nivel reproductivo de estas orquídeas, ya que es probable que el análisis *in vitro* no lo haya reflejado del todo debido a la alta especificidad y los complejos mecanismos de activación celular que controlan la comunicación e interacción de los gametos masculinos en los procesos de fertilización tan característicos de esta familia.

En cuanto al comportamiento de los tres medios de germinación, la mejor expresión del tubo polínico en las orquídeas de las tribus Cymbidieae y Epidendreae se logró con el medio M3, el cual puede haber favorecido la germinación porque el estigma (de aproximadamente cuatro cavidades estigmáticas por individuo evaluado), ofreció suficiente concentración y suministro de minerales para los genotipos estudiados. Además del fluido estigmático, este medio de cultivo se caracterizó por la presencia de una base de agar al 1 %, la cual pudo haber contribuido a generar el soporte y la consistencia necesarios para la elongación del tubo polínico.

En este sentido, algunos autores afirman que en el estigma receptivo de las orquídeas existe una sustancia azucarada que recibe a los polinios y permite que los granos de polen germinen, pero aún se desconocen las propiedades y composición biológica de dicha sustancia. Lo que sí está claro es que las superficies estigmáticas han evolucionado de manera simultánea para adaptarse a las diferentes unidades de dispersión polínica (**Nilsson, 1983**). Inicialmente, el medio M3 se propuso como una opción frente a los medios convencionales de germinación evaluados a lo largo de esta investigación (alrededor de 15 medios; no se incluyen los datos), pero pasó a ser la propuesta óptima al dar resultados medianamente positivos considerando las dificultades de los medios M1 y M2 para estimular la emisión del tubo polínico.

Brewbacker & Kwack (1963) determinaron el medio de cultivo adecuado en cerca de 86 especies de 39 familias diferentes, sin incluir polen de orquídeas, y comprobaron que la ausencia del ion calcio inhibía por completo el desarrollo del tubo polínico *in vitro*. Utilizando el medio BK (1963), **Tsai & Chang (2010)** introdujeron una serie de modificaciones para mejorar las condiciones de germinación.

En este estudio, con el uso del medio modificado por **Tsai & Chang (2010)**, denominado medio M2, la germinación no superó el 3 % en los taxones analizados, sin embargo, la especie *C. tabulare* evidenció una respuesta positiva en este medio, lo cual obedeció principalmente al estado de maduración del polen en el polinio y a factores ambientales asociados con el momento en que se tomó la muestra. Asimismo, la germinación del polen en el medio M1 a una temperatura de 25 a 27 °C fue muy poca, tanto así que a los tres días de observación había cerca de un 3 % de polen germinado en las dos tribus, lo que estaría relacionado con la baja concentración de ácido bórico en el medio (0,1 %) de **Pritchard & Prendergast (1989)**. Se sabe que el nivel de boro es muy importante para la germinación, ya que facilita la absorción de sacarosa y la producción de proteínas en el tubo del polen, por lo que no se descarta su uso en concentraciones mayores en estudios futuros (**Kavand, et al., 2014**).

Chen & Fang (2016) introdujeron una variación en el medio modificado de **Tsai & Chang (2010)** agregando extracto estigmático de la antera de *Phalaenopsis aphrodite*. Hasta el momento, la metodología de **Chen & Fang (2016)** ha sido la única con la que se ha logrado evaluar la calidad del polen compacto en la subfamilia Epidendroideae. Su uso exitoso ratifica, igualmente, la importancia de incluir estigma en los medios artificiales de germinación cuando se emplean unidades compactas de orquídeas como modelo de estudio.

Uno de los medios universalmente empleados para evaluar el potencial germinativo de polen agregado en polinios incluye el uso de sacarosa en diferentes concentraciones. **Rao & Ong (1972)** recomendaron concentraciones bajas (5 %) en polinios de orquídeas y concentraciones mucho más altas (20 a 30 %) en políadas de Mimosoideae y polinios de *Asclepias*. En este estudio también se hicieron ensayos preliminares de germinación con soluciones azucaradas en concentraciones de 5, 10, 20 y 30 %. Sin embargo, con las concentraciones bajas no se observó la presencia de tubos polínicos y con las mayores, la germinación fue relativamente baja, observándose tubos polínicos anormales y deformes, por la cual se descartó esta opción.

En la etapa final de los ensayos *in vitro* se decidió corroborar lo reportado por **Chen & Fang (2016)** replicando su metodología con el uso de extracto estigmático de cada uno de los taxones en estudio. Pero pasados tres meses de inmersión en este medio líquido, no se observó una estimulación polínica significativa (no se incluyen los datos), lo cual podría deberse, principalmente, a la especie y al medio de germinación evaluados. Ello supone que las orquídeas no

germinan fácilmente en condiciones *in vitro*, como sí ocurre con muchas especies con polen en mónade o tétrade, en las cuales esta técnica ha funcionado fácilmente y con rapidez, en parte porque los granos de polen de estas orquídeas no se asemejan a los de otras especies con polen en polinios, pues, además de presentar un tamaño bastante reducido y no tener aperturas, la forma de los polinios varía considerablemente en cada tribu dentro de la subfamilia Epidendroideae. Por último, los resultados ratifican la influencia positiva del estigma como un promotor de la germinación del polen de orquídeas *in vitro*.

Conclusiones

En los siete taxones estudiados la viabilidad superó el 85 %, a pesar del alto grado de compactación del polinio, lo que supondría una gran fertilidad en estos individuos, algo fundamental para garantizar el éxito en el proceso de fecundación.

La gran viabilidad polínica contrastó con la poca producción de tubos polínicos, lo que evidenció la presencia de complejos mecanismos de señalización celular en las vías que controlan la formación y la dominancia de la punta del tubo polínico, lo que hace de este grupo un modelo difícil de evaluar *in vitro*.

La efectividad significativa del medio M3 que, a diferencia de los otros medios, incluyó el mucílago del estigma propio de cada taxón evaluado, ratificó la dificultad en la germinación del polen de orquídeas en condiciones artificiales y la dependencia con respecto a las sustancias estimuladoras de la germinación del polen presentes en el estigma.

De los siete taxones evaluados que presentaron polen viable, la especie *C. tabulare* tuvo la mejor respuesta germinativa en condiciones *in vitro*, tanto en el medio M2 como en el M3. Pese a la complejidad de su proceso de floración, esta especie resultó ser un buen modelo biológico para la evaluación de la biología polínica (viabilidad y germinación *in vitro*) en los polinios de esta subfamilia.

Los resultados aquí reportados son importantes porque aportan información sobre los mecanismos de adaptación reproductiva de la subfamilia y sus implicaciones en la conservación de las especies. Dada la vulnerabilidad actual de gran parte de las orquídeas, es importante continuar incentivando el desarrollo de estudios sobre el tubo polínico que promuevan el conocimiento y la propagación de estas especies.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Comité Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por la financiación de este proyecto, así como a los integrantes del Grupo GEBIUT.

Contribución de los autores

Las dos autoras participaron por igual en el desarrollo del estudio, así como en la redacción, revisión y aprobación final del documento. Adriana P. Bonilla-Sánchez estandarizó

y desarrolló las metodologías en la fase de laboratorio, y analizó los resultados obtenidos en la investigación. Por su parte, Hilda R. Mosquera-Mosquera contribuyó con el análisis de los resultados y su discusión.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Araméndiz T. H., Cardona A. C., Lugo T. E.** (2013). Eficiencia de dos métodos para evaluar la viabilidad del polen de berenjena. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. **16**: 351-358.
- Arditti, J.** (1992). *Fundamentals of Orchid biology*. New York: John Wiley & Sons. p. 704.
- Brewbaker, J.L. & Kwack, B.H.** (1963). The essential role of calcium ion in pollen germination and pollen tube growth. *American Journal of Botany*. **50**: 859-865.
- Büyükkartal, H.N.** (2003). *In vitro* pollen germination and pollen tube characteristics in tetraploid red clover (*Trifolium pratense* L.). *Turk J Bot*. **27**: 57-61
- Cabrera, V.A., Dottori, N., Cosa, M.T.** (2010). Germinación, éxito reproductivo y fenología reproductiva de *Solanum chenopodioides* (Solanaceae). *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, **45**: 73-80.
- Chen, J.C. & Fang, S.C.** (2016). The long pollen tube journey and *in vitro* pollen germination of *Phalaenopsis* orchids. *Plant Reprod*. **29**: 179-88.
- Díez, S.J.M.** (2011). *Guía de orquídeas silvestres de la montaña oriental leonesa*. España: Editorial Grupo de acción local Montaña de Riaño. p. 248.
- Damon, A. & Nieto, G.** (2012). A Guide to the Morphology of the Pollinia and Pollinaria of Orchids from the Biological Corridor Tacaná-Boquerón in Southeast México. *Selbyana*. **31**: 5-39.
- Dressler, R.L.** (1981). *The orchids: Natural history and classification*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press. p. 344.
- Dressler, R.L.** (1993). *Phylogeny and classification of the orchid family*. Portland, OR: Melbourne, Australia: Dioscorides Press. p. 314.
- Freudenstein, J.V. & Rasmussen, F.N.** (1997). Sectile pollinia and relationships in the Orchidaceae. *Plant Syst. Evol.* **205**: 125-146.
- Garduño, N. A., Núñez, C.A., Pecina, V., Montero, V., Montes, N., González, M.M., Anaya, L.J.L.** (2011). Desarrollo de un método eficiente para la germinación *in vitro* de polen de sorgo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. **14**: 901-906.
- Hesse, M., Burns-Balogh, P., Wolff, M.** (1989). Pollen morphology of the "primitive" epidendroid orchids. *Grana*. **28**: 261-278.
- Johansen, B.** (1990). Incompatibility in *Dendrobium* (Orchidaceae). *Bot. J. Linn. Soc.* **103**: 165-196.
- Johnson, S.D. & Edwards, T.J.** (2000). The structure and function of orchid pollinaria. *Plant Syst. Evol.* **222**: 243-269.
- Kakani, V.G., Reddy, K.R., Koti, S., Wallace, T.P., Prasad, V.V.P., Reddy, V.R., Zhao, D.** (2005). Differences in *in vitro* pollen germination and pollen tube growth of cotton cultivars in response to high temperature. *Annals of Botany*. **96**: 59-67.

- Kavand, A., Ebadi, A., Shuraki, D.Y., Abdosi, V.** (2014). Effect of calcium nitrate and boric acid on pollen germination of some date palm male cultivars. *Euro. J. Exp. Bio.* **4**: 10-14.
- Mosquera, H.R., Valencia, R.M., Acedo, C.** (2019). Variation and evolutionary transformation of some characters of the pollinarium and pistil in Epidendroideae (Orchidaceae). *Pl. Syst. Evol.* **305**: 353-374.
- Ordóñez, B.** (2014). Determinación de la viabilidad y fertilidad del polen. Lima, Perú: Centro Internacional de la Papa (CIP). p. 8.
- Pacini, E.** (1994). Cell biology of anther and pollen development. In: E.G. Williams, A.E Clarke y R.B Knox, editors. Genetic control of self-incompatibility and reproductive development in flowering plants (289-308). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Pandolfi, T. & Pacini, E.** (1995). The pollinium of *Loroglossum hircinum* (Orchidaceae) between pollination and pollen tube emission. *Plant Syst. Evol.* **196**: 141-151.
- Pritchard, H. & Prendergast, F.** (1989). Factors influencing the germination and storage characteristics of orchid pollen. In H. Pritchard (Ed.), *Modern Methods in Orchid Conservation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rao, A.N. & Ong, E.T.** (1972). Germination of Compound Pollen Grains. *Grana.* **12**: 113-120.
- Rothacker, E.P.** (2007). The primitive Epidendroideae (Orchidaceae): Phylogeny, character evolution and the systematic of *Psilochilus* (Triphoreae). The Ohio State University. p. 448.
- Rejón, J.D., Suárez, C.G., Alché, J.D., Casastro, A.J., Rodríguez, M.I.** (2010). Evaluación de diferentes métodos para estimar la calidad del polen en distintos cultivares de olivo (*Olea europea* L.). *Polen.* **20**: 61-72.
- Singer, R., Gravendeel, B., Cross, H., Ramírez, S.** (2008). The use of orchid pollinia or pollinaria for taxonomic identification. *Selbyana.* **29**: 6-19.
- Snow, A. & Spits, T.** (1991). Pollen vigor and the potential for sexual selection in plants. *Nature.* **352**: 796-797.
- Tsai, Y.C. & Chang, C.** (2010). The investigation of floriculture characteristics, chromosome numbers and *in vitro* pollen germination of *Phaius tankervilleae* and its allied genera. *Hortic NCHU.* **35**: 99-112.
- von Kirchner, O.** (1922). Über Selbstbestäubung bei den Orchideen. *Flora.* **115**: 1003-129.

Descripción, ampliación y nuevo registro de distribución para *Dendropsophus manonegra* (Rivera & Orrico, 2013) y *Dendropsophus sarayacuensis* (Shreve, 1935) (Amphibia: Anura: Hylidae) en el piedemonte andino-amazónico del departamento de Caquetá, Colombia

● Alejandro Navarro-Morales^{1,*}, ● Diego Huseith Ruiz-Valderrama²

¹ Semillero de Investigación en Herpetología – SEH, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia

² Grupo de Fauna silvestre, Centro de Investigación de la Biodiversidad Andino-Amazónica, INBIANAM, Universidad de la Amazonia, Florencia, Caquetá, Colombia

Resumen

Se presentan la ampliación y nuevos registros de distribución de dos especies de la familia Hylidae pertenecientes al género *Dendropsophus* en la región andino-amazónica del departamento del Caquetá, Colombia. Los registros se hicieron en tres localidades del municipio de Florencia: vereda Villaraz, vereda Paraíso y vereda La Holanda, y dos del municipio de Belén de los Andaquíes: Resguardo Indígena La Serinda y vereda Agua Dulce. Utilizando el método de encuentro visual desde las 19:00 a las 23:00 se recolectaron 38 individuos de *Dendropsophus manonegra* y tres de *Dendropsophus sarayacuensis*; se hizo la descripción taxonómica de los individuos en vida y preservados. Se discuten, además, las variaciones altitudinales en las que se pueden encontrar estos organismos a partir de investigaciones de diferentes autores. Estos nuevos registros son fundamentales para el conocimiento de la herpetofauna colombiana, en especial la del departamento del Caquetá.

Palabras clave: *Dendropsophus*; Distribución; Piedemonte andino-amazónico; Caquetá.

Description, extension, and new distribution register for *Dendropsophus manonegra* (Rivera & Orrico, 2013) and *Dendropsophus sarayacuensis* (Shreve, 1935) (Amphibia: Anura: Hylidae) in the Andean-Amazon piedmont region in the department of Caquetá - Colombia

Abstract

We report the extension of the present distribution area, as well as new records for two species of the genus *Dendropsophus*, family Hylidae, in the Andean-Amazonian region of the department of Caquetá, Colombia: In three localities of the municipality of Florencia: Villaraz, Paraíso, La Holanda, and two in the municipality of Belén de los Andaquíes: the indigenous reservation La Serinda and Agua Dulce. By visual encounter from 19:00 - 23:00, we collected 38 individuals of *Dendropsophus manonegra* and three of *Dendropsophus sarayacuensis*; we made the taxonomic description of the individuals while alive and already preserved. We also discuss here the altitudinal variations in which these species are usually found as reported in studies by different authors. The new records are fundamental for the knowledge of the Colombian herpetofauna, especially in the department of Caquetá.

Key words: *Dendropsophus*; Distribution; Andean-Amazonian piedmont; Caquetá.

Introducción

La familia Hylidae posee una gran diversidad de especies distribuidas en el Neotrópico y se encuentra en una gran variedad de microhábitats dentro de los ecosistemas (Lynch & Suarez, 2011). En Colombia se han registrado 127 especies distribuidas en 13 géneros (Frost, 2019), siendo *Dendropsophus* uno de los más diversos en términos de abundancia y riqueza (Duellman, et al., 2016): 35 especies que corresponden al 27,5 % de los hílidos en Colombia (Acosta-Galvis, 2019).

Dendropsophus manonegra es una especie recientemente descrita por Rivera-Correa & Orrico (2013), con distribución exclusiva en los departamentos colombianos de Cauca, Caquetá y Putumayo, entre los 400 y los 1.200 (m s.n.m.) (Rivera-Correa & Orrico, 2013).

*Correspondencia:

Alejandro Navarro-Morales; e-mail: alejanura@hotmail.com

Recibido: 8 de mayo de 2019

Aceptado: 10 de julio de 2019

Editor: Jaime Cantera

Dendropsophus sarayacuensis fue descrita por Shreve (1935) y se encuentra distribuida en Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela (La Marca, *et al.*, 2004); en Colombia se registra en los departamentos de Caquetá, Vaupés y Amazonas, entre los 100 y 1.000 m s.n.m. (Cochran & Goin, 1970; Acosta-Galvis, 2000; Lynch, 2005; Lynch, 2007; Lynch & Suarez, 2011; Osorno, *et al.*, 2011).

Estas especies son de hábitos nocturnos y se encuentran en charcas temporales o permanentes y en áreas abiertas o con cobertura vegetal (Ramírez & Duellman, 1994); sus procesos de reproducción se asocian con la temporada de lluvias abundantes (Aichinger, 1987) y sus ovoposiciones se hacen sobre raíces, troncos y hojas cercanas al espejo de agua (Hödl, 1991), características que evidencian la simpatría de especies.

Dendropsophus manonegra, *D. bifurcus* y *D. sarayacuensis* son especies hermanas que se agrupan dentro del complejo de especies *Dendropsophus leucophyllatus*, (Rivera-Correa & Orrico, 2013) y comparten características morfológicas como el cuerpo ancho, una membrana axilar desarrollada y una coloración que varía de amarillo a rojo en membranas y regiones ocultas (axilas, ingle, pantorrillas) (Faivovich, *et al.*, 2005; Jungfer, *et al.*, 2010). Aunque *D. manonegra* es una excepción, ya que presenta una coloración negro-azulada (Rivera-Correa & Orrico, 2013), las características moleculares permiten corroborar su agrupación dentro del complejo (Fouquet, *et al.*, 2007; Caminer, *et al.*, 2017).

En este contexto, en el presente estudio se amplía el rango de distribución y se reporta de un nuevo registro de distribución para *D. manonegra* y *D. sarayacuensis* en el piedemonte andino-amazónico de departamento de Caquetá, Colombia.

Metodología

Se utilizó el método de búsqueda libre y sin restricción por encuentro visual y captura directa en la vegetación asociada con charcas permanentes o temporales entre las 19:00 y las 23:00. *D. manonegra* se registró y se recolectó en cuatro localidades de Caquetá: en el municipio de Belén de los Andaquíes, veredas Pueblo Nuevo y Los Ángeles, y en el Resguardo Indígena La Serinda; en el municipio de Florencia, corregimiento el Caraño, veredas Villaraz y Paraíso, corregimiento de Santo Domingo, vereda La Holanda, y Reserva Natural y Ecoturística La Avispa, en tanto que *D. sarayacuensis* se registró y se recolectó en el municipio de Belén de los Andaquíes, en la vereda Agua Dulce, finca Las Brisas (Figura 1; Tabla 1).

Resultados

Se recolectaron 38 individuos pertenecientes a *D. manonegra*; en el municipio de Florencia, vereda Villaraz, se encontraron a una distancia de 8,06 km en línea recta de la localidad tipo; en la vereda Paraíso, a una distancia de 5,75 km en línea recta de la localidad tipo; en la vereda La Holanda y en la Reserva Natural y Ecoturística La Avispa, a 19,61 Km en

línea recta de la localidad tipo, y en el municipio de Belén de los Andaquíes y el Resguardo Indígena La Serinda, a una distancia de 32,10 km en línea recta de la localidad tipo (Figura 1; Tabla 1).

Se recolectaron tres especímenes de *D. sarayacuensis* en el municipio de Belén de los Andaquíes, vereda Agua Dulce, a 542,66 km de la localidad tipo y a 55 km en línea recta del último registro para esta especie en Caquetá (Figura 1; Tabla 1). Los especímenes recolectados se depositaron en la colección de herpetología del Museo de Historia Natural-UAM de la Universidad de la Amazonia (Florencia – Caquetá).

Descripción de ejemplares *Dendropsophus manonegra*.

Estos especímenes presentan cabeza ancha como su cuerpo, ligeramente más larga que ancha; la longitud de los dígitos palmares se observa en la siguiente fórmula I <II <IV <III (Figura 2A) y los dígitos pediales se observa en la siguiente fórmula I <II <III <V <IV (Figura 2B). Presenta un saco bucal único de coloración gris clara; presencia de dos parches glandulares ubicados en la región pectoral separados entre sí, con coloración blanca (Figura 3A); coloración café oscura y puntos negros dispersos, coloración negra brillante en partes ocultas de la región de la pantorrilla y membranas interdigitales pediales y manuales; línea bifurcada completa en la región cefálica y dorsolateral que comprenden hasta la ingle con mancha en el talón de color crema (Figura 3B).

Los ejemplares de *D. manonegra* vivos tienen el dorso café claro, con puntos de color negro dispersos; los flancos y los miembros anteriores y posteriores son de coloración marrón oscuro (Figura 4A); las regiones ocultas de las extremidades presentan una coloración negra, al igual

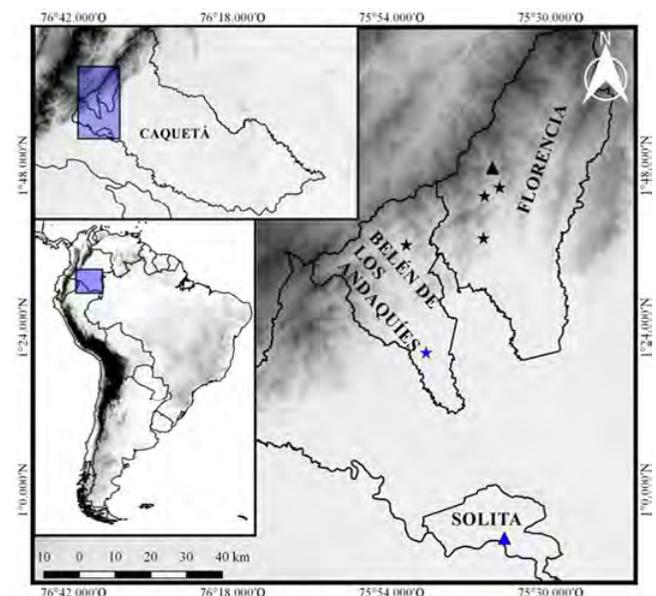


Figura 1. Registros de distribución para *Dendropsophus manonegra* y *Dendropsophus sarayacuensis*. Triángulo negro: antiguo registro; estrella negra: nuevos registros para *D. manonegra*; triángulo azul: antiguo registro; estrella azul: nuevo registro para *D. sarayacuensis*

Tabla 1. Registros por localidad de ranas del género *Dendropsophus* (Hylidae) en la región amazónica colombiana. UAM-H: Universidad de la Amazonia – Colección Herpetológica

Especie	Código UAM-H	Fecha	Localidad	Coordenadas	Altura (m s.n.m)
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 022	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 023	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 032	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 616	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 617	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 618	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 619	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 620	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 621	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 622	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 623	2005	Caquetá, Florencia, Villaraz	01°43.492' N, 75°39.981' O	850
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 989	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 990	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 991	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 992	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 993	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 994	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 995	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 996	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 997	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 998	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 999	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1000	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1001	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1002	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1003	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1004	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1005	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1007	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1008	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1009	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1010	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470

<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1011	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1012	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1013	2007	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Resguardo Indígena La Serinda	01°36'08.6" N, 75°51'49.1" O	470
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1512	2017	Caquetá, Florencia, Paraíso	01°44'46.46" N, 75°37'44.24" O	673
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1513	2017	Caquetá, Florencia, Paraíso	01°44'46.46" N, 75°37'44.24" O	673
<i>Dendropsophus manonegra</i>	UAM-H 1514	2017	Caquetá, Florencia, Paraíso	01°44'46.46" N, 75°37'44.24" O	673
<i>Dendropsophus sarayacuensis</i>	UAM-H 1485	2012	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Agua Dulce	01°20'19.50 N, 75°48'49.35" O	268
<i>Dendropsophus sarayacuensis</i>	UAM-H 1486	2012	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Agua Dulce	01°20'19.50 N, 75°48'49.35" O	268
<i>Dendropsophus sarayacuensis</i>	UAM-H 1487	2012	Caquetá, Belén de los Andaquíes, Agua Dulce	01°20'19.50 N, 75°48'49.35" O	268

que los dedos y las membranas interdigitales y axilares; tienen una línea bifurcada completa en las regiones cefálica y dorsolateral que se extienden hasta la ingle y manchas en el talón con una coloración amarilla (Figura 4B); el vientre, la barbilla, la garganta y las zonas ventrales de las extremidades anteriores y posteriores son de color gris;



Figura 2. (A-B). Extremidad anterior izquierda con tubérculos subarticulares redondos, tubérculo palmar plano y dividido, tubérculo metacarpiano interno plano y alargado, y extremidad posterior derecha con tubérculos metatarsianos internos grandes y ovoides y tubérculos subarticulares redondos en *Dendropsophus manonegra*



Figura 3. Vista dorsal (A) y ventral (B) de *Dendropsophus manonegra*. LCR 23 mm (UAM 1514 -MPO 061). Departamento de Caquetá, Colombia, Municipio de Florencia, vereda Paraíso

el saco bucal es de coloración verde; presenta dos parches glandulares ubicados en la región pectoral con una coloración blanca y separados entre sí, e iris marrón cobrizo con retículas pequeñas de color marrón oscuro (Figura 4) (Rivera-Correa & Orrico, 2013).

Descripción de los ejemplares de *Dendropsophus sarayacuensis*. Los especímenes presentan hocico redondeado en vista dorsal, y truncado de perfil; la longitud de los dígitos palmares se establece con la fórmula $I < II < III < IV$ (Figura 5A) y la de los dígitos pediales con la fórmula $I < II < V < III < IV$ (Figura 5B); las extremidades posteriores y el vientre son de textura granular; el dorso es liso con diminutos puntos de color negro en todo el cuerpo; presenta una coloración café claro con dos puntos de color blanco en la parte posterior del dorso y manchas de color crema con café claro sobre extremidades anteriores y posteriores (Figura 6A). Las líneas dorsolaterales de color crema comprenden desde el parpado inferior hasta el flanco medio y las líneas interoculares más anchas que largas son de color crema (Figura 6B).

Los ejemplares vivos de *D. sarayacuensis* tienen el dorso moteado oscuro con secciones de color café claro; presentan manchas claras que pueden ir del blanco al amarillo con bordes irregulares; la mancha interocular se extiende hasta el hocico y tiene una coloración amarilla o blanca clara, y las líneas dorsolaterales comprenden desde el parpado inferior hasta el flanco medio; las extremidades anteriores y posteriores son de color naranja; el iris es de color bronce y los machos tienen el saco bucal amarillo (Figura 7).

Discusión

Los hábitats donde se pueden encontrar estos organismos varían. Así, *D. sarayacuensis* se encontró en un fragmento de bosque secundario conservado de la región amazónica, a 268 m s.n.m. (Figura 1), con la presencia de cuerpos de agua sin ningún tipo de alteración antrópica, coincidente con lo registrado por Cochran & Goín (1970) y Aichinger (1987). Esta especie se ha registrado en los departamentos de Caquetá, Vaupés y Amazonas a alturas que van de los



Figura 4. Vista lateral de ejemplar vivo de *Dendropsophus manonegra*. Departamento de Caquetá, Colombia, municipio de Florencia, vereda La Holanda. Foto: D.H. Ruiz-Valderrama, 2019



Figura 5. (A-B). Extremidad anterior izquierda con tubérculos subarticulares redondos, tubérculo metacarpiano interno plano y alargado, y extremidad posterior izquierda con tubérculos metatarsianos internos grandes y ovoideos, tubérculos subarticulares redondos en *Dendropsophus sarayacuensis*.



Figura 6. Vista dorsal (A) y ventral (B) de *Dendropsophus sarayacuensis*. LCR 18 mm (UAM 1486-DHR 015). Departamento de Caquetá, Colombia, Municipio de Belén de los Andaquíes, vereda Agua Dulce, finca las Brisas.

70 hasta 210 m s.n.m. (Cochran & Goin, 1970; Acosta, 2000; Lynch, 2005; Lynch, 2007; Lynch & Suárez, 2011; Osorno, *et al.*, 2011). Este nuevo registro de distribución en Caquetá demuestra que la distribución de este organismo es amplia, con variaciones altitudinales entre los 100 y los 300 m s.n.m. en esta zona del departamento, si se tiene en cuenta la distancia de los antiguos registros de distribución para la especie.

Por el contrario, *D. manonegra* se recolectó en zona de montaña, en cuerpos de agua sin la presencia de cobertura de dosel, similar a lo registrado por Rivera-Correa & Orrico, 2013, pero en sitios con vegetación herbácea de la familia Juncaceae, Poaceae y Heliconiaceae (Ricaurte, *et al.*, 2015). Las zonas donde se recolectaron estos organismos presentan una geoforma uniforme, ya que están situadas en la parte baja de una montaña, lo que permite la formación de cuerpos de agua temporales y permanentes por escorrentía y precipitación que son fundamentales para los procesos reproductivos de esta especie. Cabe resaltar que estas zonas presentan modificaciones antrópicas como la presencia de construcciones humanas, lo cual indica que *D. manonegra* tiene la capacidad de soportar y colonizar microhábitats modificados por la actividad antrópica.

Dendropsophus manonegra se diferencia de otras especies del complejo *D. leucophyllatus* por la presencia de una coloración negra azulada en sus regiones ocultas, membranas y dígitos (Rivera-Correa & Orrico, 2013). Se considera que es la única especie con esta coloración, en tanto que *D. sarayacuensis*, al presentar una coloración clara, suele confundirse con otras especies como *D. leucophyllatus*, pero se diferencia de esta por las bandas dorsolateral delgadas que llegan hasta la mitad del cuerpo y la formación de manchas irregulares en la superficies dorsales de las extremidades (Jungfer, *et al.*, 2010).



Figura 7. Vista lateral de ejemplar vivo de *Dendropsophus sarayacuensis*. Departamento de Caquetá, Colombia, Municipio de Belén de los Andaquíes, vereda Agua Dulce. Foto: D.H. Ruiz-Valderrama, 2019

Los nuevos puntos de distribución para esta especie en el departamento del Caquetá tienen una distribución altitudinal que permite agruparla en el piedemonte, en alturas que comprenden desde los 400 hasta los 700 m s.n.m. con distancias significativas entre los puntos (Figura 1), lo que coincide con lo registrado por **Rivera-Correa & Orrico** (2013), quienes recolectaron ejemplares desde los 740 hasta los 1.040 m s.n.m. en los departamentos de Caquetá, Cauca y Putumayo, aunque en estos dos últimos departamentos hay localidades sin precisar.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de la Amazonia, en especial al Semillero de Investigación en Herpetología – SEH, que nos facilitó la identificación y los registros de distribución; al Centro de Investigación de la Biodiversidad Andino Amazónica, INBIANAM, por el préstamo de los equipos y las instalaciones para la investigación, y al laboratorio de Entomología de la Universidad de la Amazonia, por el préstamo del equipo para la toma de fotografías macro, fundamentales para la elaboración de esta investigación.

Contribución de los autores

ANM concibió el estudio. ANM y DHRV realizaron la toma de datos en campo. Los dos autores participaron en la escritura del documento.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses con respecto al contenido y los resultados del artículo.

Referencias

Acosta-Galvis, A. R. (2019). Lista de los Anfibios de Colombia. Batrachia. Villa de Leyva. Boyaca. Colombia. Fecha de consulta: abril de 2019. Disponible en: <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>

Aichinger, M. (1987). Annual activity patterns of anurans in a seasonal Neotropical environment. *Rev. Oecologia*. **71** (4): 583-592.

Acosta-Galvis, A. R. (2000). Ranas, salamandras y caeciliias (Tetrapoda: Amphibia) de Colombia. *Rev. Biota colombiana*. **1** (3): 290-319.

Caminer, M. A., Mila, B., Jansen, M., Fouquet, A., Vanegas, P. J., Chávez, G., Lougheed, S., Ron, S. R. (2017). Systematics of the *Dendropsophus leucophyllatus* species complex (Anura: Hylidae): Cryptic diversity and the description of two new species. *Rev. PLoS one*. **12** (3): 1-42.

Cochran, D. M. & Goin, C. J. (1970). Frogs of Colombia. Edit. United States National Museum Bulletin. United States. p. 288.

Duellman, W. E., Marion, A. B., Blair, S. B. (2016). Phylogenetics, classification, and biogeography of the treefrogs (Amphibia: Anura: Arboranae). *ZOOTAXA*. **4104** (1): 1-109.

Faivovich, J., Haddad, C. F., Garcia, P. C., Frost, D. R., Campbell, J. A., Wheeler, W. (2005). Systematic review of the frog family hylidae, with special reference to

hylinae: Phylogenetic analysis and taxonomic revision. *Bulletin of the American Museum of Natural History*, New York. United States. p. 240.

Frost D.R. (2019). Amphibian species of the World: An online reference. Version 6.0. American Museum of Natural History, New York. Fecha de consulta: junio de 2019. Disponible en: <http://research.amnh.org/herpetology/amphibia/index.html>

Fouquet, A., Gilles, A., Vences, M., Marty, C., Blanc, M., Gemmell, N. J. (2007). Underestimation of Species Richness in Neotropical Frogs Revealed by mtDNA Analyses. *PLoS one*. **2** (10): 1-10.

Hödl, W. (1991). Arboreal oviposition in the Neotropical treefrogs *Hyla brevifrons* and *Hyla sarayacuensis* (Ahura: Hylidae). *ÖWF*. **42**: 53-62.

Jungfer, K., Reichle, S. Piskurek O. (2010). Description of a new cryptic southwestern Amazonian species of leaf-gluingtreetfrog, genus *Dendropsophus* (Amphibia: Anura: Hylidae). *Salamandra*. **46** (4): 204-213.

La Marca, E., Azevedo-Ramos, C., Coloma, L. A., Ron, S. (2004). *Dendropsophus sarayacuensis*. The IUCN Red List of Threatened Species 2004. Fecha de consulta: abril de 2019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2004.RLTS.T55644A11346531>

Lynch, J. D. (2005). Discovery of the richest frog fauna in the world -an exploration of the forests to the north of Leticia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **29** (113): 581-588.

Lynch, J. D. (2007). Anfibios. Capítulo 2, Diversidad biológica del sur de la Amazonia colombiana. p. 595-600.

Ruiz, S. L., Sánchez, E., Tabares, E., Prieto, A., Arias, J. C., Gómez, R., Castellanos, D., García, P., Rodríguez, L. (2007). Diversidad biológica y cultural del sur de la Amazonia colombiana - Diagnóstico. Corpoamazonia, Instituto Humboldt, Instituto Sinchi, UAESPNN, Bogotá D.C. p. 637.

Suárez, A. & Lynch, J. D. (2011). Clave ilustrada de los renacuajos en las tierras bajas al oriente de los Andes con énfasis en Hylidae. *Caldasia*. **33** (1): 235-270.

Osorno, M., Gutiérrez-Lamus, D. L., Blanco, J. C. (2011). Anfibios en un gradiente de intervención en el noroccidente de la Amazonia colombiana. *Colombia Amazónica*. **4**: 143-160.

Rivera-Correa, M. & Orrico, V. G. (2013). Description and phylogenetic relationships of a new species of treefrog of the *Dendropsophus leucophyllatus* group (Anura: Hylidae) from the Amazon basin of Colombia and with an exceptional color pattern. *ZOOTAXA*. **3686** (4): 447-460.

Ricaurte, L. F., Núñez-Avellaneda, M., Pinilla, M. C., Pinilla, M. C., Marín, C. A., Velásquez-Valencia, A., Alonso, J. C., Mojica, J. I., Betancourt, B., Salazar, C., Caicedo, D., Acosta-Santos, A., Castro, W., Argüelles, J. H. (2015). Inventario y tipificación de humedales en la cuenca del río Ortegua, Departamento del Caquetá, Amazonia Colombiana. Edit. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi. p. 128.

Rodríguez, L. O. & Duellman, W. E. (1994). Guide to the frogs of the Iquitos Region, Amazonian Perú. Natural History Museum. The University of Kansas. Kansas. United States. p. 113.

Riqueza florística y estructura de la vegetación acuática y terrestre en el humedal El Salitre, Bogotá, Colombia

Diego Mauricio Cabrera Amaya*, José Wilfredo López Cruz

Jardín Botánico de Bogotá "José Celestino Mutis", Bogotá, D.C., Colombia

Resumen

El humedal El Salitre es el último humedal urbano de referencia para Bogotá debido a las buenas condiciones tróficas de sus aguas, pero poco se sabe de las condiciones de su vegetación. Se delimitó un área siguiendo los lineamientos de la política de humedales del Distrito Capital para analizar la composición florística y la estructura de la vegetación terrestre y acuática. Se utilizaron 20 parcelas de vegetación en las que se registró la riqueza y el porcentaje de cobertura con el método de punto intercepto. También se utilizó la información del arbolado urbano de Bogotá. Se encontraron 144 especies distribuidas en 109 géneros y 60 familias. Las familias más ricas en especies de vegetación terrestre fueron Fabaceae, Asteraceae, Rosaceae, Malvaceae y Myrtaceae, en tanto que las de vegetación acuática fueron Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Rosaceae y Cyperaceae. El humedal El Salitre presenta poca riqueza en comparación con otros humedales de la Sabana de Bogotá debido, probablemente, a su pequeña área, pero cuenta con la composición típica de formas de vida y las comunidades acuáticas más características de los humedales, como praderas gramínoideas o enraizadas emergentes y arbustales inundables. Se confirmó el humedal El Salitre como referencia para el resto de los humedales de Bogotá también en cuanto a la vegetación acuática que alberga. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Palabras clave: Arbolado urbano; Clasificación; Esfuerzo de muestreo; Ordenación; Punto intercepto.

Abstract

Floristic richness and structure of aquatic and terrestrial vegetation in El Salitre wetland, Bogotá, Colombia

El Salitre wetland is the last reference wetland for Bogotá given the good trophic conditions of its waters, but little is known about its aquatic and terrestrial vegetation. We defined an area according to the Wetlands Policy of the Capital District to analyze the floristic composition and the structure of the aquatic and terrestrial vegetation. We used 20 vegetation plots where we registered the richness and the cover percentage using the point intercept method. We also used the information regarding urban forests of Bogotá. We found 144 species distributed in 109 genera and 60 families. The richest families in terrestrial vegetation species were Fabaceae, Asteraceae, Rosaceae, Malvaceae, and Myrtaceae, while the richest ones in aquatic vegetation were Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Rosaceae, and Cyperaceae. El Salitre wetland has a low richness compared with other wetlands in the Bogotá savanna, maybe due to its small area, but it has the typical composition of life forms and most characteristic aquatic communities of wetlands such as graminoid meadows or rooted emergent meadows and flooding shrublands. We confirmed El Salitre wetland as reference for the rest of Bogotá wetlands, but now also because of the aquatic vegetation there present. © 2019. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.

Key words: Classification; Ordination; Sampling effort; Point intercept; Urban forest.

Introducción

El humedal El Salitre hace parte del sistema de 15 humedales urbanos de Bogotá, y aunque es uno de los más pequeños, también constituye un referente de la calidad de agua para el resto de los humedales de la capital (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017**). Actualmente quedan 15 humedales urbanos reconocidos, los cuales son importantes para la ciudad porque cumplen importantes funciones como la conservación de la biodiversidad, el control de inundaciones y la erosión, la retención de nutrientes y la recarga de acuíferos de la sabana, además de constituir zonas de

recreación y educación ambiental (**Van der Hammen, et al., 2008**). En el 2010 estos humedales ocupaban un área que apenas representaba el 1,35 % de la extensión ocupada por lagos y humedales a principios del siglo XX en Bogotá (**Escobar, 2016**). Los que han sobrevivido hoy se encuentran aislados, han perdido su conectividad ecológica

*Correspondencia:

Diego Mauricio Cabrera Amaya, dmcabrera@unal.edu.co

Recibido: 3 de enero de 2019

Aceptado: 11 de julio de 2019

Editor: Gabriel Roldán

y presentan problemas de degradación y contaminación ambiental con graves consecuencias para su funcionamiento y su conservación. A diferencia del resto de los humedales, El Salitre no presenta vertimientos de aguas residuales (Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017).

Existen algunos referentes sobre la vegetación acuática y terrestre en el humedal Jaboque y el parque La Florida, entre los cuales se destacan los estudios de la flora acuática de la Sabana de Bogotá y el valle del río Ubaté (Schmidt-Mumm, 1998), y los trabajos de caracterización, manejo y restauración de la vegetación del humedal Jaboque (Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental, ADESSA, & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB, 2006; Córdoba, 2016; Hernández-R. & Rangel-Ch., 2009), así como los diversos estudios paleoecológicos e históricos sobre la vegetación de la Sabana de Bogotá durante el Pleistoceno (Cleef & Hooghiemstra, 1984; Van der Hammen, 1986), los cuales pueden proporcionar pistas para entender el tipo de vegetación original de los humedales de la región.

Sin embargo, a pesar de estos y otros trabajos sobre los humedales de la ciudad, todavía no se conocen las características y las dinámicas bióticas de su flora. Por esta razón, el objetivo del presente trabajo fue analizar la riqueza florística y la estructura de la vegetación acuática y terrestre del humedal El Salitre. Se plantearon las siguientes preguntas de investigación teniendo en cuenta las características de El Salitre comparadas con las del resto de humedales de la Capital (Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017): 1) ¿cómo es la riqueza y la composición?; 2) ¿cuáles son las comunidades vegetales más representativas?, y 3) ¿cómo es la estructura de la vegetación? Las hipótesis planteadas sobre estas preguntas fueron: 1) la riqueza será menor que la esperada para los humedales más representativos de la Sabana de Bogotá, compuesta por las especies más frecuentes de estos humedales pero con una alta proporción de especies exóticas, especialmente en el componente acuático; 2) las comunidades serán principalmente representativas del litoral de los humedales dada la poca profundidad del cuerpo de agua, así como de la presencia de potreros de zonas urbanas y periurbanas de la ciudad, y 3) la mayor abundancia de plantas se registrará en especies exóticas, especialmente *Cenchrus clandestinus*, con mayor porcentaje de cobertura en los estratos bajos, principalmente en la vegetación acuática, aunque en la vegetación terrestre los árboles exóticos dominarán en los estratos altos.

Materiales y métodos

Área de estudio. El humedal El Salitre se localiza dentro del Parque Recreación-deportivo El Salitre en la localidad de Barrios Unidos (Bogotá, D.C.) (Concejo de Bogotá, 2011) (Figura 1). Se ubica a 2.600 m s.n.m. en la Sabana de Bogotá, con una temperatura promedio anual de 14,2 °C y una precipitación total anual entre 900 y 1.000 mm (Alcaldía Local de Barrios Unidos, 2014). Es un humedal de origen artificial

(Departamento Administrativo de Medio Ambiente-DAMA, 2002), cubre un área de 6,4 Ha con una zona inundable de 13,2 Ha y una profundidad media menor a 1,5 m (Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017). En el presente trabajo se propone una nueva delimitación del humedal, ya que el polígono actual solo tiene en cuenta una ronda de 30 m alrededor del cuerpo de agua definida provisionalmente (Concejo de Bogotá, 2011) por la Secretaría de Ambiente (Secretaría de Ambiente-SDA, 2009), delimitación que no contempló los parámetros de la actual definición de humedal de la política de humedales del Distrito Capital (Alcalde Mayor de Bogotá, 2007; DAMA, 2006) y se dejó por fuera la zona de manejo y preservación ambiental:

“Los humedales son ecosistemas de gran valor natural y cultural, constituidos por un cuerpo de agua permanente o estacional de escasa profundidad, una franja a su alrededor que puede cubrirse por inundaciones periódicas (Ronda hidráulica) y una franja de terreno no inundable, llamada Zona de manejo y preservación ambiental. Estas áreas (Ronda hidráulica y Zona de manejo y preservación ambiental) deben tener un tamaño acorde con las características ecosistémicas particulares”.

El nuevo polígono ya se encuentra cercado en una gran proporción y abarca amplias zonas verdes de pastizales arbolados abiertos y densos que pueden tener conectividad ecológica con los complejos deportivos y recreativos El Salitre y Parque Simón Bolívar (Figura 1), especialmente por la baja afluencia de personas y los bajos niveles de ruido allí presentes (Obs. Pers.).

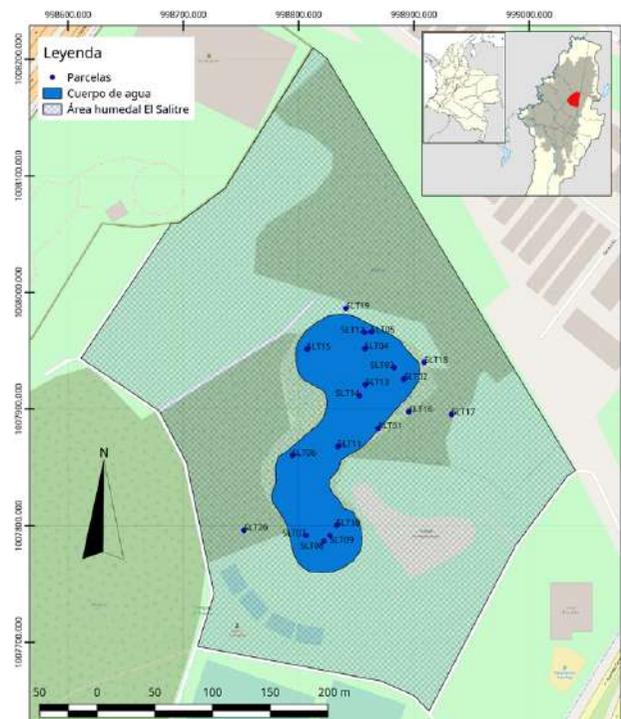


Figura 1. Mapa de la ubicación del humedal El Salitre y los puntos de muestreo. Fuente: © Colaboradores de OpenStreetMap, 2018.

Fase de campo. Se hizo un muestreo entre los meses de abril y mayo de 2017 que incluyó 20 parcelas de vegetación, 11 de ellas de 25 x 1 m (25 m²) para la vegetación acuática, las cuales se ubicaron en bandas concéntricas partiendo de la zona litoral hasta un metro de profundidad de la columna de agua. Para la vegetación leñosa terrestre (zona de manejo y preservación ambiental), se establecieron cinco parcelas de 50 x 2 m (100 m²). En todas las parcelas se estimó el porcentaje de cobertura de las especies mediante el método de punto intercepto (Matteucci & Colma, 1982), registrando el contacto por estrato de las especies en 50 puntos dentro de cada parcela. Los estratos de la vegetación se definieron de la siguiente forma: rasante: 0-0,1 m; herbáceo: 0,1-1 m; arbustivo bajo: 1-1,5 m; arbustivo alto: 1,5-3 m; subarbóreo bajo: 3-5 m; subarbóreo alto: 5-12 m; arbóreo inferior: 12-25 m, y arbóreo superior: >25 m. Se hizo el registro fotográfico de cada especie encontrada y se recolectaron muestras botánicas, las cuales se preservaron para su posterior secado e identificación y se depositaron en la colección del herbario del Jardín Botánico de Bogotá (JBB).

Métodos de análisis. Se elaboró una lista de las especies presentes en el humedal y para complementar la información florística, se incluyó la información del censo del arbolado urbano disponible en el visualizador del Sistema de Gestión del Arbolado Urbano de Bogotá, SIGAU (2017). Con ayuda del programa EstimateS 9.0 (Colwell, 2013) se construyeron las curvas de extrapolación y rarefacción (Colwell, et al., 2012) y se estimó la riqueza esperada mediante el modelo Chao 2, utilizando los 50 puntos de las parcelas como unidad de muestreo (SIGAU, 2017). La vegetación se clasificó con el programa PAST (Hammer, et al., 2001), utilizando el porcentaje de cobertura por

especie como variable de comparación, el índice de Horn (Horn, 1966) como medida de similitud y el método de agrupamiento UPGMA (*Unweighted Pair Group Method using Arithmetic averages*). Se definieron los grupos con un nivel de similitud del 50 % y se visualizaron mediante un análisis multidimensional no métrico (*non-metric multidimensional scaling*, NMDS), también ejecutado con el PAST y utilizando el índice de Horn. Por último, se hizo el análisis descriptivo del porcentaje de cobertura por estratos para cada comunidad encontrada (Matteucci & Colma, 1982) y la descripción general del arbolado urbano en el polígono delimitado, incluida la altura, el diámetro de copa, el diámetro del tronco y el grupo taxonómico.

Resultados

Riqueza. Se encontraron 144 especies distribuidas en 109 géneros y 60 familias (Tabla 1); la lista completa de especies se presenta en el Anexo S1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/824/2545>. El grupo taxonómico mejor representado fue el de las magnoliófitas, especialmente las eudicotiledóneas (103 especies), seguido por el de las monocotiledóneas (20 especies) (Tabla 1). Las familias de vegetación terrestre más ricas en especies fueron Fabaceae, Asteraceae, Rosaceae, Malvaceae y Myrtaceae (Tabla S1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/824/2546>), así como los géneros *Abutilon* y *Acacia*, con más de una especie (Tabla S2, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/824/2547>). En cuanto a la vegetación acuática, las familias con mayor riqueza fueron Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Rosaceae y Cyperaceae (Tabla S1), así como los géneros *Baccharis*, *Cyperus*, *Juncus* y *Polypogon*, con más de una especie (Tabla

Tabla 1. Patrón de distribución de la riqueza según los grandes grupos taxonómicos en el humedal El Salitre

Reino	División	Clase	Familias	Géneros	Especies	
Fungi	Ascomycota	Lecanoromycetes	4	6	9	
	Total Fungi		4	6	9	
	Charophyta	Charophyceae	1	1	1	
	Marchantiophyta	Jungermanniopsida	1	1	1	
	Bryophyta	Bryopsida	2	1	3	
	Monilophyta	Polypodiopsida	2	2	3	
Plantae	Gnetíferas	Clado Gnepinos	1	1	2	
		Clado Cupresófitas	1	1	1	
		Total Gnetíferas	2	2	3	
	Magnoliophyta	Magnoliidae		1	1	1
		Eudicotyledoneae		38	80	103
		Monocotyledoneae		9	15	20
		Total Magnoliophyta		48	96	124
Total Plantae			56	103	135	
Total general			60	109	144	

S2). Más del 80 % de las especies son de tipo terrestre, y cerca del 60 % son exóticas, principalmente en el arbolado del humedal.

Comunidades vegetales. Como producto del análisis de clasificación se encontraron cuatro comunidades con un nivel de similitud del 50 % según el índice de Horn (Figura 2A), de las cuales tres son acuáticas y una es terrestre. A continuación se describe brevemente cada una según la nomenclatura utilizada en los humedales del Distrito Capital (Van der Hammen, *et al.*, 2008).

1. Pradera graminoide inundable: se caracteriza por la presencia de especies enraizadas emergentes de gran porte como *Typha latifolia* y *Juncus effusus*, así como por especies terrestres tolerantes a las inundaciones como *Erechtites valerianifolia* y *Senecio madagasacriensis*. La columna de agua tiene una profundidad promedio de 20 cm (Figura 3A).
2. Pastizal arbolado: básicamente está constituido por especies terrestres de zonas abiertas como *Cenchrus clandestinus*, *Trifolium repens*, *Anthoxanthum odoratum* y *Cucurbita ficifolia*, y algunos individuos arbóreos sembrados, principalmente *Pinus patula*, *Fraxinus chinensis*, *Acacia decurrens* y *Paraserianthes lophantha*. No presenta inundación evidente (Figura 3B).
3. Pradera enraizada emergente: se caracteriza por la presencia de especies enraizadas emergentes de bajo porte como *Eleocharis macrostachya* y *Juncus microcephalus*, así como de algunas especies sumergidas como *Nitella clavata* y *Utricularia gibba*. La profundidad de la columna de agua es, en promedio, de 1 m (Figura 3C).
4. Arbustal inundable: se caracteriza por la mezcla de especies acuáticas como *J. effusus* y especies leñosas tolerantes a la inundación como *Salix viminalis* y *Salix humboldtiana*. La columna de agua tiene una profundidad promedio de 20 cm (Figura 3D).

Las comunidades con mayor similitud son la pradera graminoide inundable y el pastizal arbolado, ya que comparten algunas de las especies más abundantes del estudio, como *C. clandestinus*. A estas dos les sigue la pradera enraizada emergente, en la cual también hace presencia *C. clandestinus* en una muy baja proporción, aunque comparte más especies con la pradera graminoide inundable que con el pastizal arbolado. Por último, con una sola parcela, se encuentra el arbustal inundable, en donde la presencia de *C. clandestinus* es mínima (Figura 2A). Al ordenar las comunidades con el NMDS y el índice de Horn, se observó que sobre el extremo izquierdo de la coordenada 1 está la pradera enraizada emergente, con mayor profundidad, seguida hacia la mitad del eje por la pradera graminoide inundable y el arbustal inundable, ambas con características de litoral, y, finalmente, en el extremo derecho del eje, está el pastizal arbolado, la comunidad con poco o ningún nivel de inundación (Figura 2B).

La riqueza estimada y la riqueza total registradas evidenciaron que la comunidad con más especies es el pastizal arbolado, seguido de la pradera graminoide inundable, y en los últimos lugares, la pradera enraizada emergente y el arbustal inundable (Tabla 2 y Figura 4). El esfuerzo de muestreo fue representativo para las comunidades acuáticas en la medida en que el intervalo de confianza superior fue mayor al intervalo de confianza inferior de la riqueza esperada y que, además, registró más del 90 % de la riqueza esperada (Tabla 2). Lo contrario ocurrió con la vegetación terrestre, la cual no tuvo representatividad estadística ni un porcentaje apreciable de la riqueza registrada (pastizal arbolado) (Tabla 2). Al hacer la curva de extrapolación de la riqueza con 1.000 interceptos, se observó el mismo patrón que en la riqueza registrada (Figura 4) y se pudo calcular el esfuerzo de muestreo adicional necesario para alcanzar el límite inferior de la riqueza esperada, que para el caso del pastizal

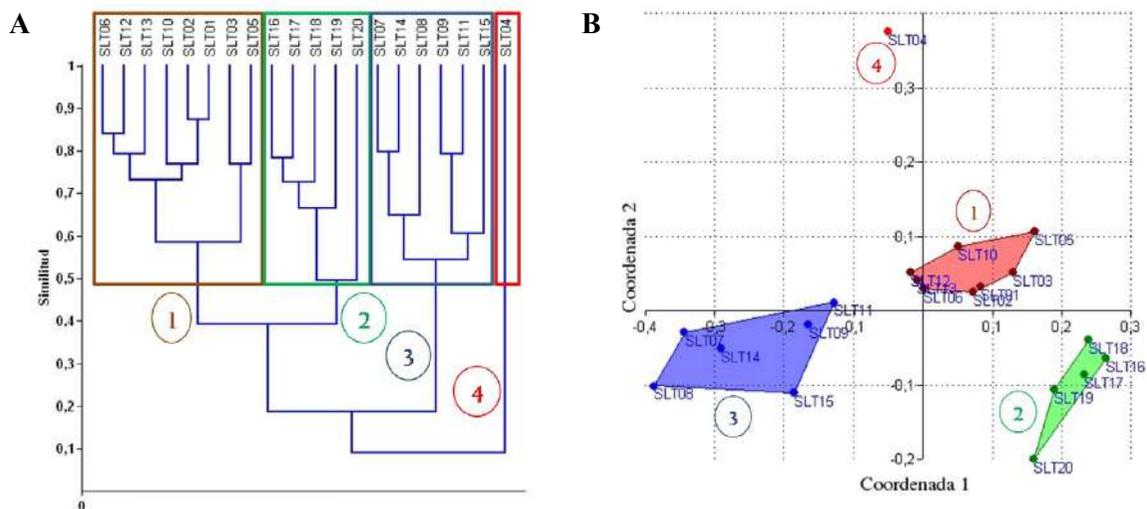


Figura 2. Clasificación y ordenación de las comunidades vegetales presentes en el humedal El Salitre. **A)** Dendrograma de clasificación utilizando el índice de Horn. **B)** Diagrama del NMDS de los grupos resultantes. 1) Pradera graminoide inundable; 2) pastizal arbolado; 3) pradera enraizada emergente, y 4) arbustal inundable



Figura 3. Comunidades vegetales del humedal El Salitre. **A-B)** Pradera graminoide inundable. **C-D)** Pradera enraizada emergente. **E)** Arbustal inundable. **F)** Pastizal arbolado. Fotos: Diego Cabrera

arbolado sería de un 71 % adicional (Tabla 2), probablemente debido a la distribución no aleatoria de los individuos. En todos los casos, el número de especies registrado con las colecciones generales fue mayor al registrado con el punto intercepto (observado y extrapolado), y estuvo dentro del rango establecido por la riqueza esperada según el modelo de Chao 2 (Tabla 2).

Estructura de la vegetación. La mayor concentración de la cobertura se registró en los estratos herbáceo y rasante en todas las comunidades, con excepción del arbustal inundable, en donde los estratos arbustivos y subarbóreos tienen más cobertura (Figura 5). En la pradera enraizada emergente hay una ligera ventaja en cobertura del estrato rasante frente al herbáceo, en donde tienen mayor cobertura

Tabla 2. Riqueza estimada y esfuerzo de muestreo por comunidad vegetal en el humedal El Salitre

Comunidad	Número de especies registrado				Riqueza esperada: Chao 2			S obs / S est	S obs IC(+) >= S est IC(-)	%N: S obs >= S est IC(-)	N
	Colección general	S obs	S obs IC(-)	S obs IC(+)	S est	S est IC(-)	S est IC(+)				
Graminoide inundable	49	39	34,8	43,2	43,0	39,8	58,8	91%	Sí	11%	385
Enraizada emergente	21	15	15	15	15	15	15	100%	Sí	0%	250
Arbustal inundable	5 (17)	3	3	3	3	3	3	100%	Sí	0%	49
Pastizal arbolado	70	40	30,5	49,5	74,9	49,6	166	53%	No	71%	247
Total general	144	68	59,7	76,3	87,4	74,1	130,3	78%	Sí	41%	931

S: riqueza (#especies); Obs: observado; Est: estimado/esperado; IC(-): intervalo de confianza de 95 %, límite inferior; IC(+): intervalo de confianza de 95 %, límite superior; S obs/S est: porcentaje de la riqueza observada frente a la esperada; S obs IC(+) >= S est IC(-): superposición entre el intervalo de confianza superior de la riqueza observada y el intervalo de confianza inferior de la riqueza esperada; N: número de interceptos; %N S obs IC(+) >= S est IC(-): esfuerzo de muestreo adicional necesario para igualar o superar el intervalo de confianza inferior de la riqueza esperada

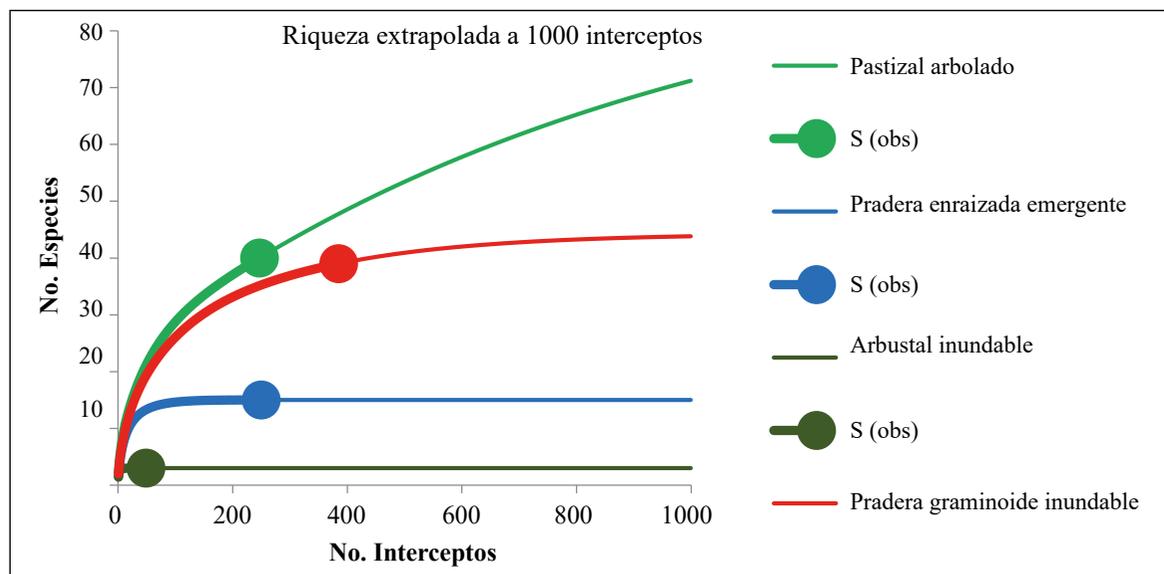


Figura 4. Curva de acumulación de especies en el humedal El Salitre. S obs: riqueza observada.

Eleocharis macrostachya y *Polygonum hydropiperoides* (acuáticas), la primera muy abundante también en el herbáceo junto a *Typha latifolia* y *Cyperus rufus* (acuáticas); en esta comunidad predominan las especies nativas (Figura 5A). En la pradera graminoide inundable las especies más abundantes fueron *C. clandestinus* (terrestre) y *J. effusus* (acuática), con tendencia a una mayor abundancia de especies exóticas (mayormente terrestres) (Figura 5B). En el arbustal inundable los estratos arbustivo alto y subarbustivo alto presentan los mayores valores de cobertura, básicamente representada por *S. humboldtiana* (nativa), mientras que *S. viminalis* (exótica) es la más abundante en los estratos arbustivos y *J. effusus* (acuáticas) se destaca también en el herbáceo; esta comunidad es una mezcla de especies nativas y exóticas tolerantes a la inundación (Figura 5C). Por último, en el pastizal arbolado *C. clandestinus* (exótica) se presenta la mayor cobertura en los estratos rasante y herbáceo, en

donde solo se destaca en segundo lugar *C. ficifolia* (nativa); los estratos superiores tienen cerca del 40 % de cobertura y se destacan allí las especies exóticas *P. patula*, *A. decurrens* y *Fraxinus uhdei* (Figura 5D).

Al observar en detalle el arbolado del humedal con base en los datos del Jardín Botánico de Bogotá (SIGAU, 2017), fue posible apreciar que la mayor aglomeración de individuos de gran porte (mayor altura, ancho de copa y diámetro a la altura del pecho, DAP) se encuentra en los sectores norte y oriental del humedal, la mayoría de ellos pertenecientes a la especie *P. patula*, además de *Acacia* spp. y *F. uhdei* (Figura S1A, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/824/2584>). Otro gran núcleo de árboles, esta vez de porte medio, se encuentra en el costado occidental, con una gran proporción de individuos de *A. decurrens* y *Pittosporum undulatum* (Figura S1B, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/>

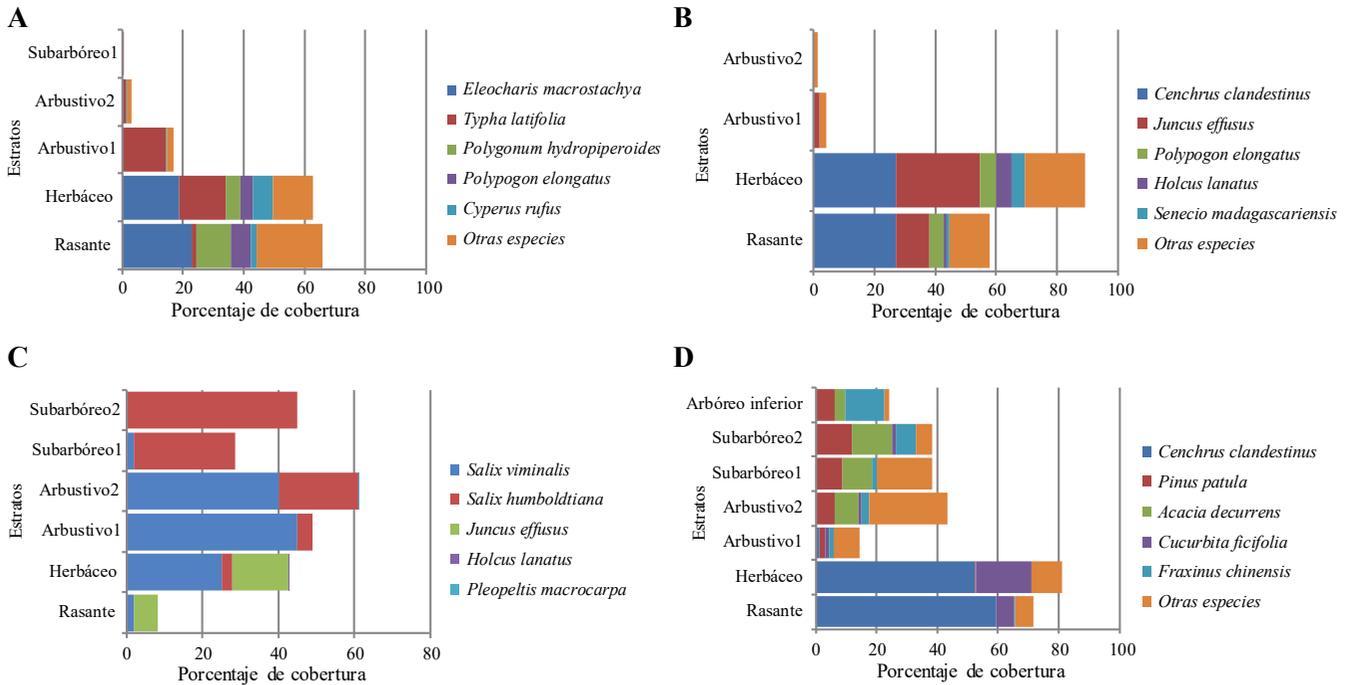


Figura 5. Porcentaje de cobertura por estrato y especies más abundantes. **A)** Pradera enraizada emergente. **B)** Pradera graminoide inundable. **C)** Arbustal inundable. **D)** Pastizal arbolado.

view/824/2584). Por último, hacia el sur del humedal se encuentra una gran aglomeración de individuos de pequeño porte, de tipo arbustivo o nativos, más recientemente sembrados, puesto que es la zona deportiva del Parque Recreación-deportivo El Salitre (Figura S1). Hay un amplio espacio con una baja densidad de árboles entre el costado norte del cuerpo de agua y el Parque de Atracciones Salitre Mágico, el cual ha sido destinado por la administración distrital para la construcción de escenarios deportivos (Figura S1).

Discusión

Riqueza y composición. Los resultados sobre riqueza y composición de la vegetación acuática comprobaron parcialmente la hipótesis planteada en este sentido, pues el número de especies exóticas fue muy bajo. En cuanto a la vegetación terrestre, la hipótesis inicial se cumplió en lo referente a la composición y el porcentaje de especies exóticas, pero se encontró una riqueza mayor a la esperada, lo que indicaría que el humedal tiene mejores condiciones de hábitat para el desarrollo espontáneo o natural de las especies nativas que las esperadas; vale la pena recordar que antes, en la época del Parque de diversiones El Salitre, era un antiguo lago artificial recreativo (Abril-Pulido, 2014). La riqueza de la vegetación es claramente menor que la reportada para los humedales de la Sabana de Bogotá (Schmidt-Mumm, 1998) y que la del humedal Jaboque y sus alrededores, informada en los más recientes estudios (Cabrera-Amaya, et al., 2017), por lo menos en lo referente a la vegetación acuática; en cuanto a la vegetación terrestre, la riqueza encontrada se

acerca al 60 % de la riqueza en el arbolado urbano de la microcuenca Jaboque (Cabrera-Amaya, et al., 2017). Esto es razonable teniendo en cuenta que el área del humedal El Salitre es pequeña comparada con otros humedales de la Sabana de Bogotá (incluidos su cuerpo de agua y las zonas circundantes propuestas en este estudio), ya que es de esperar que haya menos especies en fragmentos pequeños que en fragmentos grandes de vegetación (Connor & McCoy, 2001). Por ejemplo, en la microcuenca del humedal Jaboque, el Jardín Botánico de Bogotá ha reportado menos especies en el humedal La Florida y en el humedal Jaboque Norte que en el humedal Jaboque propiamente dicho, ya que este es el más grande de los tres (Cabrera-Amaya, et al., 2017). En cuanto a la composición de la flora, la mayoría de las especies acuáticas del humedal El Salitre (nativas y exóticas) son muy frecuentes en los humedales de la Sabana de Bogotá (Cabrera-Amaya, et al., 2017; Schmidt-Mumm, 1998; Wijninga, et al., 1989), pero se encuentran ausentes algunas de las catalogadas como invasoras o potencialmente invasoras de los humedales de Bogotá, tales como *Eichhornia crassipes*, *Azolla filiculoides* o *Limnobium laevigatum* (Díaz-Espinosa, et al., 2012), aunque hoy se sabe que estas proliferan cuando hay altas concentraciones de nutrientes en el agua, principalmente debidas a la contaminación por vertimientos (Beltrán-Vargas & Rangel-Ch., 2013). Estos hallazgos respaldan las conclusiones sobre el buen estado trófico del humedal El Salitre según los criterios limnológicos reportados anteriormente (Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017). Además, la presencia del alga caroficea *N. clavata* en la vegetación acuática es un registro de interés para este

humedal, pues anteriormente solo se había registrado en el municipio de Mosquera (**Schmidt-Mumm, 1998**). Con respecto a la vegetación terrestre, se destaca que en un área tan pequeña haya un porcentaje alto de las especies del arbolado urbano de los humedales, como es el caso del humedal Jaboque (**Cabrera-Amaya, et al., 2017**). Ello se explicaría por el tipo de siembras que realizan las entidades distritales, pues estas especies están representadas por individuos muy pequeños, es decir, que se han sembrado recientemente (**SIGAU, 2017**), y no son tan abundantes como las pocas especies dominantes encontradas, como se discutirá más adelante. Se destaca también el registro de la orquídea terrestre *Stenorrhynchos speciosum*, protegida por la legislación vigente como especie en veda (**INDERENA, 1977**).

Comunidades vegetales. Los resultados sobre las comunidades vegetales del componente acuático del humedal El Salitre desvirtúan la segunda hipótesis planteada, pues no solo hay vegetación de litoral (dos comunidades), sino también de aguas abiertas, a pesar de la poca profundidad del humedal. Los humedales de la Sabana de Bogotá presentan una amplia gama de comunidades acuáticas según su ubicación por batimetría y regímenes de inundación (**Hernández-R. & Rangel-Ch., 2009; Schmidt-Mumm, 1998**), y también según el patrón de sedimentación, de nutrientes y de contaminantes que puedan presentar los cuerpos de agua (**Beltrán-Vargas & Rangel-Ch., 2013**). En el humedal El Salitre se observan tres comunidades de vegetación acuática que, inicialmente, no aparecen muy claramente en el análisis de clasificación, pues dos de ellas aparentemente presentan similitudes con la comunidad terrestre de pastizal arbolado; sin embargo, al observar la ordenación, su carácter acuático se revela por completo. Así, cobra más peso el tipo de especies acuáticas únicas que comparten estas comunidades que las especies terrestres compartidas con el pastizal arbolado, aunque sean muy abundantes. Por ejemplo, a pesar de la poca profundidad de la columna de agua, solo la comunidad de litoral pradera graminoide inundable comparte elementos con la vegetación netamente terrestre, en tanto que no ocurre lo mismo con la pradera enraizada emergente localizada en el extremo derecho del eje 1 de ordenación. Resulta extraña la gran diferenciación del arbustal inundable, pues también es una comunidad de litoral con una posición intermedia en el eje 1 de ordenación, aunque ello se explicaría por el hecho de que, de las tres especies dominantes, solo comparte con la menos abundante mientras que las dos restantes son exclusivas. Dado que El Salitre no presenta vertimientos y su estado trófico es meso-oligotrófico (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017**), no presenta las condiciones para que proliferen especies asociadas con la eutroficación, como *E. crassipes*, *A. filiculoides* o *L. laevigatum*, o aquellas asociadas con la sedimentación, como *Schoenopletus californicus* (**Díaz-Espinosa, et al., 2012**). Por otro lado, el pastizal arbolado es un césped de *C. clandestinus* con una

combinación de especies nativas y exóticas tal como se ha encontrado en el Parque La Florida y la ronda del Humedal Jaboque en Bogotá (**Cabrera-Amaya, et al., 2017**).

Estructura de la vegetación. Los resultados obtenidos sobre la estructura de las comunidades también validan parcialmente la tercera hipótesis, por lo menos en lo que se refiere a la dominancia de *C. clandestinus* en comunidades acuáticas, pues solo fue dominante en una de las comunidades de litoral (pradera graminoide inundable); por lo demás, en la vegetación terrestre se encontraron los resultados esperados para los estratos bajos y altos. Esto indica que, probablemente, el componente acuático tiene un mejor estado de conservación, así como sucede en este mismo humedal con relación al estado trófico de sus aguas (**Pulido-López & Pinilla-Agudelo, 2017**). La estructura de las comunidades acuáticas registradas concuerda con los modelos planteados para los humedales de la Sabana de Bogotá (**Hernández-R. & Rangel-Ch., 2009; Schmidt-Mumm, 1998; Wijninga, et al., 1989**), pero solo en lo referente a la cobertura general de las especies dominantes, pues poco o nada se dice en dichos estudios acerca de los estratos, los cuales, aunque arbitrarios (a diferencia de lo que sucede en los bosques), dan una idea de la estructura vertical de la vegetación al utilizar el porcentaje de cobertura, la que a su vez da luces sobre la biomasa allí representada (**Jonasson, 1988**). No obstante, se observa en muchas especies de vegetación acuática que, a pesar de presentar la mayor altura, la cobertura se concentra en los estratos más bajos, al contrario que en los bosques. En este punto se evidencia un patrón que siempre se pasa por alto y que pone de relieve la utilidad de analizar la vegetación herbácea acuática o terrestre a partir de la cobertura por estratos. Es muy poca la información disponible sobre la vegetación terrestre en el arbolado urbano de los humedales de Bogotá en cuanto a su estructura, con excepción tal vez de los aportes de **ADESSA & EAAB (2006)**, **Córdoba (2016)** y **Cabrera-Amaya, et al. (2017)** en el humedal de Jaboque y alrededores, y de la **Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, SDA (2010)** sobre el humedal Santa María del Lago. Dichos trabajos y el presente estudio concuerdan en que una gran proporción de los individuos de gran y mediano porte está representada en especies exóticas como *P. patula*, *Eucalyptus globulus*, *F. uhdei* (anteriormente *F. chinensis*), *P. undulatum*, *Acacia* spp. o *Sambucus nigra*. No obstante, a pesar de que las especies nativas son tan abundantes como las exóticas en el arbolado asociado con los humedales de Bogotá (**Cabrera-Amaya, et al., 2017**), estas se encuentran principalmente representadas en el humedal El Salitre por plantones o por individuos pequeños, lo que significa que funciones ecológicas como el carbono acumulado o los recursos faunísticos (refugio y alimento), tendrán poco impacto en el humedal durante el tiempo que tardan en madurar dichos individuos. Teniendo en cuenta que un arbolado urbano más diverso en especies nativas presta mejores servicios ecosistémicos, incluso en la ciudad de Bogotá (**Escobedo, et al., 2015**), es importante

hacer el monitoreo del arbolado nativo en estado más joven y continuar con el enriquecimiento de los pastizales en este humedal, ya que la densidad de árboles nativos y la cantidad de vegetación natural y multiestratificada se han establecido como las variables más importantes para mantener la diversidad en espacios verdes urbanos y la calidad de hábitat para las aves en zonas tropicales de Brasil (Reis, *et al.*, 2012) y en zonas templadas de Suecia (Sandström, *et al.*, 2006).

Conclusiones

El humedal El Salitre presenta poca riqueza en comparación con otros humedales de la Sabana de Bogotá, probablemente por su pequeña área, pero cuenta con una composición de especies habituales en otros humedales, tanto en el componente acuático como en el terrestre. También es pequeña la representación de las comunidades más frecuentes de los humedales, particularmente las acuáticas y, en alguna medida, las terrestres, con una estructura horizontal (porcentaje de cobertura, diámetro del troco) y vertical (estratos y alturas) acordes con lo reportado en la Sabana de Bogotá. Por último, vale la pena resaltar que se confirma el papel del humedal El Salitre como referencia para el resto de los humedales de Bogotá en cuanto a las características tróficas del cuerpo de agua, pero ahora también en cuanto a la vegetación acuática que aparece libre de especies asociadas con altas cargas de nutrientes. En próximos estudios será necesario incluir las interacciones ecológicas con la fauna (aves e insectos), así como el análisis de la calidad de aire, el secuestro de carbono en suelo y la biomasa en pie.

Agradecimientos

Al Jardín Botánico de Bogotá por el apoyo logístico e institucional, al Instituto Distrital de Recreación y Deporte (IDRD) por el acceso al humedal El Salitre, y a los operarios Carlos Fonseca y Jhon Jairo Bernal por la ayuda en campo.

Material suplementario

Anexo S1. Lista de las especies de plantas y líquenes del Humedal El Salitre. Vea el anexo S1 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/824/2545>

Tabla S1. Familias con mayor riqueza en el Humedal El Salitre. Vea la tabla S1 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/824/2546>

Tabla S2. Géneros con mayor riqueza en el Humedal El Salitre. Vea la tabla S2 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/824/2547>

Figura S1. Distribución del arbolado urbano en el Humedal El Salitre. **A)** Altura y diámetro de copa. **B)** Diámetro a la altura del pecho (DAP). **C)** Grupo taxonómico. Fuente: © Colaboradores de OpenStreetMap, 2018. Vea la figura S1 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/824/2584>

Contribución de los autores

Diego Mauricio Cabrera Amaya, recolección y análisis de datos, concepción, diseño, escritura del documento y proceso editorial. José Wilfredo López Cruz, recolección y tabulación de datos, procesamiento de muestras y registro fotográfico.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- © **Colaboradores de OpenStreetMap.** (2018). Nodo Bogotá (Mapa callejero). Fecha de consulta: 16 de diciembre de 2018. Disponible en: www.openstreetmap.org/node/671806634
- Abril-Pulido, E.** (2014). Humedal El Salitre: un ejemplo exitoso de la defensa de los humedales de Bogotá. *Revista Fulica*. **1** (1): 17-21.
- Alcalde Mayor de Bogotá.** (2007). Decreto 624 de 2007. Por el cual se adopta la visión, objetivos y principios de la Política de Humedales del Distrito Capital. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2018. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=28132>
- Alcaldía Local de Barrios Unidos.** (2014). Plan Ambiental Local 2013-2016. Bogotá, DC.: Alcaldía Local de Barrios Unidos. Fecha de consulta: 31 de diciembre de 2018. Recuperado de Alcaldía Local de Barrios Unidos website: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883168/PAL+Barrios+Unidos+2013-2016.pdf>
- Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental, ADESSA & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, EAAB.** (2006). Plan de Manejo Ambiental del Humedal Jaboque. Convenio de cooperación No. 9-07-24100-061-2006 (p. 601). Bogotá, D.C.: Asociación para el Desarrollo Social y Ambiental (ADESSA) & Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB).
- Beltrán-Vargas, J. E., & Rangel-Ch., J. O.** (2013). Modelación del estado trófico del humedal de Jaboque, Bogotá DC, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. **18** (1): 149-164.
- Cabrera-Amaya, D. M., Lopera-Doncel, C., Vásquez-Valderrama, M. Y., Sandoval-Ramos, M., López-Cruz, J. W.** (2017). Diversidad florística y cambios en las coberturas de la cuenca del humedal Jaboque y el parque La Florida (Bogotá, Colombia). *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **41** (160): 326-337.
- Cleef, A. M. & Hooghiemstra, H.** (1984). Present vegetation of the area of the high plain of Bogotá. In H. Hooghiemstra (Ed.). *Vegetation and Climatic History of the High Plain of Bogotá, Colombia* (pp. 1–368). Vaduz, Liechtenstein: Ganter Verlag.
- Colwell, R.K.** (2013). EstimateS: Statistical estimation of species richness and shared species from samples. Versión 9. Persistent URL <purl.oclc.org/estimates>. Disponible en: <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates/>
- Colwell, Robert K., Chao, A., Gotelli, N. J., Lin, S.-Y., Mao, C. X., Chazdon, R. L., Longino, J. T.** (2012). Models and estimators linking individual-based and sample-based rarefaction, extrapolation and comparison of assemblages. *Journal of Plant Ecology*. **5** (1): 3-21. Doi: 10.1093/jpe/rtr044
- Concejo de Bogotá.** (2011). Acuerdo 487 de 2011. Por el cual se declara el área inundable “El Salitre” ubicada al interior del parque el Salitre, como parque ecológico Distrital de

- humedal. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2018. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=45124&dt=S>
- Connor, E. F. & McCoy, E. D.** (2001). Species–Area Relationships. In S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity* (pp. 397–411). Doi: 10.1016/B0-12-226865-2/00252-2
- Córdoba, M.** (2016). Proyecto de recuperación y restauración ecológica en el Parque Ecológico Distrital de Humedal Jaboque, con miras a la identificación e implementación de medidas de adaptación al cambio climático (p. 45). Bogotá, D. C., Colombia: Convenio Interadministrativo No. 001 de 2015. Fondo Distrital para la Gestión de Riesgos y Cambio Climático (FONDIGER) & Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Subdirección Técnica.
- Departamento Administrativo de Medio Ambiente, DAMA.** (2006). Política de humedales del Distrito Capital. Bogotá, D. C., Colombia: Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA) - Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Departamento Administrativo de Medio Ambiente, DAMA.** (2002). Los humedales del altiplano en Bogotá, bases técnicas para su conservación, restauración y manejo. Documento Técnico. Bogotá, DC.: Departamento Administrativo del Medio Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Díaz-Espinosa, A. M., Díaz-Triana, J. E., Vargas, O.** (2012). Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá. Bogotá, D.C.: Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá, D.C., Colombia. p. 248.
- Escobar, J.** (2016). Naturaleza identificada: construcción colectiva de un mapa de humedales en Bogotá. In M. A. Mejía (Ed.), *Naturaleza Urbana* (pp. 30–37). Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos biológicos Alexander von Humboldt.
- Escobedo, F. J., Clerici, N., Staudhammer, C. L., Corzo, G. T.** (2015). Socio-ecological dynamics and inequality in Bogotá, Colombia's public urban forests and their ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*. **14** (4): 1040-1053. Doi: 10.1016/j.ufug.2015.09.011
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., Ryan, P. D.** (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. **4** (1): 1-9.
- Hernández-R., J. & Rangel-Ch., J. O.** (2009). La vegetación del humedal de Jaboque (Bogotá, D.C.). *Caldasia*. **31** (2): 355-379.
- Horn, H. S.** (1966). Measurement of “overlap” in comparative ecological studies. *American Naturalist*. **100** (914): 419-424.
- INDERENA** (Ed.). (1977). Resolución no. 0213 de febrero de 1977 por la cual se establece veda para algunas especies y productos de la flora silvestre. Instituto Nacional de Recursos Naturales. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2018. Recuperado de http://cvc.gov.co/sites/default/files/Sistema_Gestion_de_Calidad/Procesos%20y%20procedimientos%20Vigente/Normatividad_Gnl/Resolucion%20213%20de%201977-Feb-01.pdf
- Jonasson, S.** (1988). Evaluation of the Point Intercept Method for the Estimation of Plant Biomass. *Oikos*. **52** (1): 101. Doi: 10.2307/3565988
- Matteucci, S., & Colma, A.** (1982). Metodología para el estudio de la vegetación. Washington D.C., USA.: Secretaría General de la Organización de Estados Americanos (OEA).
- Pulido-López, P. C. & Pinilla-Agudelo, G. A.** (2017). Evaluación del estado trófico de El Salitre, último humedal urbano de referencia en Bogotá. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **41** (158): 41-50.
- Reis, E., López-Iborra, G. M., Pinheiro, R. T.** (2012). Changes in bird species richness through different levels of urbanization: Implications for biodiversity conservation and garden design in Central Brazil. *Landscape and Urban Planning*. **107** (1): 31-42. Doi: 10.1016/j.landurbplan.2012.04.009
- Sandström, U. G., Angelstam, P., Mikusiński, G.** (2006). Ecological diversity of birds in relation to the structure of urban green space. *Landscape and Urban Planning*. **77** (1-2): 39-53. Doi: 10.1016/j.landurbplan.2005.01.004
- Schmidt-Mumm, U.** (1998). Vegetación acuática y palustre de la Sabana de Bogotá y plano del río Ubaté (Tesis de Maestría), Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Biología).
- Secretaría Distrital de Ambiente.** (2010). Plan de Manejo Ambiental del Parque Ecológico Distrital de Humedal Santa María del Lago. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2018. Recuperado de http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=fb4fd890-ec1e-4925-ada3-5a5058ab1ddf&groupId=3564131
- Secretaría Distrital de Ambiente.** (2009). Resolución 5195 de 2009. Por el cual se adopta la visión, objetivos y principios de la Política de Humedales del Distrito Capital. Fecha de consulta: 1 de noviembre de 2018. Recuperado de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=37552&dt=S>
- Sistema de Gestión del Arbolado Urbano de Bogotá, SIGAU.** (2017). Sistema de Gestión del Arbolado Urbano - Visualizador Web. Fecha de consulta: 1 de noviembre, 2017. Disponible en: <http://sigau.jbb.gov.co/SigauJBB/VisorPublico/VisorPublico>
- Van der Hammen, T.** (1986). La Sabana de Bogotá y su lago en el Pleistoceno Medio. *Caldasia*. **15** (71-75): 249-262.
- Van der Hammen, T., Stiles, F. G., Rosselli, L., Chisacá, M. L., Camargo, G., Guillot, G., ... Rivera, D.** (2008). Protocolo de recuperación y rehabilitación ecológica de humedales en centros urbanos. Bogotá, D.C.: Secretaría Distrital de Ambiente.
- Wijninga, M. V., Rangel, J. O., & Cleef, A. M.** (1989). Botanical ecology and conservation of the Laguna de la Herrera (Sabana de Bogotá, Colombia). *Caldasia*. **16** (76): 23-40.

First records of *Theobroma speciosum* fruits dispersion

✉ Lucinéia Barbosa¹, ✉ Isadora França², ✉ Emil José Hernández Ruz^{2,*}

¹Secretaria de Educação do Estado do Pará (SEDUC). Altamira, Brasil

²Faculdade de Ciências Biológicas, Universidade Federal do Pará, Altamira, Brasil

Abstract

Numerous Amazonian species that produce economically useful fruits have been intensively exploited, which is why wild populations were drastically reduced. *Theobroma speciosum* is an important species for humans and wildlife because it provides fruits for rodents and primates. This plant species is also of great economical potential because it can serve as a source of genetic variation for related species that are economically exploited as *T. cacao*. Here we report for the first time the seed dispersal by *Sapajus apella*, *Mico argentatus*, and *Guerlinguetus aestuans*. The information is useful to develop conservation strategies for this wild cocoa in remnant fragments of the forests of the eastern Amazon.

Key words: Seed dispersal; Volta grande do Xingu; Camera trap; *Saimiri sciureus*; Primates.

Primer registro de la dispersión de frutos de *Theobroma speciosum*

Resumen

Numerosas especies amazónicas productoras de frutos de utilidad económica han sido explotadas intensamente por lo cual las poblaciones silvestres se redujeron drásticamente. *Theobroma speciosum* es una especie importante, ya que proporciona frutos para roedores y primates y también tiene un gran potencial económico pues puede servir como fuente de variedad genética para especies relacionadas que se explotan económicamente como *T. cacao*. Se presenta aquí por primera vez la dispersión de semillas de *T. speciosum* por *S. apella*, *Mico argentatus* (Primates) y *G. aestuans* (Rodentia). La información es útil para desarrollar estrategias de conservación de este cacao silvestre en fragmentos remanentes de los bosques de la Amazonia oriental.

Palabras clave: Estrategias de conservación; Volta grande do Xingu; Cámara trampa; *Saimiri sciureus*; Primates.

The species of the genus *Theobroma* L. have special importance for their conventional or potential uses and they represent possible sources of genetic resistance for other more economically important species such as *T. cacao* L. (Silva, *et al.*, 2011; Dardengo, *et al.*, 2016).

All Amazonian cacao species are found in the “terra firme” rainforest sub-type or areas periodically flooded by rivers and lakes, the so-called “várzea”; in the latter, they preferably occupy the sections that are rarely or little flooded. On the “terra firme”, most of these species prefer banks of streams and other humid places, but *T. speciosum* Willd. ex Spreng inhabits relatively dry land (Ducke, 1953).

The bark of *T. speciosum* fruits is associated with the wood fawn generates a deodorant used by Amazonian populations (Dardengo, *et al.*, 2016; Di Stasi and Hiruma-Lima, 2002). Balée (1994) and Dewalt, *et al.* (1999) indicated that the fruit is also a source of nutrients for the Ka’apor indigenous people in the Amazon region of Brazil and the Tacana region of Bolivia.

Among the plants of the genus *Theobroma* present in Brazil, we find a species commonly known as “cacaui” (*T. speciosum*). This species grows in an area extending from

the states of Maranhao to Cururupu in Acre and Madre de Dios in western Bolivia and the Ucayali River in Perú (Cuatrecasas, 1964). Silva and Martins (2009) indicated that the dispersing agents of *T. speciosum* are unknown. According to Bates (1979), the aggregate distribution of *T. cacao* is due to the dispersion by monkey species. The monkey *Sapajus paella* (Linnaeus, 1758), which transports more fruits than it eats, promotes colonization in other habitats, as well as *Saimiri sciureus* (Linnaeus, 1758), which feeds on the tree that produces the fruits. In this context, our aim was to report the first records of dispersing species of *T. speciosum*.

Our study took place in a one-hectare fragment of forest in east Amazonia (3°24’42.7” S, 51° 51’50.7” W) during March 2017 (Figure 1). The study area is part of the Amazon forest biome and is mainly covered by a mosaic of: 1) Dense

*Corresponding autor:

Emil José Hernández Ruz, emilhj@yahoo.com

Received: May 9, 2019

Accepted: July 26, 2019

Editor: Elizabeth Castañeda



Figure 1. Fragment of Sub-forest of the rainforest “terra firme” with *T. speciosum*

ombrophilous forest fragments where species such as the Brazil nuts (*Bertolletia excelsa* Humn. & Bonpl.) and the jatobá (*Himenea courbaril* L.) dominate in the upper canopy and a mosaic between the dense and open forest where the woody lianas (*Schnella* sp.) predominate. The medium stratum is dominated by *T. speciosum* and *Inga* sp. 2, cacao plantations, and herbaceous vegetation with *Brachiaria* grass. According to the Köppen classification, the climate is type Am with an average temperature of 26°C, annual rainfall of 2,289 mm, and relative humidity between 78 and 88% (Sousa Jr., et al., 2006).

To establish the identity of the fruit dispersers, we placed a Sony®Cyber-shot camera in front of a fructifying tree fixed to another different tree at a height of 1.6 m from the ground for five days totaling an effort of 50 camera-trap nights.

During the observation period, we observed dispersion in larger spaces by *S. paella* and by *Mico argentatus* (Linnaeus 1766) and *G. aestuans* in short distances (<https://youtu.be/xK7p99rwi0A>, <https://youtu.be/VWjiaPy2EbQ>, <https://youtu.be/QoGcQyhpH44>). It is worth noting that it was not possible to follow the opening of the fruit. According to residents, the fruit is gnawed at night by the South American spiny rats (*Proechimys* sp. Allen 1899). In recent observations in the Forest Management Unit Fazenda Uberlândia (near 3°0'41" S; 50°5'19" W), we observed intense movement of *Proechimys* in a fructifying tree of *T. speciosum* during the night.

We found that in the region of the Volta grade do Xingu, *T. speciosum* is dispersed by *S. apella*. This monkey species carries more fruits than it eats. We also observed the small monkey *M. argentatus* and the rodent *G. aestuans* feeding on the site but at different times as indicated by Bates (1979) for *Saimiri sciureus*.

Theobroma speciosum is an important species for humans (Di Stasi & Hiruma-Lima, 2002; Dardengo, et al., 2016; Balée, 1994; Dewalt, et al., 1999) and wildlife because it provides fruits to rodents and primates. It is

also of great potential as it can serve as a source of genetic variability for related species such as *T. cacao* that are exploited economically (Dardengo, et al., 2016).

Considering that it has been reported that *T. cacao* seeds are dispersed by *S. apella* and *S. sciureus* (Cuatrecasas, 1964), Silva and Martins (2009) have suggested that the very similar seeds of the domesticated congeneric species *T. speciosum* could be dispersed by the same animal species generating a typically aggregated spatial pattern of plants distribution. Besides, these authors argue that this type of distribution allowed the pollination by *Drosophila*. On the other hand, the study by Dardengo, et al. (2016) with microsatellite markers indicated inbreeding and genetic substructure in a population of *T. speciosum* in southern Amazonia. The latter was evidenced partially by the distribution pattern of individuals given that *T. speciosum* is considered a self-incompatible species (Souza & Venturieri, 2010).

Thus, our data reinforced those in scattered records and showed the importance of understanding the dispersion, pollination, and genetic structure of this tree species for the planning conservation strategies of wild species with potential for the industry, biotechnology, and forest people's maintenance.

Acknowledgements

The authors thank Marcelino Ferreira de Sousa and Francisco das Chagas Roque de Sousa for the logistical support in the study area and Victor Gonzalez for the revision of the English version of this document, as well as the anonymous reviewers for their contributions.

Authors' Contributions

LB performed field work; IF collaborated in the writing and translation of the document; EJHR participated in the preparation of the design, analysis and writing of the document.

References

- Balée, W. (1994). Footprints of the Forest – Ka'apor ethnobotany – the historical ecology of Plant Utilization by an Amazonian people. New York, NY, USA: Columbia University Press. p. 420.
- Bates, H. W. (1979). Um naturalista no rio Amazonas. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 398 p.
- Cuatrecasas J. (1964). Cacao and its allies: a taxonomic revision of the genus *Theobroma*. Contribution of the United States National Herbarium. **35**: 379-614.
- Dardengo, F. E. J., Bandini Rossi, A. A., Mezzalira da Silva, B., Vieira da Silva, I., da Silva, C. J., Magno, S. A. (2016). Diversity and spatial genetic structure of a natural population of *T. speciosum* (Malvaceae) in the Brazilian Amazon. *Revista de Biología Tropical*. **64**: 1091-1099.
- Dewalt, S. J., Bourdy, G., Michel, L. R. C., Quenevo, C. (1999). Ethnobotany of the Tacana: quantitative inventories of two permanent plots of northwestern Bolivia. *Economic Botany*. **53**: 237-260.

Di Stasi, L. C. & Hiruma-Lima, C. A. (2002). Medicinal plants in the Amazon and Atlantic Forest. UNESP: São Paulo, SP, Brazil. p. 604.

Silva, A. A. R. and Martins, M. B. (2004). Polinização de cacauí *T. speciosum* Will. ex. Spreng. (Sterculiaceae) por drosofilídeos em áreas de ocorrência natural. p: 431-440. In Caxiuanã: Desafios para a conservação de uma Floresta Nacional na Amazônia. P. L. B. Lisboa (org.). Museu paraense Emilio Goeldi. Belém. 672 p.

Souza, M. S. & Venturieri, G. A. (2010). Floral biology of cacauhy (*T. speciosum* – Malvaceae). Brazilian Archives of Biology and Technology. **53**: 861-872.

Sousa Junior, W. C., Reid, J., Leitão, N. C. S. (2006). Custos e benefícios do complexo hidrelétrico Belo Monte: uma abordagem econômico-ambiental. Conservation Strategy Fund -CSF, Lagoa Santa. 90 p.

Butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea) of Montes de María sub-region: Preliminary list of species from El Carmen de Bolívar (Bolívar, Colombia)

✉ Daniela Ahumada-C.^{1,*}, ✉ Alejandro Segovia-Paccini¹, ✉ Gabriel R. Navas-S.²

¹Grupo de Investigación en Biología Descriptiva y Aplicada y Grupo de Investigación en Hidrobiología,
Programa de Biología, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia

²Grupo de Investigación en Hidrobiología, Programa de Biología, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia

Abstract

We provide a preliminary list of the diurnal butterflies of El Carmen de Bolívar based on specimens captured between 2015 and 2017 using entomological nets during active searches. Six of the Colombian families of diurnal butterflies were registered. In this study, we provide the distribution of each species throughout the Colombian Caribbean and we confirmed the presence of some species in the region: *Emesis fatimella*, *Eurybia lycisca* (Riodinidae) and *Urbanus teleus* (Hesperiidae). This research contributes to the knowledge of diurnal butterflies in one of the most biodiverse areas of the Caribbean region, which undergoes a progressive transformation of their ecosystems.

Key words: Bolívar; Diurnal Lepidoptera; Species list; Montes de María; Taxonomy.

Mariposas (Lepidoptera: Papilionoidea) de la sub-región de Montes de María: lista preliminar de especies de El Carmen de Bolívar (Bolívar, Colombia)

Resumen

Se presenta el listado preliminar de las mariposas diurnas de El Carmen de Bolívar (Bolívar, Colombia) basado en especímenes capturados con redes entomológicas durante búsquedas activas entre los años 2015 y 2017. Se registraron seis de las familias de mariposas diurnas reportadas para Colombia. En este estudio se proporciona la distribución de cada especie en todo el Caribe colombiano, y se confirma la presencia de algunas especies en la región: *Emesis fatimella*, *Eurybia lycisca* (Riodinidae) y *Urbanus teleus* (Hesperiidae). Este estudio contribuye al conocimiento de las mariposas diurnas en una de las áreas con mayor biodiversidad de la región Caribe, que experimenta una transformación progresiva de sus ecosistemas.

Palabras clave: Bolívar; Lepidópteros diurnos; Lista de especies; Montes de María; Taxonomía.

Introduction

The Caribbean is the Colombian region with the largest and best-preserved fragments of Tropical Dry Forest (TDF) (Pizano & García, 2014), but it is also threatened by its increasing transformation (Freitas, *et al.*, 2003; Orozco, *et al.*, 2009; Montero, *et al.*, 2009). The progressive loss of the forest enhances the importance of each fragment and its biodiversity and demands its conservation (Montero, *et al.*, 2009). The tropical dry forest serves to the diagnosis and evaluation of conservation strategies (Vargas-Zapata, *et al.*, 2011) and, therefore, its study is of great scientific interest.

Lepidoptera is the third most studied order of butterflies; the specimens are abundant and easy to collect and to identify (Llorente, *et al.*, 1993; Montero, *et al.*, 2009); they also play important roles in trophic chains and as plant pollinators (Constantino & Andrade-C., 2007). Many species have been used for environmental monitoring as indicators of habitat quality due to their rapid biological

cycles, ecological specificity, and their easy evaluation at any time of year (Brown, 1991; Freitas, *et al.*, 2003; Montero, *et al.*, 2009).

The list of Colombian butterflies has undescribed areas of our country and the department of Bolívar is one such areas. The information on species is scarce and its Northern area is thought to house between one to 20 species (REF: Colombian Butterfly Database), whereas peripheral areas remain poorly explored (Andrade-C., 2002).

This study provides a species list of diurnal butterflies from El Carmen de Bolívar, in Montes de María sub-region including new findings for the Colombian Caribbean region. Our results offer basic scientific information for

*Corresponding autor:

Daniela Ahumada-C; dahumada1@unicartagena.edu.co

Received: December 23, 2018

Accepted: July 26, 2019

Editor: Marta Patricia Pinilla

future studies, as the taxonomic listings are not only used for describing the biodiversity but also contribute to the conservation, monitoring, and improvement of the national biodiversity inventory and the elaboration of management plans for natural areas (Mielke, *et al.*, 2008; Núñez, 2009).

Material and methods

Study area. Our study was conducted in Saltones de Mesa (9° 47' 34.23" N 75° 18' 5.58" W) and Camarón (9° 50' 32.32" N 75° 17' 36.53" W), in the jurisdiction of Santo Domingo de Mesa, El Carmen de Bolívar municipality (Figure 1), located in the Northeast of Montes de María, an undulating area with altitudes ranging from 50 to 989 m above sea level (Plataforma de Organizaciones de Desarrollo Europeas en Colombia - PODEC, 2011) and temperatures between 27 and 30 °C exhibiting both a semi-dry and slightly humid climate with a unimodal and bi-seasonal rainfall distribution regime (annual average: 174 mm) (Rangel-Ch. & Carvajal-Cogollo, 2012).

The vegetation in the studied areas consists in a mixture of fragments of semi-humid transitional dry forest (as classified by Etter, *et al.*, 2008) in a good state of conservation, areas intervened by deforestation, shrub vegetation, small crops (such as corn, yucca, yam and avocado), and gardens of floral plants such as Asteraceae.

Fieldwork and laboratory. Specimens were collected using entomological nets between 8:00 and 16:00 hours from July 1 to 5, 2015, December 1 to 7, 2016, and May 21 to 27, 2017 with an effort of 152 hours-man in Santo Domingo de Mesa (Figure 1). The butterflies were sacrificed by digital pressure on the thorax and then stored in triangular paper envelopes; later, they were hydrated in a humid chamber and prepared for mounting. All these procedures were carried out according to the collection, preservation, and mounting protocol proposed by Andrade-C., *et al.* (2013). Specimens were identified using the keys provided by

Le Crom, *et al.* (2004) and the illustrated list of American Butterflies by Warren, *et al.* (2017). The names of the species were updated and contrasted using the Neotropical Atlas of Lamas (2004). The identification of some species was confirmed with the Entomology Reference Collection of the Instituto de Ciencias Naturales of the National University of Colombia (ICN). The specimens were collected with permission granted through resolution 0751 of June 27, 2014, by the Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique (CARDIQUE) and then stored in the research laboratories of the Biology program at Cartagena University (CUDC-INS).

The butterflies were photographed with a Nikon Coolpix compact camera and the pictures were edited with Adobe Photoshop® CS6 software.

Results

We found 67 species distributed in six families, 16 subfamilies, 31 tribes, and 57 genera (Table 1, figures 2-29). The richest family was Nymphalidae with 34 species followed by Pieridae with 12, whereas Lycaenidae was the least representative with three species, followed by Papilionidae and Riodinidae with four species. The most representative genera were *Eurema* and *Phoebis* with four and three species, respectively (Table 1).

The following are the geographical distributions of the species registered for the first time in the Colombian Caribbean:

Family Riodinidae

Eurybia lycisca Westwood, 1851

Examined material (Annexed, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/808/2551>): 1♂. COLOMBIA, Bolívar, El Carmen de Bolívar, Santo Domingo de Mesa, Saltones de Mesa, 9° 47' 34.23" N 75° 18' 5.58" W, 110 m, entomological net, 1-7 xii. 2016, H. Vides Leg. CUDC-INS-654.

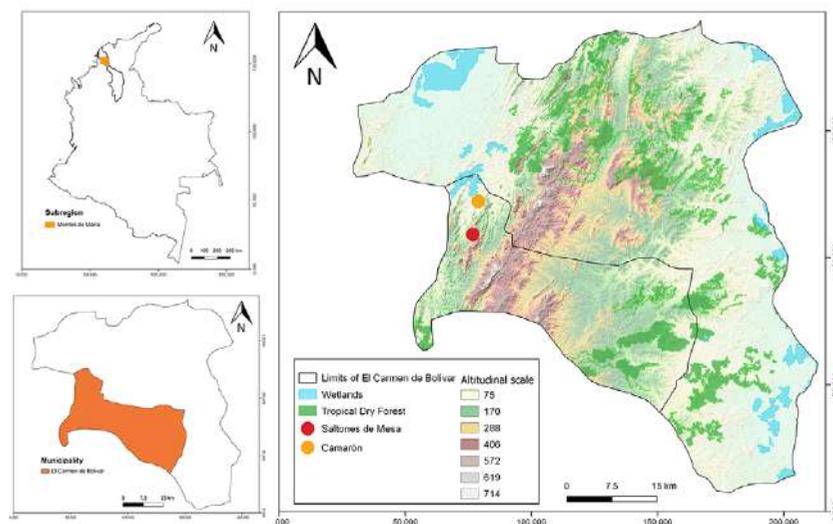


Figure 1. Location of the study area: Camarón and Saltones de Mesa, El Carmen de Bolívar municipality, Bolívar department, Colombia

Table 1. Species of diurnal butterflies registered for Santo Domingo de Mesa, El Carmen de Bolívar, Montes de María, Bolívar

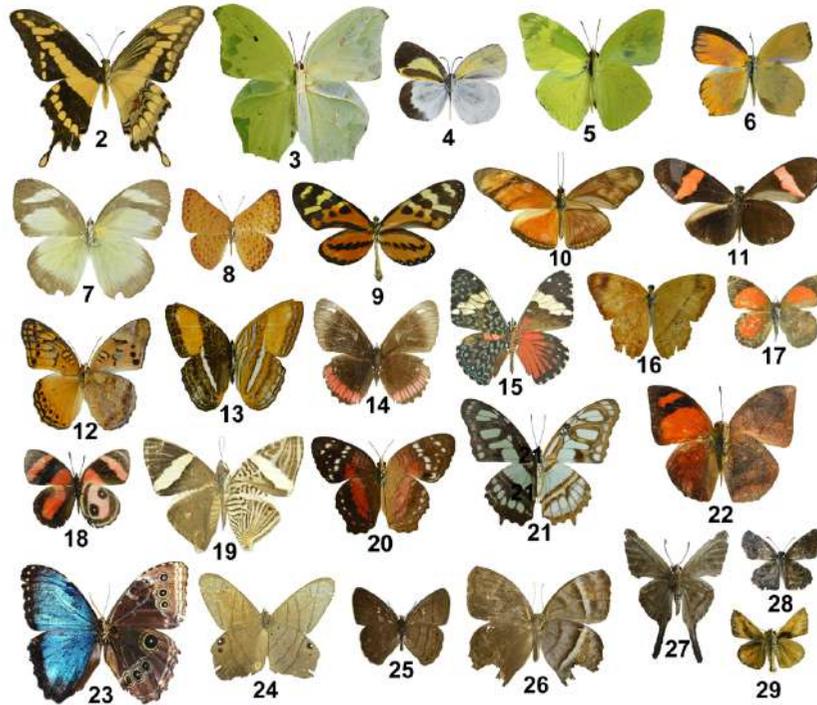
Family	Subfamily	TAXA		P/A		Distribution in the Colombian Caribbean	Source
		Tribe	Specie	Loc 1	Loc 2		
Papilionidae	Papilioninae	Troidini	<i>*Battus polydamas</i> (Linnaeus, 1758)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena, Sucre, Bolívar	1,3,4,8,9,11,12
			<i>Parides iphidamas</i> (Fabricius, 1793)	1	1	Atlántico, Cesar, Sucre	3,7,11,14
			<i>Parides anchises serapis</i> (Boisduval, 1836)	0	1	Atlántico, Córdoba, Cesar (including Serranía del Perijá), Sucre	1,3,5,7,8,9,11,13
		Papilionini	<i>*Heraclides thoas nealces</i> (Rothschild & Jordan, 1906)	1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena	3,4,5,6,8,9
Pieridae	Coliadinae		<i>*Anteos maerula</i> (Fabricius, 1775)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, La Guajira	1,5,7,8,9,10
			<i>Eurema agave</i> (Cramer, 1775)	1	1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,8,9
			<i>Eurema albula</i> (Cramer, 1775)	1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena	1,2,4,5,6,7,9
			<i>*Eurema दौरa</i> (Godart, 1819)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Sucre, San Andrés	1,2,3,5,6,9,11,13
			<i>Phoebis agarithe</i> (Boisduval, 1836)	0	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	1,2,8,9
			<i>*Phoebis philea</i> (Linnaeus, 1763)	0	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	1,2,5,7,8,9
			<i>Phoebis sennae</i> (Linnaeus, 1758)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, San Andrés and Providencia, La Guajira, Magdalena, Bolívar	1,2,3,4,5,8,9,10,12,13
			<i>*Pyrisitia proterpia</i> (Fabricius, 1775)	1	1	Atlántico, Cesar, Córdoba, Bolívar	1,2,5,7,9,12
			<i>Pyrisitia venusta venusta</i> (Boisduval, 1836)	0	1	Cesar (including Serranía del Perijá)	7,9
			Pierinae	Pierini	<i>Ascia monuste</i> (Linnaeus, 1764)	0	1
			<i>*Itaballia demophile calydonia</i> (Boisduval, 1836)	0	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena, Sucre	1,2,3,4,7,8,9,11
			<i>Glutophrissa drusilla</i> (Cramer, 1777)	0	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Sucre	1,5,8,9,11

Family	TAXA			P/A		Distribution in the Colombian Caribbean	Source
	Subfamily	Tribe	Specie	Loc 1	Loc 2		
Lycaenidae	Theclinae	Eumaeini	<i>Arawacus lincoides</i> (Draudt, 1917)	1	1	Cesar	7
			<i>Pseudolycaena marsyas</i> (Linnaeus, 1758)	1	0	Atlántico, Cesar, Córdoba	1,5,7,9
	Polyonmatinae		<i>Hemiargus hanno</i> (Stoll, 1790)	0	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	1,5,7,8,9
Riodinidae	Riodininae	Eurybiini	<i>Eurybia lycisca</i> Westwood, 1851	1	0	Bolívar	15
		Helicopini	* <i>Emesis fatimella</i> (Westwood, 1851)	0	1	Bolívar	15
		Nymphidiini	<i>Aricoris erostratus</i> (Westwood, 1851)	0	1	Atlántico, Cesar	1,9
			<i>Nymphidium onaenum</i> Hewitson, 1869	0	1	Serranía del Perijá, Córdoba	1,9
Nymphalidae	Danainae	Danaini	<i>Danaus plexippus</i> (Linnaeus, 1758)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, San Andrés and Providencia	1,5,8,9,13
			<i>Danaus gilippus</i> (Cramer, 1775)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, La Guajira, Magdalena	1,4,5,7,8,9,10
		Ithomiini	* <i>Mechanitis polymnia</i> Linnaeus, 1758	1	1	Córdoba, Serranía del Perijá	5,8,14
			<i>Pteronymia aletta</i> (Hewitson, [1855])	0	1		13
	Heliconiinae	Heliconiini	<i>Agraulis vanillae vanillae</i> (Linnaeus, 1758)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, San Andrés, La Guajira	1,5,7,8,9,10,13
			* <i>Dryas iulia</i> (Fabricius, 1775)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, San Andrés and Providencia, Magdalena, Sucre	1,2,5,7,8,9,11,13
			<i>Eueides isabella</i> (Stoll, 1781)	1	1	Cesar (including Serranía del Perijá)	7,8
			* <i>Heliconius erato hydara</i> (Hewitson, 1867)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, La Guajira, Sucre	1,2,5,3,6,7,8,9,10,11
		Argynniini	* <i>Euptoieta hegesia</i> (Cramer, 1779)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, La Guajira, Magdalena	1,4,5,7,8,9,10
		Limenitidinae	Limenitidini	* <i>Adelpha cytherea daguana</i> (Fruhstorfer, 1913)	1	0	Serranía del Perijá

Family	Subfamily	TAXA		P/A		Distribution in the Colombian Caribbean	Source
		Tribe	Specie	Loc 1	Loc 2		
Nymphalidae	Biblidinae	Biblidini	<i>*Biblis hyperia</i> (Cramer, 1779)	0	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	1,5,6,7,8,9
		Ageroniini	<i>Ectima thecla</i> (Fabricius, 1796)	0	1	Serranía del Perijá	8
			<i>*Hamadryas amphinome</i> (Linnaeus, 1767)	1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá)	1,2,7,8,9
			<i>Hamadryas feronia</i> (Linnaeus, 1758)	1	0	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, La Guajira, Sucre	5,8,9,10,11,14
		Epiphelini	<i>*Nica flavilla</i> (Godart, [1824])	1	1	Atlántico, Cesar, Córdoba, Sucre	1,2,3,5,7,11
		Callicorini	<i>*Haematera pyrame</i> (Hübner, [1819])	1	0	Atlántico	1
	<i>*Callicore pitheas</i> (Latreille, [1813])		1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Magdalena, Córdoba, Sucre	1,2,4,5,6,7,8,9,11	
	Nymphalinae	Cocini	<i>Historis odius dious</i> Lamas, 1995	1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, San Andrés and Providencia, Magdalena	2,3,4,5,7,8,9,13
		Nymphalini	<i>*Colobura dirce</i> (Linnaeus, 1758)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Sucre	2,5,7,8,9,11
		Victorinini	<i>*Anartia amathea</i> (Linnaeus, 1758)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena	3,4,5,8,9
			<i>Anartia jatrophae</i> (Linnaeus, 1763)	0	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, San Andrés and Providencia, La Guajira, Bolívar	1,3,5,8,9,10,12,13
			<i>*Siproeta stelenes</i> (Linnaeus, 1758)	1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Sucre, San Andrés	1,3,5,7,8,9, 11,13
		Junoniini	<i>Junonia evarete</i> (Cramer, 1979)	1	1	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, La Guajira, Magdalena, Bolívar	1,3,4,5,7,8,9,10,12
		Melitaeini	<i>Anthanassa drusilla</i> (C. Felder y R. Felder, 1861)	1	1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena	4,5,7,8,9
			<i>Chlosyne lacinia</i> (Geyer, 1837)	1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena, Sucre	1,3,4,5,7,8,9,11
Charaxinae		Anaeini	<i>*Fountainea ryphea</i> (Cramer, 1775)	0	1	Serranía del Perijá	8,13

Family	Subfamily	TAXA		P/A		Distribution in the Colombian Caribbean	Source	
		Tribe	Specie	Loc 1	Loc 2			
Nymphalidae	Satyrinae	Morphini	<i>*Morpho helenor peleides</i> Kollar, 1850	0	1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Magdalena	4,5,7,8,9,14	
		Brassolini	<i>Caligo brasiliensis</i> (von Felder, 1862)	1	1	Sucre	11,14	
		Haeterini	<i>*Pierella luna luna</i> (Fabricius 1793)	1	0	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,8,9,14	
		Satyrini	<i>Cissia pompilia</i> (C. Felder & R. Felder, 1867)	1	1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,7,8,9	
			<i>*Hermeuptychia hermes</i> (Fabricius, 1775)	0	1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, Sucre	5,7,8,9,11,14	
			<i>Magneuptychia libye</i> (Linnaeus, 1767)			Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,7,8,9	
			<i>Pareuptychia ocirrhoe</i> (Fabricius, 1776)	1	1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,8,9	
			<i>*Taygetis laches laches</i> (Fabricius, 1793)	1	0	Atlántico, Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba, La Guajira, Sucre	1,5,7,8,9,10,11,14	
		Eudamminae	Eudamini	<i>Typhedanus undulatus</i> (Hewitson, 1867)	0	1	Atlántico, Córdoba, Cesar (including Serranía del Perijá)	1,5,8,9
				<i>*Urbanus simplicius</i> (Stoll, 1790)	1	1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,8,9,14
				<i>Urbanus teleus</i> (Hübner, 1821)	1	1		15
		Hesperiinae	Carcharodini	<i>*Nisoniades</i> sp.	1	0		
			Hesperiini	<i>*Hylephila phyleus</i> (Drury, 1773)	1	1	Atlántico, Cesar, Providencia	1,7,13,14
		Hesperiidae	Pyrginae	Erynnini	<i>Timochares trifasciata</i> (Hewitson, 1868)	1	0	Atlántico, Cesar
<i>Heliopetes arsalte</i>	1				1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,7,8	
<i>Polycctor</i> sp.	1				1			
<i>Pyrgus orcus</i> (Stoll, 1780)	1				1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,7,8,9	
<i>Timochreon satyrus</i> (C. Felder & R. Felder, 1867)	0				1	Cesar (including Serranía del Perijá), Córdoba	5,6,7,8	

P/A: Presence/Absence, **Loc 1**: Saltones de Mesa, **Loc 2**: Camarón. The column “Source” lists the publications made in the Colombian Caribbean recording the presence of species of diurnal butterflies in the departments of Atlántico: **1** = Montero, *et al.* (2009), **2** = Boom-Urueta, *et al.* (2013), **3** = Prince-Chacón, *et al.* (2011); Magdalena: **4** = Vargas-Zapata, *et al.* (2011); Córdoba: **5** = Campos-Salazar, *et al.* (2011); Cesar: **6** = Pulido-B. & Andrade-C. (2007), **7** = Erazo & González-Montaña (2008), **8** = Pulido-B. & Andrade-C. (2009), **9** = Campos-Salazar & Andrade-C. (2009); La Guajira: **10** = Moreno-M. & Acuña-Vargas (2015); Sucre: **11** = Mercado-Gómez, *et al.* (2018); Bolívar: **12** = Ahumada-C. (2017); San Andrés and Providencia Islands: **13** = Emmel (1975); and records for the Caribbean region without specific location: **14** = Andrade-C. (2002). Additionally, number fifteen (**15**) was used to indicate the new records for the Colombian Caribbean. The asterisk (*) refers to the species shown in figures 2-29.



Figures 2-29. Representatives of the six families of diurnal butterflies found in Santo Domingo de Mesa. Dorsal face to the left, ventral face to the right. **Papilionidae** (2). 2. *Heraclides thoas* (CUDC-INS 838). **Pieridae** (3-7). 3. *Anteos maerula* (CUDC-INS 587), 4. *Eurema daira* (CUDC-INS 571). *Phoebis sennae* (CUDC-INS 616), 6. *Pyrisitia proterpia* (CUDC-INS 662), 7. *Itaballia demophile* (CUDC-INS 584). **Riodininae** (8): 8. *Emesis fatimella* (CUDC-INS 772). **Nymphalidae** (9-26) 9. *Mechanitis polymnia* (CUDC-INS 907), 10. *Dryas iulia* (CUDC-INS 768), 11. *Heliconius erato* (CUDC-INS 814), 12. *Euptoieta hegesia* (CUDC-INS 789), 13. *Adelpha cytherea daguana* (CUDC-INS 911), 14. *Biblis hyperia* (CUDC-INS 673), 15. *Hamadryas amphinome* (CUDC-INS 808), 16. *Nica flavilla* (CUDC-INS 907), 17. *Haematera pyrame* (CUDC-INS 807), 18. *Callicore pitheas* (CUDC-INS 692), 19. *Colobura dirce* (CUDC-INS 711), 20. *Anartia amathea* (CUDC-INS 918), 21. *Siproeta stelenes* (CUDC-INS 954), 22. *Fountainea ryphea ryphea* (CUDC-INS 804), 23. *Morpho helenor peileides* (CUDC-INS 906), 24. *Pierella luna luna* (CUDC-INS 679), 25. *Hermeuptychia Hermes* (CUDC-INS 844), 26. *Taygetis thamyra* (CUDC-INS 957). **Hesperiidae** (27-29): 27. *Urbanus simplicius* (CUDC-INS 1030), 28. *Nisoniades* sp. (CUDC-INS 960), 29. *Hylephila phyleus* (CUDC-INS 966)

Distribution: From the southeast of México to Ecuador (Warren, *et al.*, 2017). In Colombia, this species has been recorded in the Andean regions of Quindío and Antioquia departments (Orozco, *et al.*, 2009, Marín-Gómez, *et al.*, 2011) and in the Pacific region of Nariño and Chocó departments (Palacios & Constantino, 2006, Vargas-Ch. & Salazar, 2014).

Emesis fatimella (Westwood, 1851)

Examined material (Annexed, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/808/2551>): 1♂. COLOMBIA, Bolívar, El Carmen de Bolívar, Santo Domingo de Mesa, Camarón, 9°50'32.32"N 75°17'36.53"W, 91 m, entomological net, 1-5. vii. 2015, A. Sandoval, A. Segovia-Paccini, G. Ríos, D. Ahumada-C. and D. Rodríguez Leg. CUDC-INS 772 (Figure 8).

Distribution: From México to Colombia, Guianas and Trinidad (Warren, *et al.*, 2017). In Colombia, this species has been recorded in the Pacific region of Chocó department (Vargas-Ch. & Salazar, 2014) and in the Amazon region (Andrade-C., *et al.*, 2015) in Vaupés Department (Rodríguez & Miller, 2013).

Family Hesperiidae

Urbanus teleus (Hübner, 1821)

Examined material (Annexed, <https://www.raccefyfyn.co/index.php/raccefyfyn/article/view/808/2551>): 1♂, 1♀. COLOMBIA, Bolívar, El Carmen de Bolívar, Santo Domingo de Mesa, Camarón, 9°50'32.32"N 75°17'36.53"W, 91 m, entomological net, 1-5. vii. 2015, A. Sandoval, A. Segovia-Paccini, G. Ríos, D. Ahumada-C. and D. Rodríguez Leg. CUDC-INS 1038, 1039.

Distribution: from Texas in the USA to Argentina (Valencia, *et al.*, 2005, Warren, *et al.*, 2017). In Colombia, it has been registered for the Andean region (González & Andrade-C., 2008) in the departments of Tolima (Camero, *et al.*, 2007), Cundinamarca (Suárez, 2014), Antioquia (Orozco, *et al.*, 2009), Caldas (Ríos-Málaver, 2007) and Santander (Quintero, *et al.*, 2014). In the Pacific region, it has been registered for Valle del Cauca department (Zambrano-González & Ortiz-Ordóñez, 2009, Ascuntar-Osnas, *et al.*, 2010, Gaviria-Ortiz & Henao-Bañol, 2011), and in the Orinoquia region, in the Casanare department (Urbano, *et al.*, 2014).

Discussion

Six families of Neotropical butterflies were found in Santo Domingo de Mesa coinciding with observations by Emmel (1975), Pulido-B. & Andrade-C. (2007, 2009), Campos & Andrade-C. (2009), Montero, *et al.* (2009), Campos-Salazar, *et al.* (2011), Prince-Chacón, *et al.* (2011), Vargas-Zapata, *et al.* (2011), Boom-Uruetea, *et al.* (2013), and Moreno-M. & Acuña-Vargas (2015) in tropical dry forest fragments in the Caribbean region.

In this study, we registered 67 species, 12 more than those recorded by Mercado-Gómez, *et al.* (2018) for the Serranía de la Coraza, Montes de María, Sucre. As expected in the Neotropics (Brown, 1996, Marín-Gómez, *et al.*, 2011), the Nymphalidae was the family with the most subfamilies and species. Nymphalidae has been found to be associated with the dry forests of Montes de María, in Sucre department (Mercado-Gómez, *et al.*, 2018), and in all the Caribbean plain (Campos-Salazar & Andrade-C., 2009; Campos-Salazar, *et al.*, 2011, Montero, *et al.*, 2009, Prince-Chacón, *et al.*, 2011, Moreno-M. & Acuña-Vargas, 2015) including the Sierra Nevada of Santa Marta (Vargas-Zapata, *et al.*, 2011). The Pieridae family was the second family with the highest number of species coinciding with the study by Campos-Salazar, *et al.* (2011) in Córdoba department and Vargas-Zapata, *et al.* (2011) in Magdalena department.

Papilionidae had a low richness, which coincides with the findings by Montero, *et al.* (2009) and Prince-Chacón, *et al.* (2011) for Atlántico department, and so did Riodinidae, which coincided with the results obtained for the departments of Sucre (Montes de María) by Mercado-Gómez, *et al.* (2018), Córdoba by Campos-Salazar, *et al.* (2011), Atlántico by Boom-Urueta, *et al.* (2013), and Magdalena by Vargas-Zapata, *et al.* (2011). The Lycaenidae family also registered a low richness, which differs from studies conducted in the Neotropics where it is considered one of the most diverse families (Brown, 1996, Marín-Gómez, *et al.*, 2011).

Conclusions and recommendations

This is the first study on diurnal butterflies in Montes de María, Bolívar. We provide a preliminary list of species confirming the presence of three species for the Colombian Caribbean. Throughout history, the Montes de María subregion has been characterized by its difficult access but this has improved greatly since the post-conflict, thus opening the possibility of giving the first steps to investigate the insects in the area and highlighting the need of greater scientific explorations to establish the richness of this region, one of the most biodiverse areas of the Colombian Caribbean, which has been subjected to processes of agricultural and livestock transformation.

Author contributions

Daniela Ahumada-C. and Alejandro Segovia-Paccini: Field work, laboratory, and generation of species list. Daniela

Ahumada-C.: Manuscript writing and map design. Alejandro Segovia-Paccini and Gabriel R. Navas-S.: Figures preparation. All authors reviewed the manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Acknowledgements

We thank Adolfo Mulet, Gloribeth Ríos, Ada Sandoval, Hermen González, Hugo Vides, Carolina Rodríguez, and the students of *Escuela de Ciudadanía Medio Ambiente, Fauna y Ordenamiento territorial* (Corporación Desarrollo Solidario - CDS) for their help during the samplings. Hermen González and Hugo Vides for their collaboration in the laboratory work. Evelio Mendoza, Ronald Mendoza, Heidy Mendoza (Saltones de Mesa), Felipe González, and Geovaldis González (Camarón) for allowing us to carry out this investigation in their villages and opening the doors of their communities. Yuleidis Rodríguez for supplying some photographs. Hugo Vides and Indiana Ríos for their recommendations in the drafting of the manuscript. Lina Cabarcas, Laura Contreras, Diego Gil, and Alexandria Gabb for their comments on the English translation of the document. Professor Gonzalo Andrade and his students for their collaboration at the ICN at *Universidad Nacional de Colombia*. Finally, we thank CDS, José Ahumada, and Estela Cabarcas for financing this study, as well as the funds received from Cartagena University (Minutes 065-2018).

Supplementary material

Annex. List of codes of specimens with their taxonomic identification. See the Annex in: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/808/2551>

References

- Ahumada-C., D. (2017). Fauna. In Jardín Botánico de Cartagena “Guillermo Piñeres” (editors). Guía de especies de Flora y Fauna de la Ciénaga de la Virgen, sector UCG6 (130-172). Cartagena de Indias, Colombia: Jardín Botánico de Cartagena “Guillermo Piñeres” y Agencia para la Cooperación Alemana GIZ.
- Andrade-C., M.G. (2002). Biodiversidad de las mariposas (Lepidoptera: Rhopalocera) de Colombia. *Red Iberoamericana de Biogeografía y Entomología Sistemática*. **2**: 153-172.
- Andrade-C., M.G., Henao, E.R., Triviño, P. (2013). Técnicas y procesamiento para la recolección, preservación y montaje de mariposas en estudios de biodiversidad y conservación. (Lepidoptera: Hesperoidea-Papilionoidea). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **37** (144): 311-325.
- Andrade-C., M.G., Henao-Bañol, E.R., Salazar, J.A. (2015). Las mariposas (Lepidoptera: Hesperoidea-Papilionoidea) de la región Amazónica Colombiana. *Revista Colombia Amazónica*. **8**: 92-122.

- Ascuntar-Osnas, O., Armbrrecht, I., Calle, Z.** (2010). Butterflies and vegetation in restored gullies of different ages at the Colombian Western Andes. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **14** (2):163-180.
- Boom-Urueta, C., Seña-Ramos, L., Vargas-Zapata, M., Martínez-Hernández, N.** (2013). Mariposas Hesperioidea y Papilionoidea (Insecta: Lepidoptera) en un fragmento de bosque seco tropical, Atlántico, Colombia. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **17** (1): 149-167.
- Brown, K.S.Jr.** (1996). Conservation of threatened species of Brazilian butterflies. International symposium on Butterfly Conservation III, p. 45-62.
- Camero, E. & Calderón, A.M.** (2007). Comunidad de mariposas diurnas (Lepidoptera:Rhopalocera) en un gradiente altitudinal del Cañón del Río Combeima-Tolima, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. **12** (2): 95-110.
- Campos-Salazar, L.R. & Andrade-C., M.G.** (2009). Lepidópteros (Hesperioidea-Papilionoidea) asociados a bosque seco tropical del Caribe colombiano, un estudio de caso en el bosque El Agüil, Aguachica, y baja montaña de la serranía de Perijá. In J.O. Rangel-Ch. (editores). *Colombia Diversidad Biótica VIII*, p. 615-635. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Campos-Salazar, L.R., Gómez, M., Andrade-C., M.G.** (2011). Mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea Papilionoidea) de las áreas circundantes a las ciénagas del departamento de Córdoba, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. **35** (134): 45-60.
- Constantino, L.M. & Andrade-C., M.G.** (2007). Mariposas diurnas y nocturnas. In G. Amat-García, M.G. Andrade-C., E.C. Amat-García (eds.). *Libro Rojo de Invertebrados Terrestres de Colombia*. p. 109-145. Bogotá D.C., Colombia: Panamericana Formas e Impresos S. A.
- Emmel, T.C.** (1975). The butterfly faunas of San Andres and Providencia islands in the Western Caribbean. *Journal of Research on the Lepidoptera*. **14** (1): 49-56.
- Erazo, M.C. & González-Montaña, L.A.** (2008). Mariposas. In J.V. Rodríguez-Mahecha, J.V. Rueda-Almonacid, T.D. Gutiérrez (editores). *Guía ilustrada de la fauna del Santuario de Vida Silvestre Los Besotes, Valledupar, Cesar, Colombia*. p. 28-71). Bogotá D.C., Colombia: Serie de guías tropicales de campo N° 7, Conservación Internacional-Colombia. Editorial Panamericana, Formas e Impresos.
- Etter, A., McAlpine, C., Possingham, H.** (2008). A historical analysis of the spatial and temporal drivers of landscape change in Colombia since 1500. *Annals of the American Association of Geographers*. **98**: 2-23.
- Freitas, A.V.L., Francini, R.B., Brown, K.S.Jr.** (2003). Insectos como indicadores ambientais. In L. Cullen, R. Rudran, C. Valladares-Pádua (editores). *Manual Brasileiro em Biología da Conservação*. Washington D.C., United States of America: Smithsonian Institution Press.
- Gaviria-Ortiz, F.G. & Henao-Bañol, E.R.** (2011). Diversidad de mariposas diurnas (Hesperioidea-Papilionoidea) del Parque Natural Regional el Vínculo (Bugá, Valle del Cauca). *Boletín científico del Museo de Historia Natural*. **15** (1): 115-133.
- González, L.A. & Andrade-C., M.G.** (2008). Diversidad y biogeografía preliminar de las mariposas saltarinas (Lepidoptera: Hesperioidea) de Colombia. *Zoología*. **32** (124): 422-433.
- Lamas, G.** (2004). Atlas of Neotropical Lepidoptera, checklist: Part 4A: Hesperioidea-Papilionoidea. Florida, United States of America: Association for Tropical Lepidoptera. p. 439.
- Le Crom, J.F., Llorente, J., Constantino, L.M., Salazar, J.A.** (2004). *Mariposas de Colombia*, Tomo 2 Pieridae. Bogotá D.C., Colombia: Carlec Ltda. p. 123.
- Llorente, B.J., Martínez, L.A., Vargas, F.I., Soberón, M.J.** (1993). Biodiversidad de las Mariposas: su conocimiento y conservación en México, *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*. **44**: 313-324.
- Marín-Gómez, O., García, H.R., Gómez, W.F., Pinzón, W.** (2011). Diversidad de mariposas y su relación con la fenología reproductiva de *Inga ornata* kunth (Mimosoidea) en un agroecosistema ganadero del Quindío, Colombia. *Boletín Científico del Museo de Historia Natural*. **15** (2): 105-118.
- Mielke, O.H.H., Emery, E.O., Pinheiro, C.E.G.** (2008). As borboletas Hesperioidea (Lepidoptera, Hesperioidea) do Distrito Federal, Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia*. **52** (2): 283-288.
- Montero, F., Moreno-P., M., Gutiérrez-M., L.C.** (2009). Mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea y Papilionoidea) asociadas a fragmentos de bosque seco tropical en el departamento del Atlántico, Colombia. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **13** (2): 157-173.
- Moreno-M. G.P. & Acuña-Vargas, J.C.** (2015). Caracterización de lepidópteros diurnos en dos sectores del Santuario de Flora y Fauna Los Flamencos (San Lorenzo de Camarones, La Guajira). *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **19** (1): 221-234.
- Núñez, E.O.** (2009). Mariposas diurnas (Lepidoptera: Papilionoidea y Hesperioidea) del Parque Nacional Iguazú, Provincia de Misiones, Argentina. *Tropical Lepidoptera Research*. **19** (2): 71-81.
- Orozco, S., Muriel, S., Palacio, J.** (2009). Diversidad de Lepidópteros diurnos en un área de bosque seco tropical del occidente antioqueño. *Actualidades Biológicas*. **31** (90): 31-41.
- Palacios, M. & Constantino, L.M.** (2006). Diversidad de lepidópteros Rhopalocera en un gradiente altitudinal en la Reserva Natural El Pangán, Nariño, Colombia. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **10**: 258-278.
- Pizano, C. & García, H.** (2014). *El Bosque Seco Tropical en Colombia*. Bogotá, D.C., Colombia: Biblioteca Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. p. 353.
- Plataforma de Organizaciones de Desarrollo Europeas en Colombia (PODEC).** (2011). Análisis del plan de consolidación de Montes de María. Bogotá D.C., Colombia: Editorial CÓDICE Ltda. p. 194.
- Prince-Chacón, S., Vargas-Zapata, M.A., Salazar, M.A., Martínez-Hernández, J.A.** (2011). Mariposas Papilionoidea y Hesperioidea (Insecta: Lepidoptera) en dos fragmentos de bosque seco tropical en Corrales de San Luis, Atlántico, Colombia. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa*. **48**: 243-252.
- Pulido-B., H.W. & Andrade-C., M.G.** (2007). Mariposas de las partes altas de Perijá. In J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica V*. p. 235-248. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Pulido-B., H.W. & Andrade-C., M.G.** (2009). Las mariposas de la serranía de Perijá. In J.O. Rangel-Ch. (ed.). *Colombia Diversidad Biótica VIII*. p.615-631. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.

- Quintero, J., Moreno, D., Otero, J.** (2014). Identificación de especies promisorias de lepidópteros en la hacienda el Roble para criadero in situ. *Citecsa*. **5** (8): 21-44.
- Rangel-Ch., J.O. & Carvajal-Cogollo, J.E.** (2012). Clima de la región Caribe colombiana. In J.O. Rangel-Ch. (editores). *Colombia Diversidad Biótica XII*. p. 67-129. Bogotá D.C., Colombia: Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia.
- Ríos-Málaver, C.** (2007). Riqueza de especies de mariposas (Hesperioidea y Papilionoidea) de la quebrada "El Águila" Cordillera Central (Manizales, Colombia). *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **11**: 272-291.
- Rodríguez, G. & Miller, H.** (2013). Inventario preliminar de los Rhopalocera de Mitu Vaupés, Colombia (Insecta: Lepidoptera). *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **17** (1):196-218.
- Suárez, Y.** (2014). Mariposas (Lepidoptera: Papilionoidea) colectadas en Venecia (Cundinamarca, Colombia): Catálogo ilustrado (tesis de pregrado). Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.
- Urbano, P., Munevar, J., Mahecha-J., O., Hincapié, E.** (2014). Diversidad y estructura de las comunidades de Lepidoptera en la zona del ecotono entre el piedemonte llanero y sabana inundable en Casanare-Colombia (Lepidoptera: Papilionoidea). *SHILAP Revista de Lepidopterología*. **42** (167): 433-437.
- Valencia, C.A., Gil, Z.N., Constantino, L.M.** (2005). Mariposas diurnas de la zona central cafetera colombiana. *Guía de Campo*. Chinchiná, Colombia: Cenicafé. p. 244.
- Vargas-Zapata, M., Martínez-Hernández, N., Gutiérrez-Moreno, L., Prince-Chacón, S., Herrera-Colón, V., Torres-Periñán, L.** (2011). Riqueza y abundancia de Hesperioidea y Papilionoidea (Lepidoptera) en la reserva natural Las Delicias, Santa Marta, Magdalena, Colombia. *Acta Biológica Colombiana*. **16** (1): 43-60.
- Vargas-Ch. & J.I., Salazar, C.A.** (2014). Biodiversidad y mariposas en una región del alto Chocó, San José del Palmar, Colombia. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **18** (1): 259-284.
- Warren, A.D., Davis, K.J., Stangeland, E.M., Pelham, J.P., Grishin, N.V.** (2017). *Illustrated Lists of American Butterflies*. Butterflies of America Foundation. Accessed on: January and October 2018. Retrieved from: www.butterfliesofamerica.com
- Zambrano-González, G. & Ortiz-Ordóñez, G.F.** (2009). Diversidad de lepidópteros diurnos en tres localidades del corredor biológico y multicultural Munchique - Pinche, Cauca, Colombia. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*. **13** (1):214-224.

Los 5-aminopirazoles como bloque de construcción de compuestos heterocíclicos fusionados

✉ Jairo Quiroga Puello

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

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 18 de julio del 2019

Resumen

Los compuestos heterocíclicos ocupan un lugar importante entre los grandes grupos o familias de compuestos que conforman la química orgánica, no solo por la diversidad estructural y las propiedades químicas que los hacen atractivos como auxiliares sintéticos, sino porque los núcleos heterocíclicos son constituyentes de productos naturales y juegan un papel clave en los procesos biológicos, lo que explica su aplicación como agentes terapéuticos. Además, muchos de los medicamentos para el tratamiento de diversas enfermedades poseen unidades estructurales heterocíclicas, lo que convierte a estos compuestos en objetivos de la química medicinal. En este estudio se presenta un resumen de la investigación del autor y su grupo sobre el tema de los aminopirazoles y su importancia en la síntesis de compuestos heterocíclicos de mayor complejidad. El diseño, la síntesis y el estudio estructural de los nuevos compuestos sintetizados que contienen el núcleo del pirazol se hicieron en el Grupo de Investigación de Compuestos Heterocíclicos (GICH) del Departamento de Química de la Universidad del Valle, con la colaboración de instituciones nacionales e internacionales, con el objetivo de estudiar la posible actividad antitumoral, antifúngica y antibacteriana de algunos de los nuevos compuestos sintetizados.

Palabras clave: Hidracinas; Nitrilos; Aminopirazol; Bielectrófilos; Compuestos con metileno activo; Pirazolopiridina; Pirazolopirimidina.

5-Aminopyrazoles as a building block for fused heterocyclic compounds

Abstract

Heterocyclic compounds have an important place among the large groups or families of compounds that make up organic chemistry. This is not only due to its structural diversity and chemical properties, which makes them attractive as synthetic auxiliaries, but also because their heterocyclic nuclei are constituents of natural products and play a key role in biological processes. Their application as therapeutic agents for the treatment of various diseases also turns their structural units in targets of medicinal chemistry. This study is a summary of the research conducted by the author and his group on the subject of aminopyrazoles and their importance in the synthesis of heterocyclic compounds of greater complexity. The design, synthesis, and study of new compounds containing the pyrazole nucleus have been carried out in the Heterocyclic Compounds Research Group (GICH) of the Chemistry Department at Valle University where together with other national and international institutions, we have studied the possible antitumor, antifungal, and antibacterial activity of some of the new compounds.

Key words: Hydrazines; Nitriles; Aminopyrazole; Bielectrophiles; Methylene active compounds; Pyrazolopyridine; Pyrazolopyrimidine.

Introducción

La química de aminopirazoles se ha investigado ampliamente. La considerable actividad biológica y el gran potencial farmacológico de los pirazoles y los azolopirazoles, cuyos precursores preferidos son los aminopirazoles, han servido de estímulo para estas investigaciones. Recientemente, el interés por la síntesis y la química de los aminopirazoles ha venido resurgiendo gracias a la bioactividad del zaleplon

(1) (Kumar, V, *et al.*, 2013), el Viagra (2) (Elmaati, T. M. A., *et al.*, 2004) y el alopurinol (3) (Anwara, H. F., *et al.*, 2009), tres pirazoles de reconocida importancia farmacológica (Figura 1).

Correspondencia:

Jairo Quiroga Puello; jairo.quiroga@correounivalle.edu.co

Recibido: 7 de septiembre de 2018

Aceptado: 30 de enero de 2019

Editor: Fernando Martínez

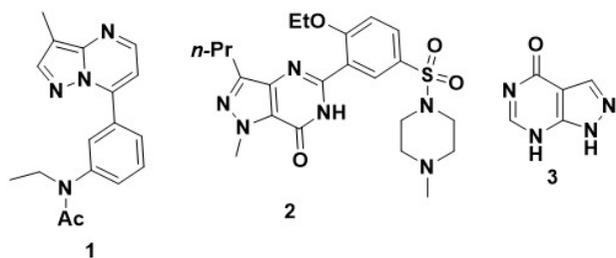


Figura 1. Estructura de derivados del pirazol con actividad biológica (1) zaleplon, (2) viagra, (3) alopurinol

La síntesis de los 5-aminopirazoles

Los derivados de los 5-aminopirazoles (**8**) se han sintetizado mediante la reacción de nitrilos α,β -funcionalizados (**4,9**) con hidracina (Sadek, K. U., *et al.*, 1993) (Furukawa, M., *et al.*, 1973) (Cai, J., *et al.*, 2006) (Figura 1S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2524>). Sin embargo, existen otras metodologías que han permitido acceder a dichos compuestos, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

Otro método para la síntesis de los 5-aminopirazoles consiste en la interacción de hidracinas con 3-oxoalcanonitrilos (**10**) (Pask, C. M., *et al.*, 2006) (Elnagdi, M. H., *et al.*, 1976). Una modificación de este método consiste en utilizar 3-iminoalcanonitrilos (**11**) en lugar del oxonitrilo (Figura 2S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2525>) (Riyadh, S. M., *et al.*, 2008) (Grandberg, I. I. *et al.*, 1961). Los derivados de 1-aroil- o (1-heteroaroil)-5-aminopirazoles se obtienen de manera simple mediante la reacción de β -aminocrotononitrilo con diferentes hidracinas (**4**) ($X = \text{ArCO}$ (**12**)) (Quiroga, J. *et al.*, 2008a).

Por otro lado, la reacción de beta-clorocinamonitrilos (**13**) con hidracinas también es un método eficiente para la síntesis de los 5-aminopirazoles (**8**) (Figura 3S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2526>). Los beta-cloronitrilos se obtienen fácilmente a partir de acetofenonas (Hartmann, H., *et al.*, 1984) (Quiroga, J., *et al.*, 1997).

Además de los métodos ya descritos, la síntesis de aminopirazoles utilizando los métodos tradicionales en solución se ha aplicado en fase sólida. Por ejemplo, se han obtenido 5-aminopirazoles (**15**) mediante la reacción de 3-oxoalcanonitrilos (**14**) anclados a una resina con hidracinas (Figura 4S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2527>) (Furukawa, M., *et al.*, 1973) (Watson, S. P., *et al.*, 1997).

Otra aplicación de la fase sólida en la síntesis de 5-aminopirazoles consiste en la interacción de arilacetoneitrilos (**16**) anclados a una resina con DMF-DMA (i), hidrólisis ácida (ii), y ciclación con hidracinas (iii) (Figura 5S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2528>) (Wilson, R. D., *et al.*, 1998) (Tupper, D. E., *et al.*, 1997).

Las ditionhidrazidas ancladas (**21**) sobre la resina de Merrifield también reaccionan de manera eficiente con acrilonitrilos beta-funcionalizados para formar aminopirazoles (Figura 6S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2529>) (Hwang, J. Y., *et al.*, 2005).

En nuestro grupo hemos desarrollado una ruta para la modificación química de los 5-aminopirazoles (**25**) mediante la reacción de 5-aminopirazoles NH-no sustituidos (**8**) con 4-fluorobenzoatos activados (**24**) mediante una reacción de sustitución nucleófila, la cual se ha llevado a cabo en solución y en fase sólida con buenos rendimientos (Figura 7S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2530>) (Portilla, J., *et al.*, 2008).

La reactividad de aminopirazoles

Los aminopirazoles son sistemas π -excedentes y se consideran como 1,3-dinucleófilos de alta reactividad (Figura 2). En el caso de los NH-5-aminopirazoles aparece un tercer centro nucleófilo, lo que incrementa las posibilidades de reacción con diferentes bi-electrófilos (Figura 2b) (Hartmann, H., *et al.*, 1984) (Quiroga, J., *et al.*, 1997).

Dada esta propiedad de los 5-aminopirazoles, estos actúan como importantes bloques de construcción de una gran variedad de sistemas heterocíclicos fusionados, entre los que se destacan las pirazolopiridinas, las pirazoloquinolinas, las pirazolopirimidinas, las *bis*-pirazolopiridinas y las pirazoloquinazolinas. Los compuestos que contienen estos bloques han presentado interesantes propiedades biológicas (Figura 3).

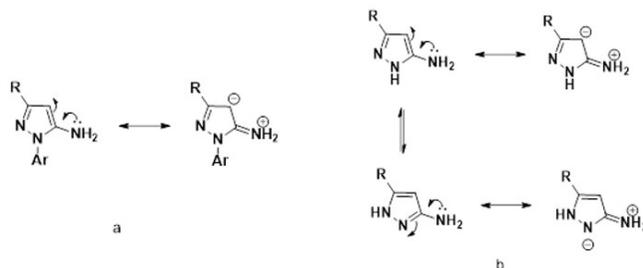


Figura 2. Los aminopirazoles como sistemas π -excedentes

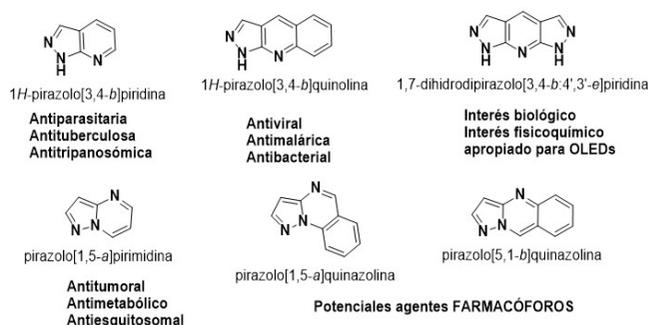


Figura 3. Diferentes estructuras obtenidas a partir de los 5-aminopirazoles y su campo de aplicación

Los aminopirazoles en la reacción con compuestos bi-electrófilos

Los aminopirazoles reaccionan con componentes bi-electrofilicos como las chalconas (**26**) y con compuestos 1,3-dicarbonílicos (**27**) para dar pirazolopiridinas (**31**). El uso de las chalconas (**26**) permite obtener las pirazolopiridinas parcialmente hidrogenadas (**30**) (dihidropirazolopiridinas). Estos productos son estables y se pueden aromatizar mediante el tratamiento con un agente oxidante. El uso de otros bi-electrófilos como las α,β -dibromo- (**28**) y α,β -epoxichalconas (**29**) en la reacción también lleva a la obtención de pirazolopiridinas (**30**) (Orlov, V. D., *et al.*, 1987) (Insuasty, B., *et al.*, 1997) (Figura 4).

La interacción de 5-amino-1-arylpirazoles (**8**) con β -dimetilaminopropiofenonas (**32**) (bases de Mannich) también conlleva la formación de dihidropirazolopiridinas (**30**). Cabe agregar que las β -dimetilaminopropiofenonas son precursores de cetonas α,β -insaturadas, las cuales son análogas de las chalconas (Figura 5) (Quiroga, J., *et al.*, 1998a).

En el caso de los 5-amino-1-arylpirazoles NH-no sustituidos en la reacción con compuestos carbonílicos α,β -insaturados, se obtuvieron dihidropirazolo[1,5-*a*]pirimidinas (**33**) (Figura 5) (Quiroga, J., *et al.*, 1994) (Orlov, V. D., *et al.*, 1988). La reacción mostró ser regioselectiva y la orientación se determinó fácilmente mediante el análisis del espectro de ^1H RMN. En estos se observó la señal característica del protón en posición 4 del anillo pirazólico desplazada a campo alto. Estos compuestos se pueden aromatizar al tratarlos con NBS en etanol. Cuando se utilizaron las β -dimetilaminopropiofenonas (bases de Mannich) (**32**) en lugar de las chalconas se obtuvieron resultados idénticos (**26**) en la reacción con *NH*-aminopirazoles, obteniéndose también las dihidropirazolo[1,5-*a*]pirimidinas (**33**) (Figura 5) (Quiroga, J., *et al.*, 1999a). Las α -cianoalchalconas también reaccionan con los *NH*-aminopirazoles llevando a la

formación de cianodihidro-pirazolopiridinas (Figura 8S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2531>) (Quiroga, J., *et al.*, 2001a).

Los 5-amino-1-arylpirazoles (**8**) se comportan de manera análoga en la reacción con otros sistemas α,β -insaturados. Por ejemplo, la reacción entre 5-amino-1-arylpirazoles con bencilidenderivados del malonodinitrilo (**35**) y el cianoacetato de etilo (**36**) conlleva la formación de aminopirazolopiridinas (**37**) y oxopirazolopiridinas (**38a**), respectivamente (Figura 9S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2532>) (Quiroga, J., *et al.*, 1999b).

La reacción de aminopirazoles (**8**) con bencilidenderivados del ácido de Meldrum (**39a**) también conllevó la formación de pirazolopiridonas (**38b**) (Quiroga, J., *et al.*,

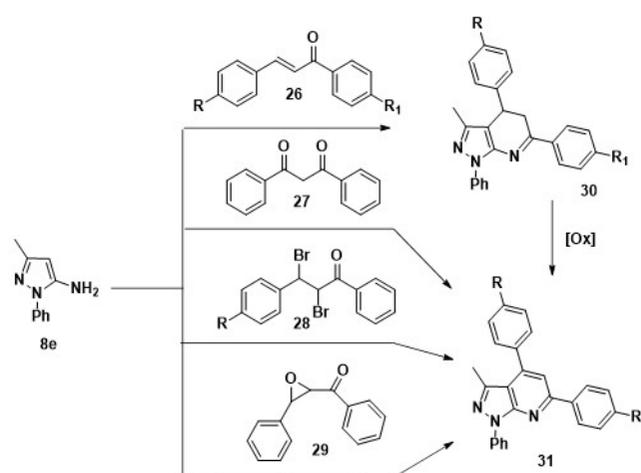


Figura 4. Síntesis de pirazolopiridinas. **8e** 5-amino-1-fenil-3-metilpirazol; **26** chalconas; **27** compuesto 1,3-dicarbonílico; **28** dibromoalchalcona; **29** epoxichalcona; **30** dihidropirazolo[3,4-*b*]piridina; **31** pirazolo[3,4-*b*]piridina

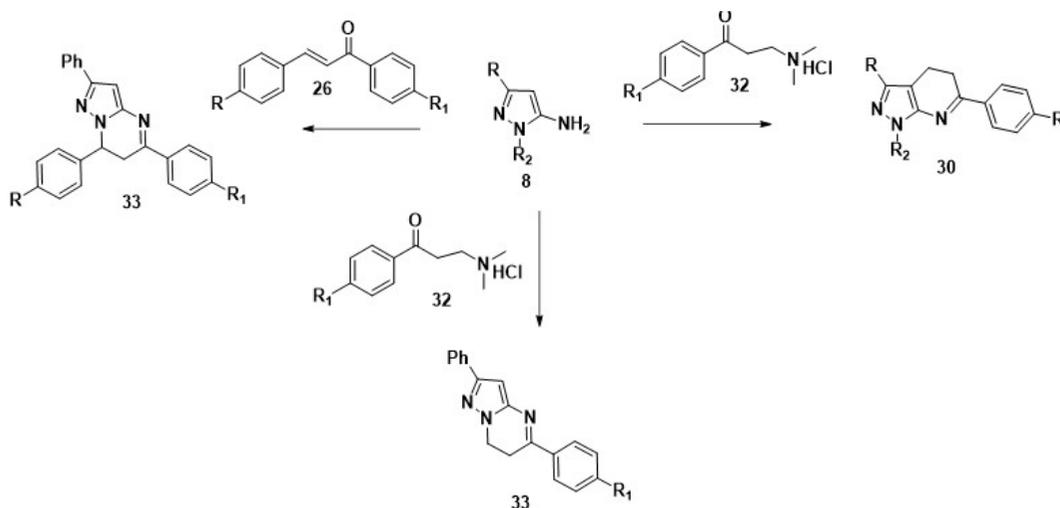


Figura 5. Síntesis de pirazolopiridinas y pirazolopirimidinas. **8** 5-amino-1-arylpirazoles, **30** 4,5-dihidro[3,4-*b*]piridinas, **32** dimetilaminopropiofenonas, **33** 6,7-dihidropirazolo[1,5-*a*]pirimidinas

1998b). Esta reacción presentó una alta regioselectividad. Los *NH*-aminopirazoles también reaccionan con los bencilidenderivados del ácido de Meldrum formando pirazolo-piridonas (**38b**) con la participación del carbono C-4 (Figura 10S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/articulo/view/762/2533>) (Quiroga, J., *et al.*, 1999c).

Resulta interesante destacar que los sistemas carbonílicos α,β -insaturados que incluyen un heterociclo en su estructura también participan en la reacción de ciclocondensación con 5-aminopirazoles (**8**). Por ejemplo, el sistema α,β -insaturado (**39b**) que presentaba el anillo benzofuránico reaccionó con los *NH*-5-aminopirazoles (**8f**) mediante un proceso de adición y eliminación con apertura del anillo furánico (Quiroga, J., *et al.*, 2007a). Este procedimiento permitió la síntesis de nuevas pirazolo[1,5-*a*]pirimidinas altamente funcionalizadas (**40**) (Figura 6a). Un comportamiento similar presentó el 4-oxocromeno-3-carbaldehído (**41**) en la reacción con aminopirazoles (Quiroga, J., *et al.*, 2002). La ciclocondensación transcurre con la apertura del anillo croménico y la formación de pirazolo[1,5-*a*]pirimidinas funcionalizadas (**42**) (Figura 6b). Lo mismo se observó en el caso de la 3-benzoil-2-metil-cromen-4-ona (**43**) (Quiroga, J., *et al.*, 2008b) en la reacción con aminopirazoles (**8**), obteniéndose también nuevas pirazolo[1,5-*a*]pirimidinas (**44**) funcionalizadas (Figura 6c).

Los sistemas α,β -insaturados incluidos en un anillo heterocíclico también se presentan como materiales de partida versátiles en la reacción con los 5-aminopirazoles. La reacción de bencilidenderivados de la rodanina (**45**) con 5-aminopirazoles (**8e**) conllevó la formación de sistemas tricíclicos tiazolopirazolopiridínicos (**46**) (Sortino, M., *et al.*, 2007) (Delgado, P., *et al.*, 2005), los cuales presentaron una importante actividad antifúngica *in vitro*

(Figura 11S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/articulo/view/762/2534>). Como en todas las interacciones estudiadas, la reacción transcurrió a través de la formación de un β -aducto intermedio.

Las cetonas α,β -insaturadas heterocíclicas, análogas de las chalconas, también reaccionaron con los 5-aminopirazoles. Por ejemplo, las chalconas indólicas (**47**) reaccionaron con el 5-amino-1-fenilpirazol (**8e**) para formar indolilpirazolopiridinas (**48**) (Quiroga, J., *et al.*, 2009a), reacción que fue inducida por radiación de microondas. Los mismos indolilderivados se obtuvieron mediante la interacción tricomponente del aminopirazol (**8e**), el 3-cianoacetilindol (**49**) y diversos benzaldehídos (**50**) (Quiroga, J., *et al.*, 2009a) (Quiroga, J., *et al.*, 2009b). (Figura 12S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/articulo/view/762/2535>).

Aminopirazoles en reacciones de ciclación tricomponentes

Las reacciones multicomponentes son una clase importante de reacciones orgánicas en tándem; son procesos de una sola etapa con mínimo tres componentes diferentes conjugados para formar un solo producto que incorpora la mayoría o, incluso, la totalidad de los materiales de partida (Isambert, N., *et al.*, 2011) (Dömling, A. 2006) (Simon, C., *et al.*, 2004). Debido a estas ventajas, en nuestro grupo se llevó a cabo el estudio de la reacción tricomponente entre aminopirazoles (**8**), aldehídos (**50**) y compuestos con metileno activo (**51**) (la interacción entre aldehídos y compuestos con metileno activo es un método para la formación de diferentes compuestos α,β -insaturados ampliamente utilizados en nuestra investigación). Este procedimiento permitió llevar a cabo procesos de ciclocondensación, con el fin de obtener sistemas

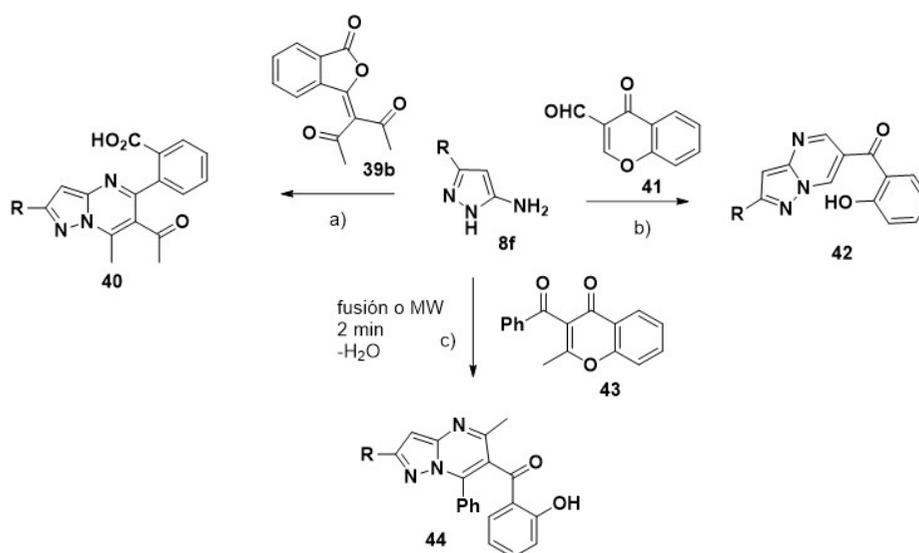


Figura 6. Síntesis de pirazolopirimidinas altamente funcionalizadas. **39b** 3-(3-oxo-2-benzofuran-1(3*H*)-ilidene)pentano-2,4-diona, **40** acetilpirazolo[1,5-*a*]pirimidina, **41** cromona-3-carboxaldehído, **42** hidroxibenzoilpirazolo[1,5-*a*]pirimidina, **43** 3-benzoilcromona, **44** 7-fenil-6-hidroxibenzoil-5-metilpirazolo[1,5-*a*]pirimidina

piridínicos (**52**) fusionados al anillo del pirazol, lo que evita la etapa previa de obtención del sistema α,β -insaturado (Figura 13S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2536>).

La interacción de la 5-aminopirazolona (**53**) con aldehídos (**50**) y benzoilacetonitrilo (**54**) llevó a la formación de cianodihidropirazolopiridinas (**55**). La reacción se realizó en una atmósfera inerte (Quiroga, J., *et al.*, 2000). El calentamiento de los productos (**55**) en dimetilformida (DMF) y en contacto con el aire permitió la aromatización de los dihidroderivados a cianopirazolopiridinas (**56**), las cuales se obtuvieron en un solo paso cuando la reacción fue asistida por microondas (Figura 14S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2537>) (Quiroga, J., *et al.*, 2000).

Este tipo de reacciones tricomponeentes, en las cuales el compuesto con metileno activo presenta una estructura cíclica, permitió obtener sistemas más complejos. Por ejemplo, la reacción entre 5-amino-1-fenil-3-metilpirazol (**8**), aldehídos (**50**) y dimedona (**57**) conllevó la formación de tetrahidropirazoloquinolinas (**58**) (Quiroga, J.; *et al.*, 1998c). (Figura 7a). Igual fue el comportamiento de los *NH*-aminopirazoles, obteniéndose el sistema tricíclico lineal (**59**) (Figura 7b) (Quiroga, J., *et al.*, 2001b). En esta misma reacción tricomponeente la indandiona (**60**), como compuesto con metileno activo, presentó el mismo comportamiento y llevó a la formación de indenopirazolopiridinas (**61**) (Figura 7c) (Quiroga, J.; *et al.*, 2008c). Estas reacciones tricomponeentes también mostraron una gran regioselectividad.

Con esta misma aproximación se hizo la reacción entre aminopirazoles (**8e**), aldehídos aromáticos (**50**) y la 2-hidroxi-naftoquinona (**62**) (Quiroga, J., *et al.*, 2014), la cual demostró una gran eficiencia y regioselectividad. La presencia de grupos receptores de electrones sobre el anillo del benzaldehído (**50**) favoreció la formación de las

benzopirazoloquinolinas aromatzadas (**63**). En el caso de los grupos receptores sobre el aldehído, se obtuvieron los dihidroderivados (**64**) (Diaz, *et al.*, 2010) (Figura 15S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2538>).

Una de las ventajas de las reacciones de varios compoentes es que se pueden llevar a cabo inducidas por microondas y sin disolvente, lo cual permite reacciones más limpias y amigables con el medio ambiente. Por ejemplo, la fusión directa de aminopirazoles (**8e**), aldehídos (**50**) y beta-tetralona (**65**) nos llevó a la formación de benzopirazoloquinolinas con alto rendimiento (**66**) (Figura 16S, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2539>) (Quiroga, J., *et al.*, 2007b)

Cabe destacar que con la reacción tricomponeente entre aminopirazoles (**8**), aldehídos y α -tetralona (**67**) no se obtuvieron las esperadas benzopirazoloquinolinas (**68**), pero sí las *bis*-pirazolopiridinas (**69**) (Figura 16S). Para la obtención de las benzopirazoloquinolinas (**68**), se preparó previamente el bencilidenderivado de la tetralona (**70**), el cual se sometió a fusión con los aminopirazoles (**8**) (Quiroga, J., *et al.*, 2007b). Nuestro grupo ya había sintetizado anteriormente estas *bis*-pirazolopiridinas mediante la reacción inducida por microondas de dos moles de aminopirazoles (**8**) y uno de aldehído (**50**). Estos compuestos se caracterizan por presentar alta fluorescencia tanto en estado sólido como en solución (Quiroga, J., *et al.*, 2005).

Por otro lado, los compuestos espiránicos son moléculas orgánicas que contienen dos anillos unidos por un solo átomo, por lo general de carbono (carbono espiro). Este tipo de compuestos es interesante en la síntesis orgánica, primero por su difícil obtención, ya que exhiben rigidez estructural debido a la tensión que presenta el carbono espiro, y segundo, porque proporcionan plataformas sobre las que se pueden organizar farmacóforos para la generación

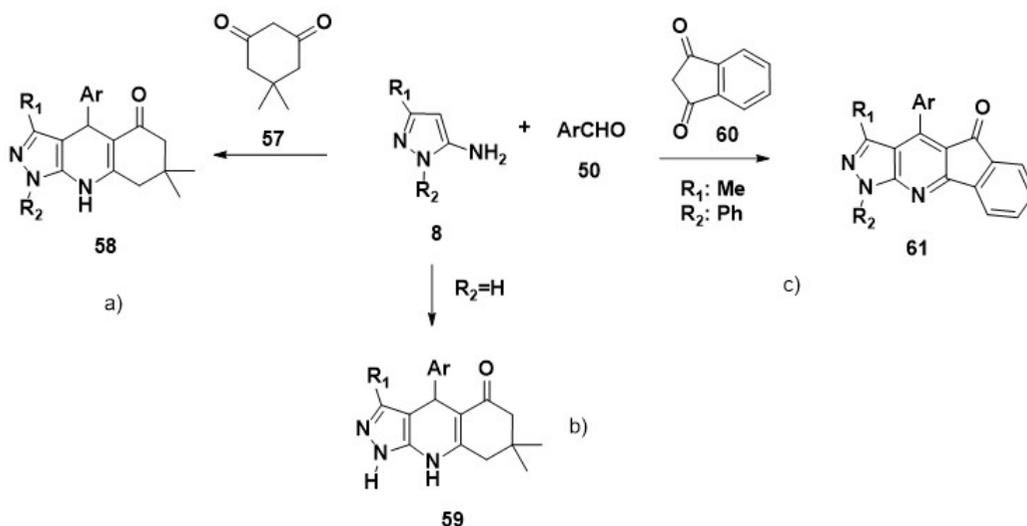


Figura 7. Síntesis de pirazoloquinolinas e indenopirazolopiridinas. **8** 5-aminopirazoles, **50** benzaldehídos, **57** dimedona, **58** 1-arilpirazolo [3,4-*b*]quinolona, **59** 3-aril-1H-pirazolo[3,4-*b*]quinolona, **60** indandiona, **61** indenopirazolo[3,4-*b*]quinolona

de nuevos compuestos útiles en el desarrollo de potentes y selectivas drogas, por lo que el estudio y el diseño de nuevas metodologías para la síntesis de heterociclos espiranos es de gran valor en áreas como la medicina. Recientemente se hizo la síntesis de compuestos espiránicos que contenían el sistema pirazolopiridínico. La reacción de N-bencilaminopirazoles (**71**) con cicloalcanodionas (**72**) (dimedona, 1,3-ciclohexanodiona, 1,3-ciclopentanodiona e indandiona) y exceso de formaldehído (**73**) llevó a la formación de pirazolopiridin-5-espirocicloalcanodionas (**74**) (Figura 17S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2540>) (Quiroga, J., *et al.*, 2010) (Quiroga, *et al.*, 2013).

Continuando con la síntesis de sistemas espiránicos que contienen el núcleo pirazolopiridínico, se hizo la reacción tricomponente de aminopirazoles (**8**), compuestos con metileno activo (**72**) y derivados de la isatina (**75**) como componente carbonílico, la cual permitió sintetizar una amplia librería de espiranos derivados de pirazolopiridinas (**76**) que contenían el núcleo de la isatina y, además, un anillo adicional fusionado al sistema de base (Figura 18S, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2541>) (Quiroga, J., *et al.*, 2011).

Conclusiones

En la presente revisión se reportan las contribuciones más recientes del autor y sus colaboradores en la línea de la síntesis de sistemas heterocíclicos fusionados que contenían el anillo pirazólico, en la cual se utilizaron como precursores los 5-aminopirazoles, moléculas sencillas y de una gran reactividad frente a los reactivos bi-electrofilicos. Las reacciones se llevaron a cabo utilizando calentamiento convencional y fuentes de energía no convencionales como la radiación de microondas y el ultrasonido. Algunos de los compuestos sintetizados presentaron una interesante actividad biológica, lo que abre la perspectiva de seguir investigando en esta área. Además, dada su alta y múltiple funcionalidad, los nuevos compuestos fusionados sintetizados se pueden usar como precursores para la síntesis de sistemas heterocíclicos más complejos.

Agradecimientos

El autor agradece a todos los integrantes del Grupo de Investigación de Compuestos Heterocíclicos (GICH) del Departamento de Química de la Universidad del Valle y a todos sus estudiantes (egresados y activos) por su colaboración. A la doctora Susana Zacchino de la Universidad de Rosario, Argentina; a los doctores Manuel Noguera y Justo Cobo de la Universidad de Jaén, España; al doctor Jean Rodríguez del Institut des Sciences Moleculaires, Aix-Marseille Université; al profesor Herber Meier del Instituto de Química Orgánica de la Universidad de Mainz, Alemania; al Instituto Nacional de Cáncer (NCI) de los Estados Unidos, y a las entidades que han financiado la investigación: COLCIENCIAS, Banco de la República y Universidad del Valle.

Material suplementario

Figura 1S. Síntesis de aminopirazoles a partir de acrilonitrilo. **4**, **9** nitrilos funcionalizados; **5** hidrato de hidracina; **6** cianoetilhidracina; **7** dihidropirazol; **8a** 5-aminopirazol. Vea la figura 1S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2524>

Figura 2S. Síntesis de aminopirazoles a partir de oxo- e iminoalcanonitrilos. **4,12** arilhidracinas; **8b** 5-amino-3-hetarilpirazol; **8c** 5-amino-1-aril-3-metilpirazoles; **10** hetariloxopropanonitrilo; **11** aminocrotononitrilo. Vea la figura 2S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2525>

Figura 3S. Síntesis de aminopirazoles a partir de β -clorocinamonitrilos. **4** hidrato de hidracina; **8d** 5-amino-3-arilpirazoles; **13** b-clorocinamonitrilos. Vea la figura 3S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2526>

Figura 4S. Síntesis de aminopirazoles en fase sólida a partir de aroilacetoneitrilos. **14** carboxifenil-3-oxoalcanonitrilo; **15** 5-amino-3-carboxifenilpirazoles. Vea la figura 4S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2527>

Figura 5S. Síntesis de aminopirazoles en fase sólida a partir de arilacetoneitrilos. **16** arilacetoneitrilo; **17** dimetilaminometilenoarilacetoneitrilo; **18** 2-formilarilacetoneitrilo; **19** 5-acilamino-4-arilpirazoles. Vea la figura 5S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2528>

Figura 6S. Síntesis de aminopirazoles soportados sobre resina de Merrifield. **20** resina de Merrifield; **21** ditioidrazidas; **22** 5-amino-1-ditiocarboxipirazoles; **23** 5-aminopirazoles. Vea la figura 6S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2529>

Figura 7S. Modificación de aminopirazoles en fase sólida. **8** 5-amino-3-R-pirazoles NH-no sustituidos; **24** 4-fluorobenzoatos activados; **25** 5-amino-1-arilpirazoles. Vea la figura 7S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2530>

Figura 8S. Aminopirazoles en la reacción con cianochalconas. **8** 5-amino-3-arilpirazoles; **34** cianopirazol[3,4-*b*]piridinas. Vea la figura 8S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2531>

Figura 9S. Síntesis de aminocianopirazolopiridinas y cianopirazolopiridonas. **8e** 5-amino-1-fenil-3-metilpirazol; **37** 6-amino-5-cianopirazol[3,4-*b*]piridinas; **38a** 5-cianopirazol[3,4-*b*]piridin-6-onas. Vea la figura 9S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2532>

Figura 10S. Reacción de 5-aminopirazoles con bencilidenderizados del ácido de Meldrum. **8** 5-aminopirazoles; **38b** 4,5-dihidropirazol[3,4-*b*]piridin-6-onas; **39a** arilidenderizados del ácido de Meldrum. Vea la figura 10S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2533>

Figura 11S. Síntesis de tiazolopirazolopiridinas. **8e** 5-amino-1-fenil-3-metilpirazol; **45** arilidenderizados de la rodanina; **46** tiazolopirazol[3,4-*b*]piridinas. Vea la figura 11S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2534>

Figura 12S. Síntesis de indolilpirazolopiridinas. **8e** 5-amino-1-fenil-3-metilpirazol; **47** 2-indolilcarbonilcinamonitrilo; **48** 6-indolilpirazol[3,4-*b*]piridinas; **49** 3-cianoacetilindol; **50** benzaldehídos. Vea la figura 12S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2535>

Figura 13S. Síntesis tricomponente de pirazolopiridinas. **8** 5-aminopirazoles; **50** benzaldehídos; **51** compuestos con metilenoactivo; **52** 4,7-dihidropirazol[3,4-*b*]piridinas. Vea la figura 13S en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/762/2536>

Figura 14S. Síntesis de dihidro- y pirazolopiridonas. **50** benzaldehídos; **53** 5-amino-3-pirazolona; **54** 3-fenil-3-oxopropanonitrilo; **55** 5-ciano-4,7-dihidropirazolo[3,4-*b*]piridin-3-ona; **56** 5-ciano-pirazolo[3,4-*b*]piridin-3-ona. Vea la figura 14S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2537>

Figura 15S. Síntesis tricomponente de benzopirazoloquinolonas. **8e** 5-amino-1-fenil-3-metilpirazol; **50** benzaldehídos; **62** 2-hidroxi-1,4-naftoquinona; **63** naftopirazolo[3,4-*b*]piridinas; **64** dihidro-naftopirazolo[3,4-*b*]piridinas. Vea la figura 15S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2538>

Figura 16S. Síntesis de benzopirazoloquinolinas. **8e** 5-amino-1-fenil-3-metilpirazol; **50** benzaldehídos; **65** β-tetralona; **66** nafto[1,2-*e*]pirazolo[3,4-*b*]piridinas; **67** α-tetralona; **68** nafto[2,1-*e*]pirazolo[3,4-*b*]piridinas; **69** bis-pirazolopiridinas; **70** 2-ariliden-1-tetralona. Vea la figura 16S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2539>

Figura 17S. Síntesis de espiropirazolopiridinas. **71** 5-bencilamino-1-fenil-3-ter-butilpirazol; **72** compuestos 1,3-dicarbonílicos cíclicos; **73** formaldehído; **74** espirocicloalcanodionapirazolo[3,4-*b*]piridinas. Vea la figura 17S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2540>

Figura 18S. Síntesis de espiroisatinpirazolopiridinas fusionadas con otro anillo. **8** 5-aminopirazoles; **72** compuestos 1,3-dicarbonílicos cíclicos; **75** isatina; **76** espiroisatinpirazolo[3,4-*b*]piridinas. Vea la figura 18S en: <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/762/2541>

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Anwara, H. F., Elnagdi, M. H. (2009). Recent developments in aminopyrazole chemistry. *ARKIVOC* 198-250.
- Cai, J., Jiang H., Lin, X. (2006). Improvement in the synthetic method of 3(5)-aminopyrazole. *Huagong Shikan*. **20**: 15-16.
- Delgado, P., Cruz, S., Cobo, J., Low, J. N., Glidewell, C. (2005). 3-Methyl-4-(4-nitrophenyl)-1-phenyl-1,7-dihydro-6H-pirazolo[3,4-*b*]thiazolo[5,4-*e*]pyridine-6-thione-dimethylformamide (1/1). *Acta Cryst.* **E61**: 3998-4000.
- Diaz, Y., Quiroga, Y., Cobo, J., Glidewell, C. (2010). Two similarly substituted benzo[*h*]pirazolo[3,4-*b*]quinoline-5,6(10*H*)-diones: supramolecular structures in two and three dimensions. *Acta Cryst.* **C66**: 305-309.
- Dömling, A. (2006). Recent Developments in Isocyanide Based Multicomponent Reactions in Applied Chemistry. *Chem. Rev.* **106**: 17-89.
- Elmaati, T. M. A., El-Taweel, F. M. (2004). New trends in the chemistry of 5-aminopyrazoles. *J. Heterocycl. Chem.* **41**: 109-134.
- Elnagdi, M. H., El-Moghayar, M. R. H., Fleita, D. H., Hafez, E. A. A., Fahmy, S. M. (1976). Pyrimidine derivatives and related compounds. 4. A route for the synthesis of pyrazolo[3,4-*e*]-*as*-triazines, pyrazolo[3,4-*d*]pyrimidines, and pyrazolo[1,5-*c*]-*as*-triazines. *J. Org. Chem.* **41**: 3781-3784.
- Furukawa, M., Yuki, T., Hayashi, S. (1973). A Convenient Synthesis of Pyrazolines from β-Carbonylethylthiosulfates. *Chem. Pharm. Bull.* **21**: 1845-1846.

- Grandberg, I. I. Din, V. Kost, A. N. (1961). Study on Pyrazole. XX. Synthesis of 5-aminopyrazoles and their sulphonyl derivatives. *Zh. Obshei Khim.* **31**: 2311-2315.
- Hartmann, H., Liebscher, J. (1984). A Facile Synthesis of 5-Aminopyrazoles by the Reaction of β-Chlorocinnamionitriles with Hydrazine Hydrate. *Synthesis* 276-277.
- Hwang, J. Y., Choi, H.-S., Lee, D.-H., Yoo, S., Gong, Y.-D. (2005). Solid-Phase Synthesis of 5-Amino-1-(Substituted Thiocarbamoyl)pyrazole and 1,2,4-Triazole Derivatives via Dithiocarbamate Linker. *J. Comb. Chem.* **7**: 136-141.
- Insuasty, B., Quiroga, J., Meier, H. (1997). Synthesis of fused Heterocycles from Chalcones and Bifunctional Amines. *Trends in Heterocyclic Chem.* **5**: 83-89.
- Isambert, N., Sánchez Duque, M. D. M., Plaquevent, J.-C., Génisson, Y., Rodriguez, J., Constantieux, T. (2011). Multicomponent reactions and ionic liquids: a perfect synergy for eco-compatible heterocyclic synthesis. *Chem. Soc. Rev.* **40**: 1347-1357.
- Kumar, V., Kaur, K., Gupta, G. K., Sharma, A. K. (2013). Pyrazole containing natural products: Synthetic preview and biological significance. *Eur. J. Med. Chem.* **69**: 735-753.
- Orlov, V. D., Quiroga, J., Kolos, N. N. (1987). Synthesis of Aromatic Derivatives of Pyrazolo[4,5-*b*]pyridine. *Khim. Geterosikl. Soedin.* **9**: 1247-1251.
- Orlov, V. D., Quiroga, J., Kolos, N. N., Desenko, S. M. (1988). Arylderivatives of 6,7-Dihydropyrazolo[1,5-*a*]pyrimidine. *Chem. Heterocycl. Compd.* 962-965.
- Pask, C. M., Camm, K. D., Kilner, C. A., Halcrow, M. A. (2006). Synthesis of a new series of ditopic proligands for metal salts: differing regiochemistry of electrophilic attack at 3{5}-amino-5{3}-(pyrid-2-yl)-1*H*-pyrazole. *Tetrahedron Lett.* **47**: 2531-2534.
- Portilla, J., Quiroga, J., Abonia, R., Insuasty, B., Noguera, M., Cobo, J., Mata, E. G. (2008). Solution and solid-phase synthesis of 1-pyrazol-3-ylbenzimidazoles. *Synthesis*. 387-394.
- Quiroga, J., Cobo, C., Insuasty, B., Abonia, R., Cruz, S., Noguera, M., Cobo, J. (2008c). Regioselective Three-component Synthesis of Novel Indeno[1,2-*b*]pyrazolo[4,3-*e*]pyridines-Fused Derivatives of 4-Azafluorenone Alkaloid. *J. Heterocyclic Chem.* **45**: 155-159.
- Quiroga, J., Portilla, J., Abonia, R., Insuasty, B., Noguera, M., Cobo, J. (2008a). Synthesis of novel 5-amino-1-arylpyrazoles. *Tetrahedron Lett.* **49**: 5943-5945.
- Quiroga, J., Alvarado, M., Insuasty, B., Moreno, R., Raviña, E., Estevez, I., de Almeida, R. H. (1999b). Synthesis of 5-Cyanopyrazolo[3,4-*b*]pyridines in the Reaction of 5-Amino-3-methyl-1-phenylpyrazole with Arylidene Derivatives of Malonodinitrile and Ethyl Cyanoacetate. *J. Heterocyclic Chem.* **36**: 1311-1316.
- Quiroga, J., Cruz, S., Insuasty, B., Abonia, R. (2000). Synthesis of 5-Cyano-4,7-dihydropyrazolo[3,4-*b*]pyridin-4-ones and 5-Cyano-4,7-pyrazolo[3,4-*b*]pyridin-4-ones in one-step by the Reaction of 5-Aminopyrazolone with Benzaldehyde and Benzoylacetonitrile in Ethanol and by Microwave Radiation in Dry Media. *Heterocyclic Commun.* **6**: 275-282.
- Quiroga, J., Cruz, S., Insuasty, B., Abonia, R., Noguera, M., Sánchez, A., Cobo, J., Low, J. N. (2001a). Synthesis and Structural Analysis of 5-Cyanodihydropyrazolo[3,4-*b*]pyridines. *J. Heterocyclic Chem.* **38**: 53-60.

- Quiroga, J., Diaz, Y., Bueno, J., Insuasty, B., Abonia, R., Ortiz, A., Noguerras, M., Cobo, J.** (2014). Microwave induced three-component synthesis and antimycobacterial activity of benzopyrazolo[3,4-*b*]quinolindiones. *Eur. J. Med. Chem.* **74**: 216-224.
- Quiroga, J., Hormaza, A., Insuasty, B., Márquez, M.** (1998b). Reaction of 5-Amino-1-aryl-3-methylpyrazoles with Benzyldiene Derivatives of Meldrum's Acid: synthesis and characterization of pyrazolo[3,4-*b*]pyridinones. *J. Heterocyclic Chem.* **35**: 409-412.
- Quiroga, J., Insuasty, B., Cruz, S., Hernández, P., Bolaños, A., Moreno, R., Hormaza, A., de Almeida, R. H.** (1998a). Reaction of 5-Aminopyrazoles with β -Dimethylaminopropiophenones. Synthesis of new Pyrazolo[3,4-*b*]pyridines. *J. Heterocyclic Chem.* **35**: 333-338.
- Quiroga, J., Insuasty, B., Foces-Foces, C., Infantes, I., Claramunt, R., Cabildo, P., Jiménez, A., Elguero, J.** (1997). Structure and Tautomerism of 3(5)-Amino-5(3)-arylpyrazoles in the Solid State and in Solution: an X-Ray and NMR Study. *Tetrahedron.* **53**: 10783-10802.
- Quiroga, J., Insuasty, B., Hormaza, A., Cabildo, P., Claramunt, R. M., Elguero, J.** (1999c). Synthesis, Molecular Structure and Tautomerism of 1(2)*H*-Dihydropyrazolo[3,4-*b*]pyridin-6-ones. *Heterocyclic Commun.* **5**: 115-122.
- Quiroga, J., Insuasty, B., Hormaza, A., Gamenara, D., Domínguez, L., Saldaña, J.** (1999a). Synthesis, Characterization and *In Vitro* Anthelmintic Activity against *Nippostrongylus brasiliensis* of New 5-Aryl-2-phenyl-6,7-dihydropyrazolo[1,5-*a*]pyrimidines. *J. Heterocyclic Chem.* **36**: 11-13.
- Quiroga, J., Insuasty, B., Rincón, R., Larrahondo, M., Hanold, N., Meier, H.** (1994). The Formation of Pyrazolo[1,5-*a*]pyrimidines by the Reaction of 3-(4-Chlorophenyl)pyrazol-5-amine with Chalcones. *J. Heterocyclic Chem.* **31**: 1333-1335.
- Quiroga, J., Mejía, D., Insuasty, B., Abonia, R., Noguerras, M., Sánchez, A., Cobo, J., Low, J. N.** (2002). Synthesis of 6-(2-hidroxybenzoyl)pirazolo[1,5-*a*]pyrimidines by Reaction of 5-Amino-1*H*-pyrazoles and 3-formylchromone. *J. Heterocyclic Chem.* **39**: 51-54.
- Quiroga, J., Mejía, D., Insuasty, B., Abonia, R., Noguerras, M., Sánchez, A., Cobo, J., Low, J. N.** (2001b). Regiospecific Synthesis of 4,7,8,9-Tetrahydro-2*H*-pyrazolo[3,4-*b*]quinolin-5(6*H*)-ones. *Tetrahedron.* **57**: 6947-6953.
- Quiroga, J., Pantoja, D., Cobo, J., Glidewell, C.** (2013). Hydrogen-bonded bilayers in 7-benzyl-3-*tert*-butyl-1-phenyl-4,5,6,7-tetrahydro-1*H*-spiro[pyrazolo[3,4-*b*]pyridine-5,2'-indan]-1',3'-dione. *Acta Cryst.* **C69**: 884-887.
- Quiroga, J., Portilla, J., Abonia, R., Insuasty, B., Noguerras, M., Cobo, J.** (2007a). Regioselective synthesis of novel polyfunctionally substituted pyrazolo[1,5-*a*]pyrimidines under solvent-free conditions. *Tetrahedron Lett.* **48**: 6352-6355.
- Quiroga, J., Portilla, J., Abonia, R., Insuasty, B., Noguerras, M., Cobo, J.** (2008b). Regioselective synthesis of novel substituted pyrazolo[1,5-*a*]pyrimidines under solvent-free conditions. *Tetrahedron Lett.* **49**: 6254-6256.
- Quiroga, J., Portilla, J., Insuasty, B., Abonia, R., Noguerras, M., Sortino, M., Zacchino, S.** (2005). Free-solvent Microwave Synthesis of bis-pyrazolo[3,4-*b*:4',3'-*e*]pyridines and Study of their Antifungal Properties. *J. Heterocyclic Chem.* **42**: 61-66.
- Quiroga, J., Portilla, J., Serrano, H., Abonia, R., Insuasty, B., Noguerras, M., Cobo, J.** (2007b). Regioselective synthesis of fused benzopyrazolo[3,4-*b*]quinolines under solvent-free conditions. *Tetrahedron Lett.* **48**: 1987-1990.
- Quiroga, J., Portillo, S., Pérez, A., Gálvez, J., Abonia, R., Insuasty, B.** (2011). An efficient synthesis of pyrazolo[3,4-*b*]pyridine-4-spiroindolinones by a three-component reaction of 5-aminopyrazoles, isatin and cyclic β -diketones. *Tetrahedron Lett.* **52**: 2664-2666.
- Quiroga, J., Sánchez, A. I., Cobo, J., Glidewell, C.** (2009b). 4-(2-Fluorophenyl)-6-(1*H*-indol-1-yl)-3-methyl-1-phenyl-1*H*-pyrazolo[3,4-*b*]pyridine-5-carbonitrile: a chain of rings built from N-H...N, C-H...N and C-H... π (arene) hydrogen bonds. *Acta Cryst.* **C65**: 374-376.
- Quiroga, J., Trilleras, J., Pantoja, D., Abonia, R., Insuasty, B., Noguerras, M., Cobo, J.** (2010). Microwave-Assisted Synthesis of Pyrazolo[3,4-*b*]pyridine-Spirocycloalkanediones by Three-Component Reaction of 5-Aminopyrazole Derivatives, Paraformaldehyde and Cyclic β -Diketones. *Tetrahedron Lett.* **51**: 4717-4719.
- Quiroga, J., Trilleras, J., Sánchez, A. I., Insuasty, B., Abonia, R., Noguerras, M., Cobo, J.** (2009a). Regioselective three-component synthesis of indolylpyrazolo[3,4-*b*]pyridines induced by microwave and under solvent-free conditions. *Lett. Org. Chem.* **6**: 381-383.
- Quiroga, J.; Hormaza, A.; Insuasty, B.; Saitz, C.; Jullian, C.** (1998c). Synthesis of 4-Aryl-4,7,8,9-tetrahydro-6*H*-pyrazolo[3,4-*b*]quinolin-5-ones. *J. Heterocyclic Chem.* **35**: 575-578.
- Riyadh, S. M., Al-Matar, H. M., Elnagdi, M. H.** (2008). Studies with β -oxoalkanonitriles: Simple novel synthesis of 3-[2,6-diaryl-4-pyridyl]-3-oxopropanenitriles. *Molecules.* **13**: 3140-3148.
- Sadek, K. U., Ali Selim, M., Elnagdi, M. H., Otto, H. H.** (1993). Studies on Fused Azoles: Synthesis of Several New Polyfunctionally Substituted Fused Pyrazoles. *Bull. Chem. Soc. Jpn.* **66**: 2927-2930.
- Simon, C.; Constantieux, T.; Rodriguez, J.** (2004). Utilisation of 1,3-Dicarbonyl Derivatives in Multicomponent Reactions. *Eur. J. Org. Chem.* 4957-4980.
- Sortino, M. A., Delgado, P., Juárez, S. F., Quiroga, J., Abonia, R., Insuasty, B., Noguerras, M., Rodero, L., Gariboto, F. M., Enriz, R. D., Zacchino, S.** (2007). Synthesis and Antifungal Activity of (*Z*)-5-Arylidenerhodanines. *Bioorg. Med. Chem.* **15**: 484-494.
- Tupper, D. E., Bray, M. R.** (1997). Steric and Electronic Control in the Addition of Hydrazine and Phenylhydrazine to α -[(Dimethylamino)methylene]- β -oxoarylpropanenitriles. *Synthesis* 337-340.
- Watson, S. P., Wilson, R. D., Judd, D. B., Richards, S. A.** (1997). Solid phase synthesis of 5-aminopyrazoles and derivatives. *Tetrahedron Lett.* **38**: 9065-9068.
- Wilson, R. D., Watson, S. P., Richards, S. A.** (1998). Solid phase synthesis of 5-aminopyrazoles and derivatives part II. *Tetrahedron Lett.* **39**: 2827-2830.

Producción de alcohol cinamílico a partir de la hidrogenación selectiva de cinamaldehído usando catalizadores de oro soportados en óxidos metálicos

Hugo Alfonso Rojas^{1,*}, José Jobanny Martínez¹, María Helena Brijaldo², Fabio Passos³

¹ Grupo de Catálisis (GC-UPTC), Escuela de Ciencias Químicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

² Grupo de investigación en Gestión Administrativa y Empresarial Sostenible (GIGAS), Escuela de Ciencias Administrativas y Económicas, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia

³ Laboratório de Reatores, Cinética e Catalise (RECAT), Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasil

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 25 de junio del 2019

Resumen

Se estudiaron catalizadores de oro (Au) soportados en tres óxidos metálicos diferentes dado que la naturaleza del soporte podría determinar el tipo de sitios activos necesarios para llevar a cabo las reacciones de hidrogenación selectiva de aldehídos α,β -insaturados. La hidrogenación de cinamaldehído se estudió como la reacción de prueba. El cinamaldehído tiene dos posibilidades de adsorción (vertical y planar), así que si existen especies de oro cargadas, pueda verse el efecto de una adsorción preferencial. Los resultados sugieren que la presencia de partículas intermedias (~5,7 nm) y la existencia de sitios de Au^{δ-} son necesarias para incrementar la selectividad hacia la reducción del enlace C=O. Esto se observó preferencialmente en el catalizador de Au/SiO₂. En el caso de Au/Fe₂O₃ y Au/TiO₂, en los cuales es posible otro tipo de interacciones metal-soporte, la selectividad decreció probablemente como consecuencia de la adsorción del cinamaldehído en forma vertical y planar, ocasionada por la presencia de partículas de Au^o de tamaños de ~9,8 nm y ~4,5 nm, respectivamente

Palabras clave: Alcohol cinamílico; Oro; Cinamaldehído; Hidrogenación; Catalizadores.

Cinnamyl alcohol production from selective hydrogenation of cinnamaldehyde using golden catalysts supported on metallic oxides

Abstract

We studied gold catalysts supported on three different metallic oxides as the nature of the support could determine the type of active sites needed to carry out the selective hydrogenation reactions of α,β -unsaturated aldehydes. The hydrogenation of cinnamaldehyde was studied as reaction test. The cinnamaldehyde has two preferential adsorption possibilities (vertical atop and planar) and, therefore, if there are charged gold species, the preferential adsorption may be detected. The results suggested that the presence of intermediates particles (~5,7 nm) and Au^{δ-} sites can be necessary to increase the selectivity towards the reduction of the C=O group. This behavior was preferentially seen on the Au/SiO₂ catalyst. In the Au/Fe₂O₃ and Au/TiO₂ catalysts, where other metal-support interactions are possible, the selectivity decreased possibly due to the adsorption modes of cinnamaldehyde in planar and vertical atop geometry, which may be explained by the size of the Au^o particles: ~9,8 nm and ~4,5 nm, respectively.

Key words: Cinnamyl alcohol; Golden; cinnamaldehyde; Hydrogenation; Catalysts.

Introducción

La reacción de hidrogenación selectiva de aldehídos α,β insaturados para la obtención de alcoholes α,β insaturados es una de las rutas más eficientes, ya que estos alcoholes son importantes intermediarios en la síntesis de fragancias, productos farmacéuticos que, en general, tienen mayor valor agregado (Durndell, *et al.*, 2015). Esta reacción ha planteado los mayores retos en la catálisis heterogénea,

debido, principalmente, a la dificultad para controlar la selectividad. Los aldehídos α,β -insaturados contienen los grupos olefínico (C=C) y carbonilo (C=O), sin embargo,

*Correspondencia:

Hugo Alfonso Rojas Sarmiento; hugo.rojas@uptc.edu.co

Recibido: 7 de marzo de 2019

Aceptado: 8 de abril de 2019

Editor: Luis Fernando Echeverri

por lo general, la hidrogenación de un grupo C=C es termodinámicamente favorecida y ocurre preferencialmente, en comparación con la reducción del grupo C=O (Martínez, *et al.*, 2012). Se justifica así el interés científico en la hidrogenación selectiva del cinamaldehído, un aldehído insaturado, en la cual la reducción única y preferencial del grupo C=O sin hidrogenar el doble enlace olefínico constituye un reto. Además, existe interés industrial y económico en su producto de hidrogenación, el alcohol cinámico. Este alcohol es un ingrediente indispensable del medicamento contra el cáncer taxol y el antibiótico cloromicetina. También es un intermediario esencial para la síntesis de compuestos utilizados en la industria de aromas (Fahlbusch, *et al.*, 2008).

Los catalizadores comúnmente utilizados para la hidrogenación selectiva de cinamaldehído son los sistemas basados en metales nobles y de transición, entre los cuales se han investigado ampliamente los catalizadores basados en Pt y Pd (Wu, *et al.*, 2016). Así mismo, se ha desarrollado una variedad de catalizadores metálicos heterogéneos para controlar selectivamente la reacción por medio de aleaciones, modificación de ligandos y optimización de soportes (Jiang, *et al.*, 2014; Gengatharan, *et al.*, 2016). Sin embargo, suele ser difícil alcanzar la selectividad satisfactoria para obtener el alcohol cinámico deseado, ya que se producen aldehídos saturados e, incluso, alcoholes saturados como producto principal, en lugar del alcohol α,β insaturado. Se ha demostrado que los catalizadores del oro hidrogenan selectivamente el grupo C=O en aldehídos α,β -insaturados. Por ejemplo, los catalizadores de Au/ZnO y Au/CeO₂ son efectivos para la hidrogenación de crotonaldehído a alcohol crofílico y de acroleína a alcohol alílico, respectivamente, con altos niveles de selectividad hacia los correspondientes alcoholes α,β -insaturados (Baillie, *et al.*, 2001; Boutonnet, *et al.*, 2008). La selectividad de los alcoholes insaturados está íntimamente relacionada con el tamaño de las partículas de Au y la naturaleza del soporte de óxido.

El efecto del tamaño de las partículas de los catalizadores de Au en la selectividad hacia el alcohol insaturado se ha estudiado ampliamente, sin embargo, los resultados han sido controversiales. En un estudio, por ejemplo, la selectividad en la hidrogenación de acroleína hacia el alcohol alílico con catalizadores de Au/TiO₂ y Au/ZrO₂ aumentó al incrementar el tamaño de las partículas de Au en el rango de 1,1 a 5,3 nm, no obstante, la selectividad de la hidrogenación de crotonaldehído hacia el alcohol crofílico (60–70 %) usando el catalizador de Au/TiO₂ ocurrió independientemente del tamaño de las partículas de Au en el rango de 1,7–8,7 nm (Zanella, *et al.*, 2004). Ello podría deberse a la amplia distribución de tamaño de las partículas de Au al dispersarse sobre los soportes con el empleo de técnicas de preparación convencionales, tales como la deposición-precipitación, la coprecipitación y la impregnación, a partir de átomos de Au aislados, grupos de Au (<2 nm), y partículas pequeñas (2–5 nm) y grandes (> 5 nm).

Se han realizado grandes esfuerzos para aumentar la actividad catalítica del oro, por ejemplo, adicionando un metal más activo a sus catalizadores. Estos catalizadores modificados pueden mostrar características catalíticas inesperadas. Por ejemplo, Xu, *et al.*, (2011) evidenciaron que la actividad de Au/SiO₂ mejoró notablemente (1-2 órdenes de magnitud) después de que se impregnó con una pequeña cantidad de Pt. Sin embargo, la propensión selectiva de nanopartículas de Au favorece la hidrogenación del C=C con respecto al enlace C=O (21 % de selectividad hacia la hidrogenación del enlace C=O para el cinamaldehído).

La actividad catalítica también puede mejorarse reduciendo el tamaño de las nanopartículas de Au. Se encontró que la actividad por sitio (*Turn Over Number*, TOF) de la hidrogenación sobre Au/TiO₂ aumentó significativamente cuando el tamaño de las partículas de Au disminuyó de 8,7 a 1,7 nm. El TOF más alto exhibido por las partículas de Au más pequeñas puede asociarse con una mayor capacidad para activar o disociar el hidrógeno (Bus, *et al.*, 2005). Sin embargo, la selectividad hacia el alcohol insaturado puede aumentar a medida que aumenta el tamaño de las partículas de Au. Este efecto se demostró mediante la calcinación del 5 % de peso del Au/ZnO entre 523 y 673 K, en la que la selectividad del alcohol crofílico aumentó dramáticamente (de 54 a 81 %) con el aumento del tamaño de partícula de Au (Baillie, *et al.*, 2001). Por otro lado, se ha investigado menos sobre el efecto del soporte en la selectividad de alcoholes insaturados con catalizadores de Au.

En cuanto a los soportes para catalizadores metálicos, la sílice es uno de los más utilizados para la fase líquida. Este óxido es un candidato ideal para la preparación de catalizadores de alta dispersión debido a sus ventajas únicas frente a los soportes convencionales: (i) el área superficial y el volumen de poros facilitan la adsorción y la dispersión del precursor metálico; (ii) la porosidad intrínseca proporciona más acceso al sitio activo para el sustrato, y (iii) las propiedades síliceas inactivas lo convierten en un soporte ideal para investigar la interacción entre componentes activos, con menos interrupción causada por la interacción metal-soporte. El catalizador de Pt soportado en óxidos mixtos ácidos, como SiO₂-ZrO₂ (Ji, *et al.*, 2014), facilita la hidrogenación de los grupos C=O en aldehídos α,β -insaturados. Los compuestos mesoporosos Al₂O₃@SBA-15, con una capa delgada de alúmina amorfa recubierta sobre una superficie de SBA-15 como un tipo de óxido compuesto especial, no solo retienen la estructura mesoporosa de la sílice SBA-15, sino que introducen un gran número de sitios ácidos de Lewis de Al₂O₃. Además, debido a la interacción de alúmina y sílice en la interfaz, también se forma un pequeño número de sitios ácidos de Brønsted en los compuestos Al₂O₃@SBA-15 correspondientes. Las propiedades de los compuestos Al₂O₃@SBA-15 son beneficiosas para la interacción del metal y el soporte y, por lo tanto, modulan las propiedades electrónicas de las nanopartículas metálicas cuando se usan como soporte para ellos (Li, *et al.*, 2014).

Jin, et al. (2010) observaron que los cúmulos de Au soportados en Fe_2O_3 y TiO_2 catalizaron la hidrogenación selectiva de compuestos de carbonilo insaturados a alcoholes insaturados a través de la coordinación del grupo $\text{C}=\text{O}$ con los sitios “huecos” de los cúmulos de Au. Se ha demostrado la capacidad catalítica de las nanopartículas de Au bien estabilizadas con tiolato para la hidrogenación quimioselectiva de cetonas (benzalcetona) y aldehídos α,β -insaturados (crotonaldehído) hacia alcoholes insaturados con selectividad completa (100 %) (excepto el crotonaldehído, con 91 % de selectividad para alcohol alílico). **Li, et al.**, encontraron que el sistema Au/ TiO_2 catalizó la hidrogenación selectiva de cinamaldehído a alcohol cinamílico con una selectividad del 83 % y el dopaje de Au/ TiO_2 con Ir mejoró la conversión de cinamaldehído sin la pérdida de selectividad hacia el alcohol cinamílico (**Li, et al.**, 2014). Se encontró que tanto el Au/ TiO_2 como el Au-Ir/ TiO_2 fueron capaces de catalizar la hidrogenación de cinamaldehído a alcohol cinamílico con altas selectividades (83 %). Sin embargo, la velocidad de hidrogenación de Au-Ir/ TiO_2 fue cinco veces mayor que la de Au/ TiO_2 . La gran actividad del catalizador de Au-Ir/ TiO_2 podría atribuirse a la capacidad de activación de H_2 promovida por el Au como resultado de la fuerte interacción entre Au e Ir en la aleación de Au-Ir superficial y la transferencia de electrones de Ir a Au. La alta selectividad hacia el alcohol insaturado podría atribuirse principalmente a la interacción mejorada entre los sitios de Au enriquecidos en carga y el carbono del grupo carbonilo deficiente en carga, así como a la interacción entre los átomos de Ir electropositivos y el oxígeno de carbonilo electrófilo (**Li, et al.**, 2014).

La formación del alcohol cinamílico se ve afectada por el tamaño de las partículas metálicas, tal como se mencionó anteriormente, y puede atribuirse a una configuración estérica producto de la acción del aldehído y la zona superficial metálica. Si se utilizan catalizadores con morfología plana puede evitarse la adsorción del enlace olefínico ($\text{C}=\text{C}$) y beneficiar la adsorción del enlace carbonilo $\text{C}=\text{O}$, situación que podría no darse si se emplean fases metálicas de pequeño tamaño (**Gallezot & Richard**, 1998). **Milone, et al.** (2004) reportaron que la hidrogenación de cinamaldehído sobre los catalizadores de Au/ Fe_2O_3 permitió alcanzar una selectividad hacia el alcohol cinamílico hasta de 85 % con un 100 % de conversión. Este aumento en la selectividad hacia el alcohol insaturado en Au/ Fe_2O_3 se explicó por la acción de los sitios de hierro en la superficie como promotores, que activan el enlace $\text{C}=\text{O}$ del aldehído α,β -insaturado, y a una posible modificación de las propiedades electrónicas del metal. Sin embargo, el efecto promotor de las especies de hierro en los catalizadores de oro aún no ha sido totalmente esclarecido. **Lenz, et al.** (2009) concluyeron que: (i) la reducibilidad de las especies de hierro no está relacionada con el efecto promotor del hierro en los catalizadores de oro; (ii) el tamaño de partícula no tiene un efecto sustancial en el desempeño catalítico de los sistemas de oro soportados

en óxidos de hierro, y (iii) las especies de hierro no son responsables por la estabilización de otras especies distintas a las de Au metálico. Sin embargo, también se ha demostrado que la hidrogenación del $\text{C}=\text{O}$ en el cinamaldehído con el sistema Au/ SiO_2 se debe a especies de $\text{Au}^{\delta-}$ localizadas sobre la superficie de la fase activa (Au) y su presencia puede ayudar en otros aspectos del fenómeno de la adsorción y la molécula (cinamaldehído) (**Rojas, et al.**, 2012). Esta clase de especies en los sistemas de oro deberían explicar la actividad de Au/ Fe_2O_3 , lo que contradiría los resultados encontrados por **Lenz, et al.** (2009). La densidad electrónica adicional de los sitios $\text{Au}^{\delta-}$ puede favorecer que el oro actúe como un catalizador de hidrogenación (**Wang & Andrews**, 2003); este tipo de sitios de oro parcialmente cargados en forma negativa ($\text{Au}^{\delta-}$) están presentes en catalizadores que se someten a tratamiento con flujo de hidrógeno (**Rojas, et al.**, 2012; **Chakarova, et al.**, 2011), para soportes tanto reducibles como no reducibles (**Cardenas-Lizana, et al.**, 2011).

Para estudiar el efecto de las especies de $\text{Au}^{\delta-}$ en distintos soportes deben prepararse sólidos con similares tamaños de partícula y estudiar su comportamiento en la hidrogenación de una molécula que presente solo dos posibilidades de adsorción, tal como el caso del cinamaldehído. Con base en cálculos teóricos realizados por **Delbecq & Sautet** (2002) y en análisis experimentales, se ha establecido que el cinamaldehído se puede adsorber en los catalizadores mediante dos formas competitivas: una geometría planar a través del doble enlace $\text{C}=\text{C}$ y la otra a través de una geometría vertical por el grupo $\text{C}=\text{O}$ (**Breen, et al.**, 2004). Estos autores encontraron que el modo de adsorción vertical conduce a la formación de alcoholes insaturados (alcohol cinamílico). Sin embargo, sus cálculos mostraron que este modo de adsorción resulta ligeramente menos favorecido que el modo planar, lo que explicaría por qué el enlace $\text{C}=\text{C}$ es más fácil de hidrogenar para formar hidroxycinamaldehído. Cada uno de estos modos de adsorción está relacionado con el grado de cubrimiento de la superficie. Por ejemplo, a medida que avanza la reacción se forman el alcohol cinamílico e hidroxycinamaldehído, y estos productos se pueden adsorber competitivamente con el cinamaldehído. Por lo tanto, el cubrimiento de la superficie es alto (se han encontrado órdenes de reacción cero con respecto al cinamaldehído), por lo que la adsorción de nuevas moléculas está estrictamente limitada a las geometrías verticales. Este comportamiento se ha visto confirmado por el hecho de que el alcohol cinamílico no se reduce para producir fenilpropanol, en tanto que el hidroxycinamaldehído se reduce para formar fenilpropanol. De esta forma, la selectividad hacia el alcohol insaturado va aumentando.

Esto significa que el soporte, el metal, el tamaño de partícula o la adición de un segundo metal en los catalizadores influyen en la hidrogenación selectiva del cinamaldehído de manera combinada. El mejoramiento en el rendimiento catalítico para el catalizador de Au soportado por un solo factor parece muy limitada. Se deben adoptar dos

o más estrategias para lograr mejores resultados, incluida la actividad y la selectividad para el alcohol cinámico. Por lo tanto, el presente trabajo evaluó el uso de catalizadores de Au soportados en Fe_2O_3 , TiO_2 y SiO_2 en la producción de alcohol cinámico a partir de la hidrogenación de cinamaldehído. Se estudió la naturaleza del soporte y los diferentes tipos de interacciones metal-soporte (morfológicas y electrónicas), con el fin de encontrar el catalizador de mejor desempeño en la reacción.

Materiales y métodos

Los soportes usados para preparar los catalizadores fueron TiO_2 (Degussa P-25 (Evonik)), sílice comercial (Syloid® 266 Grace Davidson). Se usó HAuCl_4 (Aldrich >99 %) como precursor metálico. También se utilizaron los siguientes reactivos: $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$ (JT Baker, 37 %), $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Sigma-Aldrich >98 %), cinamaldehído (Sigma-Aldrich >98 %), etanol (JT Baker®).

Preparación de los catalizadores. El catalizador Au/ SiO_2 se obtuvo mediante el método de depósito-precipitación usando $\text{NH}_3\text{H}_2\text{O}$ (Kirichenko, *et al.*, 2010). Se preparó una solución de HAuCl_4 para obtener una concentración de metal al 1 % y se añadió al soporte. Posteriormente, el sólido fue agitado durante 2,5 horas, se mantuvo a 353 K y después se enfrió hasta los 303 K (Martínez, J.J., 2012). A continuación se agregó gota a gota una solución de $\text{NH}_3\cdot \text{H}_2\text{O}$ (1M) a la mezcla y se dejó en reposo durante 3 horas. Luego se efectuó una centrifugación y se hicieron lavados sucesivos con agua desionizada y, por último, el sólido se secó a una temperatura de 373 K.

El sistema Au/ TiO_2 se sintetizó mediante el procedimiento de depósito-precipitación con urea (Zanella, *et al.*, 2002). Se pesó 1 g de TiO_2 y se mezcló con 100 mL de una solución de HAuCl_4 ($1,27 \times 10^{-3}$ M) y urea (0,66 M). La suspensión se dejó a 353 K y se agitó durante 16 horas. Después, la muestra se lavó con agua, se centrifugó, se secó y, posteriormente, se calcinó a 673 K.

El catalizador Au/ Fe_2O_3 se preparó siguiendo el procedimiento de coprecipitación. Para ello se mezclaron soluciones de HAuCl_4 y $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ sobre una solución acuosa de Na_2CO_3 (1 M) (pH 7-8) y se mantuvo a 333 K bajo agitación vigorosa durante toda la noche; posteriormente, se lavaron con agua y la muestra se secó a una temperatura de 373 K (Martínez, J.J., 2012). Todas las muestras se calcinaron a 673 K durante 2 horas utilizando un flujo continuo de aire de 35 mL/min.

Técnicas de caracterización. La cantidad de oro en las muestras se determinó por espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (*energy-dispersive X-ray spectroscopy*, EDS). La medición se hizo bajo condiciones de vacío usando un espectrómetro Shimadzu EDX-720 con tubo de rayos X de Rh. Las muestras en polvo se colocaron en una celda de polietileno y se cubrieron con una película de polipropileno. Cada muestra se analizó cinco veces.

Los análisis por difracción de rayos X se hicieron en un equipo Rigaku Miniflex II con radiación $\text{K}\alpha$ de Cu, cuya

longitud de onda es de 1,5405 angstroms. Los difractogramas se hicieron en un rango de 2θ de 10–90° usando un tiempo de conteo de 1 segundo y un tamaño de paso de 0,05°. Las pruebas a los catalizadores calcinados se hicieron a temperatura ambiente siguiendo el método en polvo.

Se hicieron análisis de reducción en la temperatura programada de hidrógeno (TPR- H_2) en una unidad multipropósito (AutoChemII 2920, micromeritics®) acoplada a un espectrómetro de masas (Thermo Star™). Los catalizadores se secaron a 423 K con He (30 mL/min) durante 30 minutos, se enfriaron hasta temperatura ambiente y se cambió el gas (10%, H_2/Ar) para posteriormente incrementar la temperatura hasta 773 K (10 K/min), y se obtuvo el perfil de TPR- H_2 .

Los análisis de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (*X-ray photoelectron spectroscopy*, XPS) se hicieron en un equipo Escalab™ 250 XI (Thermo Scientific™), con ánodo de Al (energía de 1486,8 eV). El analizador se trabajó con una energía en paso de 25 eV y un tamaño de paso de 0,05 eV. La presión en la cámara de análisis fue de $6,3 \times 10^{-9}$ MPa. Todas las energías de enlace se calibraron con respecto a la señal de carbono en 284,6 eV.

Las mediciones de desorción de NH_3 a la temperatura programada (TPD- NH_3) se hicieron en un equipo Auto-ChemII 2920 (micromeritics®). Antes de los análisis, las muestras se secaron a 423 K con He (25 mL/min) durante 1 hora y luego se redujeron con H_2 (25 mL/min) a 573 K durante 2 horas. Después las muestras se purgaron con He a 573 K durante 30 minutos y luego se enfriaron a 343 K para adsorber NH_3 mediante una mezcla de 10 % de NH_3/He (50 mL/min) durante 30 minutos. Las muestras se limpiaron con un flujo de He de 25 mL/min durante 1 hora para eliminar el exceso de NH_3 . Luego, se pasó un flujo constante de He de 343 K a 1173 K a una velocidad de calentamiento de 10 K/min para obtener el perfil de TPD.

La espectroscopia de reflectancia difusa con transformada de Fourier en la región del infrarrojo de piridina (DRIFTS-Pyr) se llevó a cabo en un equipo Nicolet™ iS50 (Thermo Scientific™). El sistema consistió en un espectrómetro FTIR equipado con una celda de reflectancia difusa (Harrick, HVC-DRP-4, Praying Mantis™). Los catalizadores se secaron a 423 K en flujo de He (15 mL/min) durante 1 hora, se enfriaron a temperatura ambiente y se redujeron a 573 K bajo un flujo de H_2 (30 mL/min) durante 2 horas. Después de la etapa de reducción, las muestras se purgaron con He (25 mL/min) durante 30 minutos, se enfriaron a temperatura ambiente y a esta temperatura se recogió un interferograma de referencia. Posteriormente, se pasó la piridina y se mantuvo durante 1 hora. Después de la adsorción de piridina, el catalizador se purgó con flujo de He (20 mL/min) y luego se tomó un nuevo interferograma a temperatura ambiente y se relacionó con la referencia para obtener el espectro de piridina adsorbida.

Evaluación catalítica. Las pruebas catalíticas se realizaron en un reactor por lotes y antes de las reacciones los catalizadores se redujeron a 573 K con flujo de hidrógeno

(50 mL/min) durante 2 horas. Posteriormente, se depositó el catalizador en el reactor y se hizo una purga con He y se pasó H₂ (35 mL/min) a una temperatura de 364 K durante media hora y se limpió nuevamente con helio. Se preparó una solución de cinamaldehído (0,1 M) con etanol como solvente. El reactor se presurizó con hidrógeno a 0,62 MPa y la reacción se llevó a cabo a una temperatura de 363 K. En cada reacción se emplearon 0,2 g de catalizador y una agitación de 1.000 rpm. Las reacciones se siguieron durante 7 horas tomando muestras a intervalos de 1 hora. Los reactivos y productos se analizaron mediante cromatografía de gases (Varian GC 3800, Agilent) provisto con columna capilar β-Dex y un detector de ionización de llama (FID) (Martínez, 2012). Las temperaturas del inyector y el detector fueron 473 K y 493 K, respectivamente. La temperatura de la columna se incrementó de 363 K hasta 443 K utilizando una rampa de calentamiento de 10 K/min. Los productos se identificaron mediante el uso de patrones.

Resultados y discusión

La cantidad de oro determinada mediante la EDS en los catalizadores se presenta en la Tabla 1. El método de depósito-precipitación con NH₃H₂O empleado para Au/SiO₂ mostró una eficiencia alta para la deposición de oro (cerca del 90 %) sobre la superficie de la sílice, tal como lo han indicado previamente Kirichenko, *et al.* (2010) y Somodi, *et al.* (2008). Asimismo, los resultados de depósito-precipitación con urea permitieron alcanzar una deposición de partículas de oro cercana a la nominal. Los resultados del contenido de oro metálico para Au/Fe₂O₃ demostraron que la coprecipitación es un método adecuado para preparar este tipo de sistemas.

Los difractogramas de rayos X de los sistemas calcinados se presentan en la Figura S1, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/852/2543>. El sistema Au/SiO₂ mostró una señal ancha típica de la sílice amorfa en torno a 2θ = 22°. El sistema Au/Fe₂O₃ presentó varios picos en 2θ = 33,2°, 35,7°, 40,9°, 49,4°, 54,2°, 57,5°, 62,7° y 64,1°, los cuales corresponden a la fase hematita (Fe₂O₃). El difractograma del sistema Au/TiO₂ evidenció picos característicos de anatasa y de rutilo en proporciones de 70 y 30 %, respectivamente, los cuales se mantuvieron en el proceso de deposición del oro. Además de las señales de los soportes, en todos los catalizadores se observaron

picos relacionados con la presencia del oro en 2θ = 38,2°, 44,6°, 64,6° y 77,5°, los cuales corresponden a los planos cristalinos (111), (200), (220) y (311). Utilizando los cálculos de Scherrer, se calculó el tamaño de partícula del oro (111), datos que se presentan en la Tabla 1. El catalizador de Au/TiO₂ presentó el menor tamaño de partícula (4,5 nm), en tanto que en el sistema Au/Fe₂O₃ las partículas de oro fueron de un tamaño más grande (9,8 nm).

El comportamiento de reducción de los catalizadores de oro soportados se presenta en la Figura S2, <https://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/852/2544>. El sistema Au/SiO₂ evidenció un pico de reducción de alrededor de 380 K, el cual está asociado con la reducción del óxido de oro. Este mismo pico se observó en la muestra de Au/TiO₂, sin embargo, la reducción del óxido de oro a oro metálico estuvo en torno a los 373 K. No se observaron más señales en este catalizador. En el catalizador Au/Fe₂O₃, la reducción del oro estuvo representada por una pequeña señal a los 400 K. Este incremento en la temperatura de reducción a oro metálico podría indicar alguna interacción entre el oro y Fe₂O₃ (Venugopal & Scurrall, 2004; Rojas, *et al.*, 2012). Los otros picos de reducción en Au/Fe₂O₃ se relacionaron con la reducción de especies del óxido de hierro; el primero a 523 K, el segundo a alrededor de 582 K, y otro con una señal más intensa en temperaturas superiores a 700 K. Las señales de reducción a temperaturas inferiores a 500 K se pueden atribuir a la reducción de diversas especies de hierro. La reducción del Fe₂O₃ sigue las siguientes etapas Fe₂O₃ → Fe₃O₄ → FeO → Fe. La primera reducción sucede en torno a los 623 K y la última cerca de los 900 K (Brijaldo, *et al.*, 2015). Por ello, la señal a los 523 K se puede atribuir a la reducción de hematita a magnetita (Fe₂O₃ → Fe₃O₄), la cual ocurre a una menor temperatura en presencia de oro y probablemente se relacione con un posible efecto *spillover* de H₂, que ocurre por la caída de H₂ del oro sobre el soporte (Martínez, J.J., 2012; Reyes, *et al.*, 2003).

La Figura 1 muestra el espectro de espectroscopia electrónica de rayos X en la región de Au 4f_{7/2}. El pico de Au 4f se caracteriza por el doblete de los componentes de giro (*spin*) de Au 4f_{7/2} y Au 4f_{5/2}. Los valores de la energía de enlace del pico de Au 4f_{7/2} sugieren el estado de oxidación del oro. En los sistemas Au/TiO₂ y Au/Fe₂O₃ la energía de enlace de 83,9 eV es característica de Au⁰ (Visco, *et al.*, 1999). Visco, *et al.*,

Tabla 1. Contenido experimental de Au de los catalizadores, tamaño de partícula (t_p) calculado mediante DRX y energías de enlace y relación atómica (metal/soporte) calculadas mediante XPS

Catalizador	% Au	T _p Au (nm)	TPD-NH ₃ (μmol NH ₃ /g _{cat})	XPS		
				Energía de enlace (eV) Au 4f _{7/2}	Au/S S: Fe, Si, Ti	Energía de enlace (eV) soporte
Au/Fe ₂ O ₃	0,87 (±0,01)	9,8	3,15	Au ⁰ : 83,9	0,0084	Fe2p _{3/2} : 710,08
Au/SiO ₂	0,94 (±0,02)	5,7	5,36	Au ^δ : 83,2	0,0016	Si2p _{1/2} : 104,08
Au/TiO ₂	0,89 (±0,01)	4,5	8,30	Au ⁰ : 83,9	0,0077	Ti2p _{1/2} : 460,08

(1999) obtuvieron resultados similares en sistemas de Au/Fe₂O₃ obtenidos por coprecipitación y posterior tratamiento con hidrógeno a 573 K en H₂. El espectro de Au/SiO₂ presentó una contribución de Au 4f_{7/2} en 83,2 eV. Un menor valor de energía de enlace se ha asociado con la formación de partículas cargadas negativamente (Au^{δ-}). Radnik, *et al.*, (2003) encontraron una contribución semejante, de 83,2 eV, en sistemas de Au/SiO₂ preparados por deposición química de vapor. La transferencia electrónica no consigue explicar la baja energía de enlace del oro 4f_{7/2}, dado que la sílice es un óxido no reducible. Para evaluar la exposición de la fase activa en la superficie, se calcularon las relaciones atómicas superficiales de Au/Fe, Au/Ti y Au/Si.

Las relaciones atómicas superficiales de los catalizadores se resumen en la Tabla 1. Las relaciones atómicas de Au/Fe y Au/Ti fueron más altas que las de Au/Si. Este comportamiento indica que los catalizadores de Au/Fe₂O₃ y Au/TiO₂ tienen una mayor exposición de la fase activa en la superficie del soporte, en comparación con el catalizador de Au/SiO₂.

La fuerza de los sitios ácidos de los catalizadores de oro se determinó mediante TPD-NH₃. En la Figura 2 se presentan los perfiles TPD-NH₃ de los catalizadores y los valores de acidez expresados como cantidad de NH₃ absorbido por masa de catalizador, en la Tabla 1. Por lo general, la fuerza de los sitios ácidos se clasifica dependiendo de la temperatura en que aparecen los picos de desorción como sigue: débil (<473 K), media (473 y 673 K) y fuerte (> 673 K). También se pueden correlacionar con sitios ácidos de Lewis (por debajo de 673 K) y sitios ácidos de Brønsted (por encima de 673 K) (Iriondo, *et al.*, 2017). Por lo tanto, al analizar los perfiles de TPD-NH₃ se encontró que los catalizadores de Au/SiO₂ y Au/Fe₂O₃ presentaban algunas señales correspondientes a sitios débiles y, en su gran mayoría, a sitios ácidos fuertes, en tanto que el sistema de Au/TiO₂ presentó únicamente picos relacionados con sitios ácidos débiles. En todos los catalizadores estudiados la contribución de los sitios ácidos de fuerza intermedia fue escasa.

La naturaleza de los sitios ácidos superficiales se determinó mediante espectroscopia infrarroja de reflectancia difusa a temperatura ambiente. La Figura 3 muestra los espectros DRIFTS de piridina adsorbida en catalizadores de oro en el rango de 1.400 a 1.750 cm⁻¹. Las bandas características a 1.540 y 1.614 cm⁻¹ están asociadas con la piridina adsorbida en los sitios ácidos de Brønsted (BPy), mientras que las bandas asociadas con la piridina en los sitios ácidos de Lewis aparecen en los 1.445 y 1.604 cm⁻¹ (LPy) (Zhou, *et al.*, 2016). Los catalizadores de Au/TiO₂ y Au/Fe₂O₃ presentaron las bandas de los sitios ácidos de Lewis (1.445 y 1.604 cm⁻¹), en tanto que el sistema de Au/SiO₂ presentó solo una banda de sitios ácidos de Lewis (1.445 cm⁻¹). Los catalizadores de Au/SiO₂ y Au/Fe₂O₃ exhibieron pequeñas bandas en 1.614 y 1.540 cm⁻¹, respectivamente, relacionadas con sitios ácidos de Brønsted. Este comportamiento concuerda con los resultados obtenidos

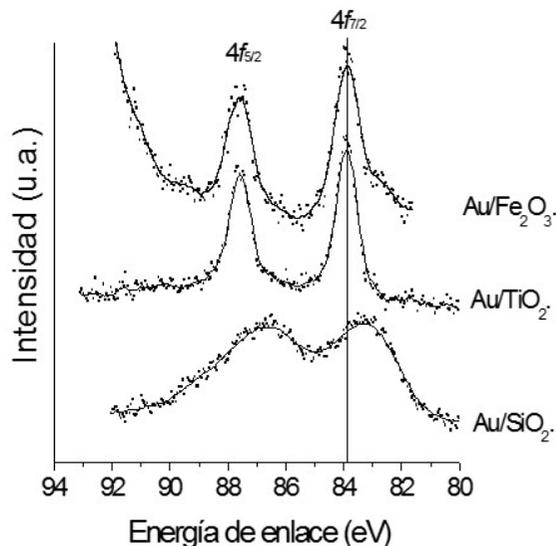


Figura 1. Espectro XPS en la región de Au 4f_{7/2} para los catalizadores de oro soportados

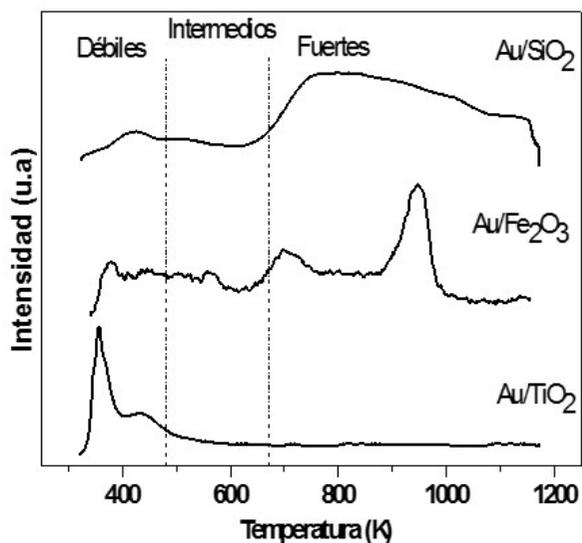


Figura 2. Perfiles de TPD-NH₃ de los catalizadores de Au soportados

en los análisis de TPD-NH₃, en los cuales estos catalizadores presentaron picos de desorción en temperaturas superiores a los 673 K. Tanto el catalizador de Au/TiO₂ como el de Au/SiO₂ presentaron bandas relacionadas con los sitios ácidos de Lewis y de Brønsted simultáneamente (1.490 cm⁻¹: L+B). Todos los catalizadores mostraron una banda a 1.575 cm⁻¹ que corresponde a la piridina (PPy) residual absorbida físicamente, así como una banda de piridina unida a hidrógeno (HPy) a 1.590 cm⁻¹, que se pueden asignar a grupos OH de puente y multicéntricos como lo observaron Zaki, *et al.* (2014).

Actividad catalítica. Para analizar detalladamente el comportamiento catalítico se determinaron las constantes de velocidad (k_g) asumiendo una reacción de pseudo primer

orden y los resultados se presentan en la Tabla 2. Mediante la gráfica de $-\ln(1-\alpha/100)$ versus el tiempo de reacción (Figura 4), donde α corresponde a la conversión porcentual, se observó que el orden de las constantes k_g correspondía a $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Au}/\text{SiO}_2 > \text{Au}/\text{TiO}_2$. Este comportamiento sugiere que el catalizador $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ presentó una mayor transformación de cinamaldehído durante el tiempo de reacción.

En la Figura 5 se presenta el nivel de conversión en la hidrogenación selectiva del cinamaldehído con los sistemas de oro soportado. Se observó que los resultados de Au/SiO_2 y Au/TiO_2 fueron próximos, cerca de 18 y 15 %, respectivamente. El catalizador de $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ alcanzó la mayor conversión de cinamaldehído a las 7 horas de reacción (30 %). Este comportamiento coincide con la tendencia obtenida en la determinación de las constantes de velocidad mostradas en la Figura 6. El orden detectado en la conversión de cinamaldehído puede relacionarse inversamente con la acidez total de los catalizadores. Es decir, aquellos sistemas que presentaron menor acidez ($\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ y Au/SiO_2) fueron los que tuvieron mejor desempeño en la transformación del aldehído α,β -insaturado.

En contraste, Lin, *et al.*, (2018) prepararon catalizadores Ir soportados en hidrotalcitas $\text{Mg}_3\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x$ que contenían especies de Fe y Al en cantidades variables. Estos catalizadores Ir se usaron en la hidrogenación selectiva de cinamaldehído. Cuando x era de 0,25, la velocidad de reacción alcanzó su máximo y en la selectividad hacia el alcohol cinámico fue del 80,3 %. Este comportamiento se vio influenciado por la transferencia de electrones de Fe^{2+} en el soporte $\text{Mg}_3\text{Al}_{1-x}\text{Fe}_x$ a las partículas de Ir dispersadas. La presencia de especies Fe^{n+} cercanas al Ir también ayudó a facilitar la adsorción e hidrogenación del enlace $\text{C}=\text{O}$ del cinamaldehído. Sin embargo, algunos sitios activos de Ir fueron cubiertos por exceso de especies de Fe. Por lo tanto, la actividad fue máxima al alcanzar una cierta cantidad de especies cargadas de Fe.

Para evaluar únicamente la incidencia del soporte en la reacción de hidrogenación del cinamaldehído, se efectuaron reacciones con los soportes (Fe_2O_3 , SiO_2 y TiO_2) bajo las mismas condiciones de sus respectivos sistemas catalíticos y se encontraron menores niveles de conversión del cinamaldehído: el Fe_2O_3 fue el soporte con mayor actividad, presentando una conversión de alrededor de 6 % a las 7 horas de reacción, en tanto que el SiO_2 y el TiO_2 exhibieron un nivel de conversión del 3 y el 2 % al finalizar la reacción. Este comportamiento confirma que las especies Fe^{n+} son activas, sin embargo, en todos los casos es necesaria una asociación con las partículas de oro para que pueda alcanzarse una mayor transformación de cinamaldehído.

Los productos obtenidos en la hidrogenación de cinamaldehído con los catalizadores de oro soportado fueron: alcohol cinámico (COL), hidroxicinamaldehído (HCAL) y fenilpropanol (PPA). El sistema Au/SiO_2 presentó la mayor selectividad hacia el alcohol cinámico, de 79 %, seguido de los catalizadores de $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ y Au/TiO_2 , con

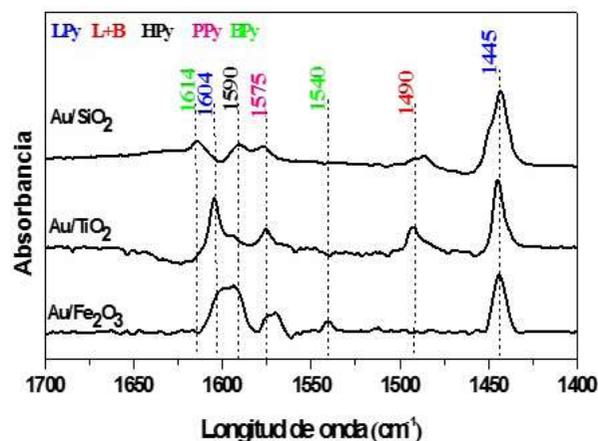


Figura 3. DRIFTS de adsorción de piridina de los catalizadores de Au soportados

Tabla 2. Conversión de cinamaldehído, selectividad de alcohol cinámico a las 7 horas de reacción y constantes de velocidad

Catalizador	Conversión (%)	Constante de velocidad (h^{-1})	Selectividad de alcohol cinámico (%)
$\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$	30	0,047	51
Au/SiO_2	18	0,030	79
Au/TiO_2	15	0,023	40

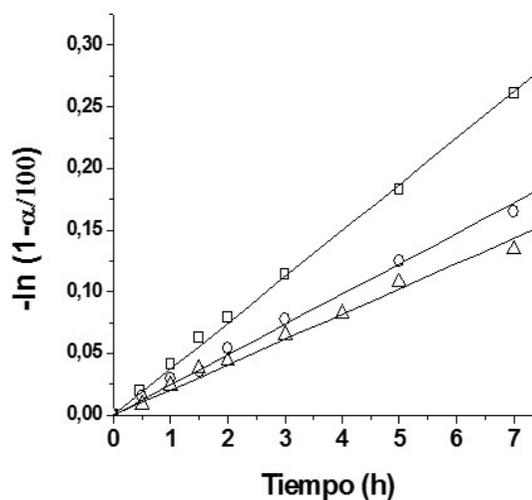


Figura 4. $-\ln(1-\alpha/100)$ relacionado con el tiempo de reacción en la hidrogenación selectiva de cinamaldehído para calcular las constantes de pseudo primer orden. (Δ): Au/TiO_2 ; (\circ): Au/SiO_2 ; (\square): $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$

selectividades de 50 y 47 %, respectivamente. La formación del alcohol cinámico está relacionada, entre otros aspectos, con la presencia de sitios ácidos del tipo de Lewis. Para la reducción del grupo carbonilo, se ha establecido que la fase metálica tiene la función de activar el hidrógeno y los sitios

ácidos de Lewis activan el oxígeno del grupo carbonilo. En este caso, Au^0 disociaría el hidrógeno molecular, y los sitios ácidos de Lewis de los soportes (Fe^{n+} , Ti^{n+} , Si^{n+}) activarían el grupo carbonilo del cinamaldehído, el cual es hidrogenado a alcohol cinámico. Según los resultados obtenidos mediante TPD- NH_3 y DRIFTS-pyr, todos los sistemas presentaron sitios ácidos de Lewis, sin embargo, Au/SiO_2 y $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ exhibieron unas ligeras señales de sitios de Brønsted.

El sistema Au/TiO_2 presentó resultados similares a los encontrados por Milone, *et al.*, (2008), autores que han argumentado que la formación de la cetona saturada y el alcohol insaturado ocurre en sitios Au^0 , sin embargo, evidenciaron la formación de un éter alílico (cinamiletil éter, CEE) formado principalmente en los sitios ácidos del tipo de Lewis, lo que indica que a una conversión del 50 % del sustrato, la formación de CEE se ve favorecida, en tanto que

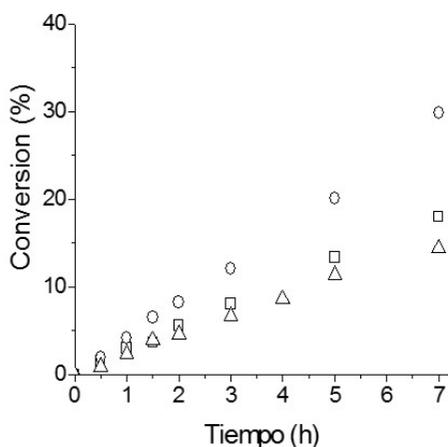


Figura 5. Nivel de conversión del cinamaldehído a lo largo del tiempo de reacción. Condiciones de reacción: temperatura, 363 K; presión parcial de H_2 , 0,62 MPa; masa de catalizador, 0,2 g; concentración de cinamaldehído, 0,1 M. (Δ): Au/TiO_2 ; (\circ): Au/SiO_2 ; (\square): $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$

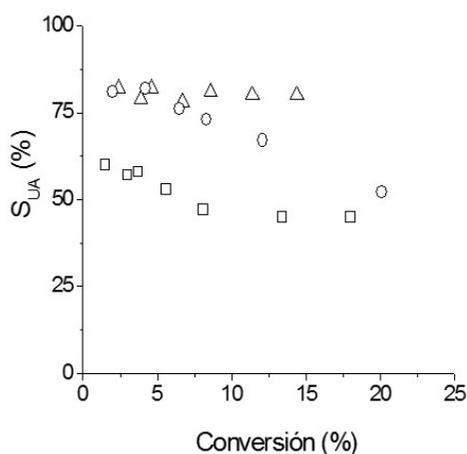


Figura 6. Selectividad (%) hacia el alcohol insaturado (S_{UA}) en función de la conversión de cinamaldehído para (Δ): Au/SiO_2 , (\circ): Au/TiO_2 y (\square): $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$

la selectividad hacia la formación de la cetona saturada y del alcohol insaturado disminuye con este mismo porcentaje de conversión. La formación de CEE no se evidenció en nuestro catalizador Au/TiO_2 , aunque solo se alcanzó una conversión del 15 %, por lo que no puede excluirse la formación de CEE con más altas conversiones de cinamaldehído.

En el catalizador de $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ los sitios Fe^{n+} se comportan como sitios activos interfaciales $\text{Au}-\text{FeO}_x$ que proveen sitios de Lewis adicionales en el sistema. Dichos sitios, combinados con los sitios de oro, se encargan del desempeño catalítico detectado (Martínez, J.J., 2012; Milone, *et al.*, 2007). Las especies Fe^{n+} se han propuesto para favorecer la hidrogenación de grupo $\text{C}=\text{O}$ y, por lo tanto, la generación del alcohol cinámico (Martínez, *et al.*, 2012). Los resultados de selectividad fueron similares a los reportados por Milone, *et al.*, (2007) para la hidrogenación de cinamaldehído sobre $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$, sin embargo, la formación del éter alílico no se evidenció.

Para explicar los resultados obtenidos por Milone, *et al.*, (2008) al utilizar catalizadores de $\text{Au}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ en la reacción de hidrogenación de cinamaldehído, se contemplaron dos aspectos: la morfología de la partícula de oro y la interacción entre el metal y el soporte. Se concluyó que la morfología de las partículas posee poca incidencia en la actividad, sin embargo, tiene gran influencia debido a las propiedades y características del soporte que aparecen por la generación de nanopartículas negativas de Au mediante la transferencia de electrones desde el soporte previamente reducido al metal.

Según Bus, *et al.* (2007), para alcanzar una alta conversión de cinamaldehído y la selectividad hacia el alcohol cinámico es deseable tener nanopartículas de oro con tamaños inferiores a 2 nm. Por lo tanto, el tamaño de las partículas podría considerarse un aspecto importante en la actividad catalítica. En el presente estudio el comportamiento de la actividad exhibida por el catalizador Au/SiO_2 tendría que explicarse teniendo en cuenta un tamaño de partícula promedio mayor de 4 nm. Si bien este argumento ayuda a explicar el bajo nivel de conversión del catalizador Au/SiO_2 , no explica del todo la alta selectividad exhibida hacia el alcohol cinámico, tal como sucedió en este sistema. Por ser el SiO_2 un soporte que no experimenta reducción a la temperatura en que fue reducido el catalizador, la interacción metal-soporte no aplica, como sí sucedió en el caso del Fe_2O_3 .

En otros estudios se ha evidenciado el desempeño favorable del Fe_2O_3 en la formación del alcohol cinámico. Por ejemplo, Pan, *et al.* (2017) utilizaron catalizadores bimetalicos de Pt-Fe soportados en $\text{Al}_2\text{O}_3@\text{SBA-15}$ en diferentes concentraciones de hierro y encontraron que cuando la relación molar de Pt/Fe era de 0,25, el catalizador alcanzó la máxima velocidad de reacción y una selectividad hacia el alcohol cinámico del 76,9 %. Los investigadores concluyeron que las especies FeO_x son útiles para la activación del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$) y los átomos de hidrógeno pueden atacar este grupo activado a

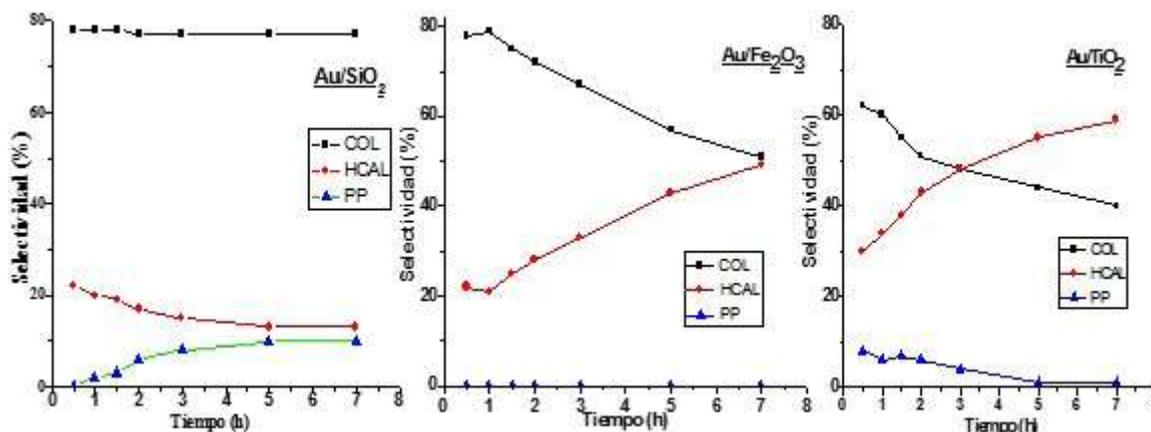


Figura 7. Distribución de productos en la hidrogenación de cinamaldehído

través de la adsorción disociativa en las especies Pt^0 para formar el alcohol insaturado. Por otro lado, se prepararon catalizadores de oro soportados en óxidos mixtos de $ZnO-Fe_2O_3$ y se encontró que la relación molar de Fe a Zn afectó enormemente la actividad catalítica en la hidrogenación de cinamaldehído. El sistema $Au/Zn_{0.7}Fe_{0.3}O_x$ exhibió la mayor conversión de cinamaldehído y una alta selectividad hacia el alcohol cinámico. Este excelente comportamiento se asoció con la gran área de superficie, el tamaño pequeño de las partículas (2 nm) y la buena capacidad de disociación del H_2 a baja temperatura (Wang, et al., 2018).

La forma como se adsorbe el reactivo influye la producción del alcohol insaturado sobre la reducción del enlace $C=O$ presente en los carbonilos α,β -insaturados y, frecuentemente, es aquel que presenta gran destreza para polarizar el grupo carbonilo. Se han establecido algunos modos preferenciales de adsorción del aldehído α,β -insaturado que se llevan a cabo en la superficie de la fase activa, los cuales incluyen un modo planar mediante el doble enlace $C=C$ y un modo vertical mediante el grupo $C=O$ (Martínez, 2012).

El modo de adsorción es más importante que la habilidad de disociación de hidrógeno. Si se muestra la selectividad del alcohol insaturado como una función de la conversión, se podría explicar cómo cambia el modo de adsorción con la conversión (Figura 6). Se ha sugerido que a mayor conversión hay mayor cobertura de moléculas de cinamaldehído en geometría vertical, lo que explicaría que haya una mayor transformación hacia el alcohol insaturado, puesto que las nuevas moléculas solo pueden ser convertidas de manera vertical (Breen, et al., 2004).

Una forma más específica de los modos de adsorción del cinamaldehído se observa mediante la distribución de los productos de la reacción en la Figura 7. En los tres catalizadores estudiados hubo formación adicional de hidroxycinamaldehído y fenilpropanol. En el catalizador de Au/SiO_2 la selectividad del alcohol cinámico se mantuvo relativamente constante a lo largo del tiempo de reacción, mientras que la selectividad hacia hidroxycinamaldehído fue menor y disminuyó paulatinamente, en tanto que la

producción de fenilpropanol aumentó. Cabe recordar que la formación del alcohol cinámico sucede a partir de la hidrogenación del grupo carbonilo del cinamaldehído, y la producción de hidroxycinamaldehído se genera por la reducción del doble enlace $C=C$. Cada una de estas reducciones está asociada a los modos vertical y planar de adsorción del cinamaldehído, respectivamente. La alta selectividad hacia el alcohol cinámico presentado por el catalizador Au/SiO_2 indica que se favorece preferencialmente la adsorción del cinamaldehído en forma vertical. Como la selectividad del alcohol permaneció constante y la del hidroxycinamaldehído disminuyó, es posible que la producción del fenilpropanol provenga de la hidrogenación del hidroxycinamaldehído y no del alcohol cinámico.

Un comportamiento diferente se observó en los catalizadores de Au/Fe_2O_3 y Au/TiO_2 . En los dos sistemas la selectividad del alcohol cinámico disminuyó, en tanto que la selectividad hacia el hidroxycinamaldehído aumentó en el transcurso de la reacción. Así, se sugiere que en los catalizadores Au/TiO_2 y Au/Fe_2O_3 se favorece tanto el modo de adsorción de cinamaldehído en forma vertical al inicio de la reacción como la adsorción en forma planar al final de la reacción. La diferencia con Au/SiO_2 son los sitios cargados negativamente que, probablemente, favorecerían un modo de adsorción preferencial y explicarían los resultados de actividad y selectividad obtenidos.

Conclusiones

La hidrogenación selectiva del cinamaldehído se llevó a cabo utilizando catalizadores de Au soportados en Fe_2O_3 , SiO_2 y TiO_2 . Se observó que la conversión fue inversamente proporcional a la acidez total de los catalizadores. Se encontró que todos los sistemas presentaron sitios ácidos de Lewis, los cuales ayudan en la conversión del cinamaldehído. Sin embargo, la sola acidez no es suficiente para transformar el aldehído α,β -insaturado, ya que es necesario la presencia de las partículas de oro. En este caso, el catalizador con partículas de Au^{δ^-} (Au/SiO_2) fue más selectivo para la reducción del grupo carbonilo ($C=O$), en comparación con las partículas

de Au⁰. Además, para alcanzar una elevada producción del alcohol cinámico, las partículas de Au deben ser de tamaños intermedios (~5,7 nm) y favorecer la adsorción vertical del cinamaldehído, como fue el caso del sistema Au/SiO₂. Este catalizador, a pesar de presentar la menor relación atómica (Au/Si) superficial (evidenciada en los resultados de la XPS), favoreció la producción del alcohol. Las partículas pequeñas (~ 4,5 nm) (Au/TiO₂) y las grandes (~Au/Fe₂O₃) presentaron adsorción del cinamaldehído tanto en forma vertical como planar, provocando una disminución en la selectividad hacia el alcohol cinámico.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, proyecto SGI 2446.

Material suplementario

Figura S1. Difractogramas de rayos X de los catalizadores de oro soportado. ○: Au; □: Fe₂O₃; Δ: TiO₂ (rutilo); ▲: TiO₂ (anatasa). Vea la figura S1 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/852/2543>

Figura S2. Comportamiento de reducción de los catalizadores de oro soportado (TPR-H₂). Vea la figura S2 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/852/2544>

Contribución de los autores

Todos los autores contribuyeron con los diferentes aspectos del trabajo. HAR: preparación de los catalizadores y contribución a la escritura del manuscrito; JJM: evaluación catalítica y contribución a la escritura del manuscrito; MHB: análisis de caracterización y contribución a la escritura del manuscrito, y FP: análisis de DRX y XPS y contribución a la escritura del manuscrito.

Conflicto de intereses

Todos los autores manifiestan no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Bailie, J.E. & Hutchings, G.J. (2001). Promotion by sulfur of Ag/ZnO catalysts for the hydrogenation of but-2-enal. *Catal Commun.* **2**: 291-294.
- Boutonnet, M., Logdberg S., Svensson E.E. (2008). Recent developments in the application of nanoparticles prepared from w/o microemulsions in heterogeneous catalysis. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* **13**: 270-286.
- Breen, J., Burch, R., Gómez-López, J., Griffin, K., Hayes, M. (2004). Steric effects in the selective hydrogenation of cinnamaldehyde to cinnamyl alcohol using an Ir/C catalyst. *App Catal A.* **268**: 267-274.
- Brijaldo, M.H., Rojas, H., Martínez, J.J., Passos, F. (2015). Effect of support on acetic acid decomposition over palladium catalysts. *J Catal.* **331**: 63-75.
- Bus, E. & Van Bokhoven, J.A. (2007). Hydrogen chemisorption on supported platinum, gold, and platinum-gold-alloy catalysts. *Phys Chem Chem Phys.* **9**: 2894-2902.
- Bus, E., Prins, R., Van Bokhoven, J.A. (2007). Origin of the cluster-size effect in the hydrogenation of cinnamaldehyde over supported Au catalysts. *Catal Commun.* **8**: 1397-1402.
- Cardenas-Lizana, F., Gomez-Quero, S., Perret, N., Keane, M.A. (2011). Gold catalysis at the gas-solid interface: Role of the support in determining activity and selectivity in the hydrogenation of m-dinitrobenzene. *Catal Sci Technol.* **1**: 652-661.
- Chakarova, K., Mihaylov, M.Y., Ivanova, S., Centeno, M.A., Hadjiivanov, K.I. (2011). Well-Defined Negatively Charged Gold Carbonyls on Au/SiO₂. *J. Phys. Chem. C.* **115**: 21273-21282.
- Delbecq, F. & Sautet, P. (2002). A density functional study of adsorption structures of unsaturated aldehydes on Pt (111): A key factor for hydrogenation selectivity. *J. Catal.* **211**: 398-406.
- Durndell, L.J., Parlett, C.M., Hondow, N.S., Isaacs, M.A., Wilson, K., Lee, A.F. (2015). Selectivity control in Pt-catalyzed cinnamaldehyde hydrogenation. *Sci Rep.* **5**: 9425-9434.
- Fahlbusch, K.G., Hammerschmidt, F.J., Panten, J., Pickenhagen, W., Schatkowski, D. *Flavours and Fragrances: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*; Wiley: Weinheim, 2008.
- Gallezot, P & Richard, D. (1998). Selective Hydrogenation of α,β -Unsaturated Aldehydes. *Cat Rev-Sci Eng.* **40**: 81-126.
- Gengatharan M., Rajaram P., Ramaswamy K., Viswanathan B. (2016). Studies on Ni-M (M = Cu, Ag, Au) bimetallic catalysts for selective hydrogenation of cinnamaldehyde. *Catal. Today.* **263**: 105-111
- Iriondo, A., Mendiguren A., Güemez, M.B., Requies, J. Cambra J.F. (2017). 2,5-DMF production through hydrogenation of real and synthetic 5-HMF over transition metal catalysts supported on carriers with different nature. *Catal. Today.* **279**: 286-95.
- Ji, X., Niu, X., Li, B., Han, Q., Yuan, F., Zaera, F., Zhu, Y., Fu, H. (2014). Selective hydrogenation of cinnamaldehyde to cinnamal alcohol over platinum/graphene catalysts. *Chem Cat Chem.* **6**: 3246-3253.
- Kirichenko, O.A., Kapustin, G.I., Nissenbaum, V.D., Tkachenko, O.P., Poluboyarov, V.A., Tarasov, A.L., Kucherov, A.V., Kustov, L.M. (2010). The novel route of preparation of the supported gold catalysts by deposition-precipitation. *Stud Surf Sci Catal.* **175**: 537-540.
- Jiang, H.L. & Xu, Q. J. (2011). Recent progress in synergistic catalysis over heterometallic nanoparticles. *Mater. Chem.* **21**: 13705-13725.
- Lenz, J., Campo, B.C., Álvarez, M., Volpe, M.A. (2009). Liquid phase hydrogenation of alpha,beta-unsaturated aldehydes over gold supported on iron oxides. *J Catal.* **267**: 50-56.
- Lin, W., Cheng H., Li, X., Zhang, C., Zhao, F., Arai, M. (2018). Layered double hydroxide-like Mg₃Al_{1-x}Fe_x materials as supports for Ir catalysts: Promotional effects of Fe doping in selective hydrogenation of cinnamaldehyde. *Chinese J Catal.* **39**: 988-996.
- Martínez, J.J. (2012). Catalizadores de Au-Ir soportados en óxidos reducibles para hidrogenación de aldehídos α , β -insaturados (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Martínez, J.J., Rojas, H., Castañeda, C., Díaz, G., Gómez-Cortés, A., Arenas-Alatorre, J. (2012). Cinnamaldehyde

- hydrogenation over Ir/SiO₂ and Ir/FeO_x/SiO₂ catalysts effect of FeO_x on the activity and selectivity. *Curr Org Chem.* **16**: 2791-2796.
- Milone, C., Crisafulli, C., Ingoglia, R., Schipilliti, L., Galvagno, S.** (2007). A comparative study on the selective hydrogenation of α,β unsaturated aldehyde and ketone to unsaturated alcohols on Au supported catalysts. *Catal Today.* **122**: 341-351.
- Milone, C., Ingoglia, R., Pistone, A., Neri, G., Frusteri, F., Galvagno, S.** (2004). Selective hydrogenation of α,β -unsaturated ketones to α,β -unsaturated alcohols on gold-supported catalysts. *J Catal.* **222**: 348-356.
- Milone, C., Trapani, M. C., Galvagno, S.** (2008). Synthesis of cinnamyl ethyl ether in the hydrogenation of cinnamaldehyde on Au/TiO₂ catalysts. *Appl Catal A.* **337**: 163-167.
- Mohr, C., Hofmeister, H., Radnik, J., Claus, P.** (2003) Identification of Active Sites in Gold-Catalyzed Hydrogenation of Acrolein. *J. Am. Chem. Soc.* **125**: 1905-1911.
- Pan, H., Li, J., Lu, J., Wang, G., Xie, W., Wua, P., Li, X.** (2017). Selective hydrogenation of cinnamaldehyde with PtFe_x/Al₂O₃@SBA-15 catalyst: Enhancement in activity and selectivity to unsaturated alcohol by Pt-FeO_x and Pt-Al₂O₃@SBA-15 interaction. *J. Catal.* **354**: 24-36.
- Radnik, J., Mohr, C., Claus, P.** (2003). On the origin of binding energy shifts of core levels of supported gold nanoparticles and dependence of pretreatment and material synthesis. *Phys Chem Chem Phys.* **5**: 172-177.
- Reyes, P., Rojas, H., Fierro, J.L.G.** (2003). Effect of Fe/Ir ratio on the surface and catalytic properties in citral hydrogenation on Fe-Ir/TiO₂ catalysts. *J Mol Cat A: Chemical.* **203**: 203-211.
- Rojas, H., Díaz, G., Martínez, J.J., Castañeda, C., Gómez-Cortés, A., Arenas-Alatorre, J.** (2012). Hydrogenation of α, β -unsaturated carbonyl compounds over Au and Ir supported on SiO₂. *J Mol Cat A.* **363-364**: 122-128.
- Rojas, H., Martínez, J., Mancipe, S., Borda, G., Reyes, P.** (2012). Citral hydrogenation over novel niobia and titania supported Au, Ir-Au and Ir catalysts. *React Kinet Mech Cat.* **106**: 445-455.
- Somodi, F., Borbáth, I., Hegedús, M., Tompos, A., Sajó, I.E., Szegedi, Á., Rojas, S., Fierro, J.L.G., Margitfalvi, J.L.** (2008). Modified preparation method for highly active Au/SiO₂ catalysts used in CO oxidation. *App Cata A.* **347**: 216-222.
- Sun, K.Q., Hong, Y.C., Zhang, G.R., Xu, B.Q.** (2011). Synergy between Pt and Au in Pt-on-Au Nanostructures for Chemoselective Hydrogenation Catalysis. *ACS Catal.* **1**: 1336-1346.
- Venugopal, A. & Scurrrell, M.S.** (2004). Low temperature reductive pretreatment of Au/Fe₂O₃ catalysts, TPR/TPO studies and behaviour in the water-gas shift reaction. *App Catal A.* **258**: 241-249.
- Visco, A.M, Neri, F., Donato, A., Milone, C., Galvagno, S.** (1999). X-ray photoelectron spectroscopy of Au/Fe₂O₃ catalysts. *Phys Chem Chem Phys.* **1**: 2869-2873.
- Wang, X. & Andrews, L.** (2003). Gold is noble but gold hydride anions are stable. *Angew Chem Int Ed.* **115**: 5359-5364.
- Wang, W., Xie, Y., Zhang, S., Liu, X., Haruta, M., Huang, J.** (2018). Selective Hydrogenation of Cinnamaldehyde Catalyzed by ZnO-Fe₂O₃ Mixed Oxide Supported Gold Nanocatalysts. *Catalysts.* **8**: 60-73.
- Wu, Q., Zhang C., Zhang, B., Li, X., Ying, Z., Liu, T., Lin, W., Yu, Y., Cheng, H., Zhao., F.** (2016). Highly selective Pt/ordered mesoporous TiO₂-SiO₂ catalysts for hydrogenation of cinnamaldehyde: The promoting role of Ti²⁺. *J Colloid Interface Sci.* **463**: 75-82
- Zanella, R., Louis, C., Giorgio, S., Touroude, R.** (2004). Crotonaldehyde hydrogenation by gold supported on TiO₂: Structure sensitivity and mechanism. *J Catal.* **223**: 328-339.
- Zaki, M. I., Mekhemer, G. A. H., Fouad, N. E., Rabee, A. I. M.** (2014). Structure-acidity correlation of supported tungsten (VI)-oxo-species: FT-IR and TPD studies of adsorbed pyridine and catalytic decomposition of 2-propanol. *Appl. Surf. Sci.* **308**: 380-387.
- Zhao, J., Jun, N., Xu, J.H., Xu, J.T., Cen, J., Li, X.N.** (2014). Ir Promotion of TiO₂-supported Au catalysts for selective hydrogenation of cinnamaldehyde. *Catal. Commun.* **54**: 72-76.
- Zhu, Y., Qian, H.F., Drake, B.A., Jin, R.C.** (2010). Atomically precise Au₂₅(SR)₁₈ nanoparticles as catalysts for the selective hydrogenation of $\alpha\beta$ -Unsaturated ketones and aldehydes. *Angew. Chem. Int. Ed.* **122**: 1317-1320.
- Zhou, X., Su, T., Jiang, Y., Qin, Z., Ji, H., Guo, Z.** (2016). CuO-Fe₂O₃-CeO₂/HZSM-5 bifunctional catalyst hydrogenated CO₂ for enhanced dimethyl ether synthesis. *Chem. Eng. Sci.* **153**: 10-20.

Las plantas como fuente de compuestos fotoprotectores frente al daño en el ADN producido por la radiación ultravioleta

Jorge Luis Fuentes Lorenzo

Laboratorio de Microbiología y Mutagénesis Ambiental, Grupo de Investigación en Microbiología y Genética, Escuela de Biología, Facultad de Ciencias; Centro de Investigación en Biomoléculas, CIBIMOL, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

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

Resumen

La fotoprotección es una estrategia preventiva y terapéutica frente al cáncer y el envejecimiento de la piel. En el presente trabajo se revisan los efectos biológicos adversos de la radiación ultravioleta, los conceptos básicos relevantes de la fotoprotección y los métodos para llevar a cabo su medición. Asimismo, se resumen los resultados obtenidos de la caracterización radiobiológica y genética del modelo experimental (SOS Chromotest) usado para la bioprospección de extractos y moléculas de origen vegetal con potencial en fotoprotección. Además, se presentan datos sobre la eficacia fotoprotectora y las estimaciones del efecto antigenotóxico de aceites esenciales y extractos obtenidos de especies de plantas, así como de los compuestos mayoritarios de los aceites y extractos promisorios analizados en este estudio. Por último, se postulan posibles mecanismos de acción de algunas moléculas relevantes. Los resultados se presentan y discuten destacando su potencial uso para el desarrollo de bloqueadores solares multifuncionales.

Palabras claves: Radiación ultravioleta; Fotoprotección; Antigenotoxicidad; Metabolitos secundarios de plantas.

Plants as a source of photoprotective compounds against ultraviolet radiation-induced DNA damage

Abstract

Photoprotection is a preventive and therapeutic strategy against skin cancer and photoaging. In the present work, we review the adverse biological effects of the ultraviolet radiation, the basic concepts with relevance in photoprotection, and the methods to carry out its measurement. Likewise, we summarized the main results obtained from the radiobiological and genetic characterization of the SOS Chromotest model, which we used for bioprospecting photoprotective activity of plant extracts and molecules. Besides, we showed photoprotective efficacy and/or antigenotoxicity estimates of plant essential oils and extracts, as well as of the major compounds of promissory oils and extracts analyzed in our study. Finally, action mechanisms of the relevant molecules are postulated. These results are presented and discussed considering their potential use to formulate multi-functional sunscreen.

Key words: Ultraviolet radiation; Photoprotection; Antigenotoxicity; Plant secondary metabolites.

La sobreexposición a la radiación solar en humanos constituye un problema de salud pública debido al efecto carcinógeno de la radiación ultravioleta (Linos, *et al.*, 2009). El rango espectral ultravioleta de la radiación solar comprende los rayos UVA de onda larga (315–400 nm), los rayos UVB de onda media (280–315 nm) y los rayos UVC de onda corta (100–280 nm). Los rayos UVC son totalmente absorbidos por la capa de ozono, en tanto que entre 1 y 10 % de los rayos UVB y entre 90 y 99 % de los rayos UVA alcanzan la superficie terrestre. Por esto, se considera que solo los rayos UVB y UVA tienen una real importancia biológica (Ganesan & Hanawalt, 2016).

Los efectos biológicos nocivos de la radiación ultravioleta dependen de su energía e incluyen desde daños leves en la piel, como el eritema, hasta otros más graves como quemaduras, (Narayanan, *et al.*, 2010). Tanto los rayos UVA como los UVB producen daños en el ADN, principalmente los dímeros de pirimidina ciclobutano (*cyclobutane pyrimidine dimer, CPD*) (Tewari, *et al.*, 2012),

Correspondencia:

Jorge Luis Fuentes Lorenzo; jfuentes@uis.edu.co

Recibido: 20 de febrero de 2019

Aceptado: 20 de julio de 2019

Editor: Luis Fernando Echeverri

los cuales causan mutaciones conocidas como huellas genéticas UV (**Brash, 2015**) que desencadenan procesos inflamatorios y causan inmunosupresión y cáncer de piel (**Vink & Roza, 2001**). Aunque en menor medida, los rayos UVB también producen niveles importantes de (6-4) pirimidina pirimidona (6-4PP) y los de UVA, bases oxidadas (8-oxo-7,8-dihidro-deoxiguanina, formamido-pirimidinas, roturas de cadena simples) (**Tewari, et al., 2012**).

Los CPD y la 6-4PP constituyen un obstáculo para la replicación del ADN y producen un bloqueo del ciclo celular (**Yeeles, et al., 2013**); dichos daños deben ser reparados para que la célula restaure la replicación de su genoma y sobreviva. En la mayoría de los seres vivos, los mecanismos de reparación del daño genético constituyen la primera barrera de defensa frente a los CPD y la 6-4PP, entre los cuales se destacan la fotorreactivación (**Kneutinger, et al., 2014**) y la reparación por escisión de nucleótidos (*Nucleotide Excision Repair*, NER) (**Schärer, 2013**).

Además, las células expuestas a la radiación ultravioleta pueden activar diferentes respuestas dirigidas a restaurar la división celular y, en últimas, a garantizar la sobrevivencia del organismo. En las bacterias la radiación ultravioleta induce la respuesta SOS, una respuesta de emergencia celular que controla funciones como la reparación del ADN, la mutagénesis SOS o síntesis de translesión de ADN, la formación del septo celular, y la restauración de la replicación del genoma bacteriano, entre otras (**Schlacher & Goodman, 2007**). Una respuesta similar inducible por la radiación ultravioleta se ha descrito en células de la piel de los mamíferos (**Eller, et al., 2008**); en ella, los melanocitos y los queratinocitos responden a los CPD o a la exposición a los oligonucleótidos del dinucleótido del ADN timidina (pTpT), los cuales mimetizan la señal del daño genético por UV en la célula activando la proteína supresora de tumores 53 (p53) (**Eller, et al., 1997**). Esta proteína funciona como un factor de transcripción o efector de diferentes vías de señalización celular y permite la producción de melanina y la restauración de funciones esenciales inhibidas por la radiación ultravioleta, como la división celular y la reparación del daño genético (Figura S1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/841/2548>). La proteína p53 promueve la inducción de genes que incrementan la habilidad de la célula para sobrevivir al daño inducido por la radiación ultravioleta en futuras exposiciones a este agente (**Mayer, et al., 2001**). Entre estos genes se encuentran aquellos que codifican proteínas involucradas en la melanogénesis de la piel (tirosinasas, hormona estimuladora de melanocitos α), el control del ciclo celular (proteína efectora p21, antígeno nuclear de proliferación celular), la NER y la síntesis de translesión de ADN en humanos. Cuando esta respuesta de fotoprotección es inducida por oligonucleótidos de pTpT, reduce el número de melanomas inducido por la radiación ultravioleta en ratones (**Arad, et al., 2008**) y en humanos (**Arad, et al., 2007**). Por ello, el uso de oligonucleótidos de pTpT se ha propuesto como una estrategia preventiva

de fotoprotección (**Goukassian, et al., 2012**). Los CPD también inician estados de inflamación e inmunosupresión (Figura S1, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/841/2548>). En estos casos, a través de la vía de la señalización celular del factor de transcripción nuclear κ B, se activan los genes de las interleucinas 8 y 10 y del factor de necrosis tumoral α , los cuales desempeñan un papel central en la inflamación cutánea y la inmunosupresión inducida por la radiación ultravioleta (**Ullrich, 2005**).

En contraste con todo el conocimiento sobre los efectos adversos producidos por los CPD, los estudios disponibles sobre el papel de las bases oxidadas del ADN en el cáncer de piel son contradictorios (**Lund & Timmins, 2007**). En estudios recientes se ha evidenciado que las oxidadas mitocondriales participan en la producción de las especies reactivas de oxígeno (ERO) inducidas por los rayos UVA (**Schuch, et al., 2017**), las cuales oxidan enzimas que reparan el ADN dañado, lo que podría comprometer la remoción de daños inducidos por la radiación ultravioleta (**Brem, et al., 2017**). Además, dañan componentes estructurales de la piel como la actina y el colágeno afectando así la integridad de la dermis y la epidermis (**Yamaba, et al., 2016**), lo cual se ha relacionado con el envejecimiento de la piel (**Poon, et al., 2015**).

Estos hallazgos respaldan el papel fundamental de los CPD y las ERO en el efecto inducido por la radiación ultravioleta en el desarrollo del cáncer y el envejecimiento de la piel, respectivamente. Si el nivel de los CPD en la célula supera su capacidad para repararlos, y estos persisten durante la fase S del ciclo celular, una polimerasa propensa a error puede polimerizar estos fotoproductos (**Vaisman & Woodgate, 2017**) produciendo las ya mencionadas huellas genéticas UV (**Brash, 2015**). Cuando estas mutaciones se acompañan de la pérdida de la función de los genes supresores de tumores, como el de la proteína p53 (**Ziegler, et al., 1994**), la célula pierde la capacidad de reparar el daño (**Gatz & Wiesmuller, 2006**) y de producir melanina (**Cui, et al., 2007**), dando lugar a procesos de expansión clonal de las células mutantes involucradas en las fases iniciales del cáncer de piel (**Jonason, et al., 1996**). Se ha establecido que alrededor del 90 % de los pacientes con carcinomas de la piel presentan mutaciones en el gen p53 (**Ziegler, et al., 1994**).

El riesgo de padecer cáncer de piel debido a la sobreexposición a la radiación solar se ha evaluado principalmente mediante índices empíricos, tales como la dosis mínima de eritema (DME) (**Parrish, et al., 1982**). El eritema es un efecto inflamatorio agudo producido por los rayos UVB que se manifiesta como un proceso de enrojecimiento de la piel (**Vink & Roza, 2001**). **Young, et al.** (1998) evidenciaron la similitud en los patrones de CPD y del eritema para el rango espectral de 280 a 340 nm, lo que sugiere que los CPD son cromóforos del eritema (Figura S2, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/841/2549>). Con base en esta concordancia, los autores propusieron usar índices DME como un

sustituto de los componentes espectrales UVB (280–315 nm) y UVA^{II} (315–340 nm) causantes de daño en el ADN de los melanocitos y queratinocitos de la piel (Ikehata, *et al.*, 2013a).

La fotoprotección y su medición

La fotoprotección es una estrategia preventiva y terapéutica frente al cáncer y al fotoenvejecimiento de la piel (Chhabra, *et al.*, 2017). La estrategia de protección más aceptada es el uso tópico de bloqueadores solares (cremas, lociones, emulsiones, barras, etc.). Estos bloqueadores solares contienen compuestos orgánicos o inorgánicos que actúan como filtros solares absorbiendo o refractando la radiación ultravioleta, con lo que se evita su absorción en el ADN (Jansen, *et al.*, 2013). Recientemente, se han revisado las propiedades más relevantes de los filtros solares comúnmente usados en los bloqueadores solares comerciales (Wang, *et al.*, 2017).

El factor de protección solar (FPS) *in vivo* (Sayre, *et al.*, 1979) fue el primer método para evaluar la efectividad de dicha protección al indicar cuánto aumenta la capacidad de la protección natural de la piel contra el eritema. Sin embargo, los métodos *in vivo* para evaluar la efectividad de la protección solar son laboriosos y controvertidos por razones éticas (Bendová, *et al.*, 2007). Por lo tanto, se han propuesto índices basados en los datos obtenidos *in vitro* sobre la absorción espectral de radiación ultravioleta y la radiación solar global productoras de eritema (Stanfield, *et al.*, 2010), entre los cuales se destacan los siguientes: i) factor de protección solar (FPS_{*in vitro*}), ii) factor de protección UVA (FP-UVA), iii) relación UVA/UVB (R), y

iv) longitud de onda crítica (λ). Algunos de estos índices se han incluido en las guías de la *European Cosmetic, Toiletry and Perfumery Association (Colipa, 2011)* y de la *Food and Drug Administration* de los Estados Unidos (FDA, 2011).

Infortunadamente, la prevención del eritema con bloqueadores solares no garantiza que no se generen fotoproductos del ADN epidérmico, ya que el efecto genotóxico de la radiación ultravioleta puede ocurrir con dosis más bajas que la DME (Young, *et al.*, 1998). Por ello, se ha sugerido reconsiderar la evaluación del riesgo por exposición a la radiación ultravioleta basada en el eritema (Ikehata, *et al.*, 2013a). Para superar estas limitaciones y mejorar el actual sistema de medición de la eficacia fotoprotectora de los bloqueadores solares, se han propuesto otros índices como el factor de protección inmunitario (Fourtanier, *et al.*, 2005), el factor de protección de la piel de radicales libres (Herrling, *et al.*, 2006), y el factor de protección genotóxico (Césarini & Demanneville, 2000). Este último permite medir la eficacia fotoprotectora directamente en el ADN (Schuch, *et al.*, 2014), y con ello diferenciar moléculas que funcionan como filtros solares de otras que estimulan la capacidad celular para reparar el daño genético, como ya se indicó anteriormente.

En tal sentido, recientemente nos hemos propuesto el uso del SOS Chromotest (Quillardet, *et al.*, 1982) para la bioprospección de plantas con potencial de fotoprotección (Fuentes, *et al.*, 2017). Este ensayo mide la respuesta SOS en *Escherichia coli*, la cual relaciona el daño genético, la replicación del ADN y la división celular (Figura 1).

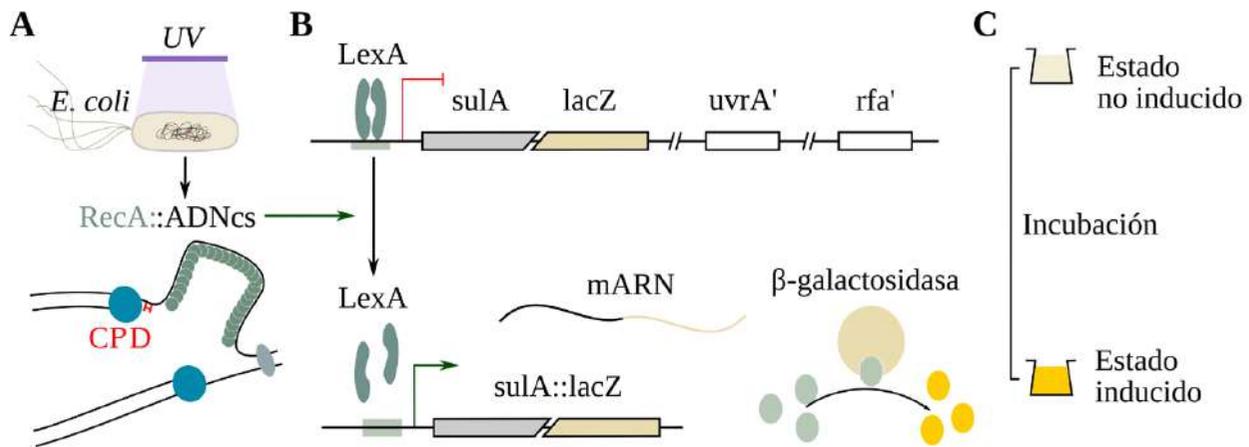


Figura 1. Fundamento del SOS Chromotest. El ensayo se fundamenta en la medición de un sistema inducible de emergencia celular (respuesta SOS), que relaciona la replicación del ADN y la división celular en *Escherichia coli*. Cuando las células de *E. coli* se exponen a agentes mutágenos que distorsionan el ADN (por ejemplo: los *DNA-protein crosslinks*, DPC), tal distorsión constituye un obstáculo para la replicación del cromosoma y, en consecuencia, se detiene la división celular. Con el fin de reparar los daños producidos en el ADN y restaurar la división celular, la célula induce la respuesta SOS. En la cepa *E. coli* PQ37, la inducción se inicia con la unión de la proteína RecA a regiones de ADN de cadena simple, próximas a la horquilla de replicación del ADN detenida por el daño (A). Esta forma activada de RecA promueve la auto-incisión del represor LexA que permite la transcripción de los genes SOS, incluida la fusión transcripcional *sulA::lacZ* (B). En presencia de un sustrato indicador, la enzima β-galactosidasa (producto del gen *lacZ*) produce color o fluorescencia que se mide utilizando un espectrofotómetro o fluorómetro, según sea el caso (C). La cantidad de color o fluorescencia producida es directamente proporcional a la cantidad de daño inducido.

Aunque el SOS Chromotest ha sido uno de los ensayos más usados para la evaluación genotóxica de sustancias químicas (Escobar, *et al.*, 2013), poco se conocía sobre su sensibilidad a la radiación ultravioleta (Quillardet & Hofnung, 1984). Comparado con otros modelos experimentales (dosímetros de ADN, ensayo enzimático con endonucleasa V del bacteriófago T4, ensayo del cometa), el SOS Chromotest es el ensayo más sensible a la radiación ultravioleta que se conoce, pues detecta daños en las siguientes dosis mínimas de radiación ultravioleta: UVC (0,02 J/m²), UVB (10 J/m²) y UVA (5000 J/m²). Utilizando cepas mutantes isogénicas de *E. coli* (Prada-Medina, *et al.*, 2016), se ha estudiado el efecto de diferentes deficiencias genéticas en la supervivencia y la inducción de la respuesta SOS frente a la radiación UVB en este modelo experimental. Se evidenció que cinco mutaciones (*uvrA* > *recB* > *recO* > *recJ* > *xonA*) afectaron de manera importante la supervivencia celular. Además, en las mutaciones *uvrA* y *recJ* se registró una elevada inducción de la respuesta SOS en comparación con la cepa salvaje, incluso 240 minutos después de la irradiación. Las cepas con las mutaciones *recO* o *recN* no indujeron la respuesta SOS en *E. coli*. Un hallazgo importante fue constatar que para la supervivencia celular los mecanismos de recombinación homóloga del ADN son tan importantes como la NER, lo cual sugiere que tienen un papel durante la eliminación de los fotoproductos inducidos por la radiación UVB en el ADN celular. Además, en nuestro estudio se proponen nuevas funciones para los productos génicos de *recO* o *recN* en los procesos de inducción de la respuesta SOS en *E. coli*. Usando algunas cepas de este microorganismo (PQ30, PQ37, IN250, IN400), se estudiaron las fases del proceso de reorganización del nucleóide bacteriano después de la irradiación (Estévez-Castro, *et al.*, 2018). El estudio postuló nuevas funciones para algunas proteínas de reparación del ADN (*UvrA*, *RecJ* y *RecN*) durante este proceso y estableció las bases experimentales para el uso de dichas cepas en estudios de fotoprotección. En resumen, los tres estudios mencionados permitieron consolidar el conocimiento básico que validó el uso eficaz de modelos experimentales *in vitro*, basados en una fusión transcripcional con genes SOS bacterianos en estudios de fotoprotección.

A continuación se señalan las razones que justifican el uso del ensayo SOS Chromotest para la bioprospección de compuestos fotoprotectores. Primero, se ha descrito en células de piel humana una respuesta fotoprotectora inducible por radiación ultravioleta similar a la respuesta SOS bacteriana que involucra la melanogénesis, la detención del ciclo celular, y la inducción de genes involucrados en la reparación del CPD y en la síntesis de translesión del ADN (Eller, *et al.*, 2008). Por lo tanto, el ensayo SOS Chromotest, muy sensible a la radiación ultravioleta (Fuentes, *et al.*, 2017), debe predecir adecuadamente la fotoprotección en células de piel humana. Segundo, ya se ha probado la utilidad del ensayo para la evaluación de la actividad antigenotóxica

de compuestos de origen vegetal (Vicuña, *et al.*, 2010; López, *et al.*, 2011; Quintero, *et al.*, 2012). Tercero, como ya se indicó, se han identificado genes críticos para la supervivencia celular frente a la radiación ultravioleta y la inducción de SOS en este modelo experimental (Prada-Medina, *et al.*, 2016; Estévez-Castro, *et al.*, 2018). El uso simultáneo de estas cepas proporcionó información preliminar sobre los mecanismos de protección por los cuales los elementos constitutivos de las plantas reducen el efecto genotóxico de la radiación ultravioleta. Cuarto, el SOS Chromotest es un ensayo validado para la detección de efectos genotóxicos (White & Rasmussen, 1996) que, en comparación con otros métodos, permite un escrutinio de amplia cobertura (White, *et al.*, 1996).

Las plantas como fuente de compuestos fotoprotectores

Las plantas son fuente de una gran diversidad de moléculas naturales útiles en la fotoprotección. Entre las más comunes se encuentran los terpenos, las flavonas, los carotenoides, las catequinas y las antocianinas. Algunas de estas moléculas naturales pueden actuar como filtros solares (Stevanato, *et al.*, 2014) mediante el modo de acción ya descrito para este tipo de compuestos.

Además, la mayoría tienen propiedades antioxidantes (Saewan & Jimtaisong, 2013). Las moléculas antioxidantes fueron inicialmente usadas como un complemento de los filtros solares para reducir el estrés oxidativo producido por la radiación ultravioleta (Chen, *et al.*, 2012). Hoy se sabe que los compuestos antioxidantes naturales pueden mitigar varios de los efectos biológicos adversos de la radiación ultravioleta que generan fotoenvejecimiento celular (Mukherjee, *et al.*, 2011) y cáncer de piel (Montes de Oca, *et al.*, 2017).

Dado que las plantas acumulan compuestos cuando están expuestas al componente UVB de la radiación solar (Zhang & Björn, 2009), pueden ser una fuente de compuestos fotoprotectores útiles para prevenir las mutaciones celulares involucradas en el cáncer de piel mediante la regulación de la mutabilidad inducida por los CPD (Afaq & Katiyar, 2011). Este tipo de compuestos se conocieron inicialmente como antimutágenos (Kada & Shimoi, 1987); hoy se conocen como agentes quimiopreventivos que pueden prevenir o retardar la acción de los factores carcinógenos (Montes de Oca, *et al.*, 2017).

Los efectos biológicos de la radiación ultravioleta susceptibles de ser modulados con el uso de esta clase de compuestos se resumen en la Figura S1. Así, los mecanismos de fotoprotección más comunes de estas moléculas son los siguientes: i) la actividad antioxidante frente a las ERO; ii) la absorción directa de fotones (filtros solares); iii) el bloqueo del ciclo celular o la estimulación de mecanismos de reparación del ADN, y iv) la estimulación de la melanogénesis, entre otros. La idea de desarrollar bloqueadores solares con base en compuestos naturales con propiedades

antimutagénicas, antigenotóxicas o quimiopreventivas frente a la radiación ultravioleta suscita un interés creciente, dado que el estado de fotoprotección se logra estabilizando la integridad genómica (Ganesan & Hanawalt, 2016).

Los estudios en Colombia sobre el potencial fotoprotector de su flora son escasos y miden la fotoprotección usando criterios diferentes. Por ejemplo, el grupo del Dr. Osorio-Durango (Universidad de Antioquia, Colombia) demostró que el extracto de frutas de *Passiflora tarminiana*, así como su fracción polifenólica (flavonoides y procianidinas), tiene actividad antioxidante y reduce la degradación de colágeno inducida por la radiación ultravioleta en fibroblastos humanos estimulando su síntesis (Bravo, et al., 2017). Sus resultados coincidieron con los de otros autores en cuanto al efecto fotoprotector de compuestos vegetales en las proteínas estructurales de la piel (Chua, et al., 2012; Chandra-Pal, et al., 2015; Chiang, et al., 2015; Adam, et al., 2016). El grupo del Dr. Osorio-Durango recomendó el uso de los extractos de *P. tarminiana* en la formulación de cosméticos contra el envejecimiento de la piel.

Por otra parte, usando índices basados en datos de absorción espectral *in vitro* (FPS_{in vitro}, FP-UVA, UVA/UVB, λ), el grupo del Dr. Puertas-Mejía (Universidad de Antioquia, Colombia) demostró que las especies de plantas de alta montaña *Baccharis antioquiensis*, *Morella parvifolia* y *Pentacalia pulchella* absorben la luz ultravioleta en los rangos UVA y UVB y por sus propiedades antioxidantes y fotoprotectoras recomendaron su uso como complemento de los bloqueadores solares comerciales (Mejía-Giraldo, et al., 2016ab; Puertas-Mejía, et al., 2018).

Con base en sus propiedades antigenotóxicas frente a la radiación ultravioleta, nuestro grupo evaluó el potencial

fotoprotector de aceites esenciales obtenidos de especies del género *Lippia* (Quintero-Ruiz, et al., 2017). En dicho estudio se evidenció que cuatro aceites esenciales obtenidos de las especies *Lippia alba* (COL 512272), *L. micromera* (COL 516924) y *L. organoides* (COL 512075 y COL 519799) tenían efecto antigenotóxico frente a la radiación ultravioleta (Tabla 1).

Un análisis de la composición química de los aceites esenciales mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas permitió constatar sus compuestos mayoritarios. Se evaluó la antigenotoxicidad frente a la radiación ultravioleta de estos compuestos mayoritarios y con base en sus valores de mínima concentración inhibitoria significativa (CIG), su potencial antigenotóxico fue el siguiente: ρ -cimeno (89 µg/mL) > carvacrol (140 µg/mL) > timol (202 µg/mL) > citral (267 µg/mL). Estos resultados relacionan el efecto antigenotóxico de los aceites esenciales con sus compuestos mayoritarios. Además, al estudiar las mezclas de los compuestos mayoritarios de la especie *L. organoides*, se encontró sinergismo en las siguientes combinaciones: timol/carvacrol, timol/ ρ -cimeno y carvacrol/ ρ -cimeno, lo que indica que el efecto antigenotóxico detectado en los aceites esenciales, por lo menos en el de *L. organoides*, puede ser el resultado de efectos aditivos o sinérgicos entre sus compuestos mayoritarios.

En un segundo trabajo (Fuentes, et al., 2017), se reportaron nuevas especies de plantas potencialmente útiles como fuentes de compuestos fotoprotectores. Estos estudios mostraron que los extractos obtenidos de 11 especies de plantas colombianas mediante el método de extracción de fluidos (CO₂) supercrítico redujeron el daño producido en el ADN por la UVB con concentraciones biológicamente relevantes

Tabla 1. Efecto antigenotóxico de los aceites esenciales obtenidos de diferentes especies de *Lippia*. Se presentan los compuestos mayoritarios de cada aceite, la mínima concentración con inhibición significativa ($p \leq 0,05$) de la actividad fosfatasa alcalina constitutiva (CAPSI) y la mínima concentración con inhibición significativa ($p \leq 0,05$) de los efectos genotóxicos (CIG) inducidos por la radiación ultravioleta en la cepa PQ37 de *E. coli*. Solo los valores de CIG ≤ 1 % se consideraron como concentraciones antigenotóxicas biológicamente relevantes. Además, se consideraron como promisorios los aceites esenciales que no mostraron citotoxicidad en el modelo experimental.

Nombre de la especie (voucher del HNC)	Principales elementos constitutivos†	CAPSI (%)	(CIG) (% v/v)
<i>L. alba</i> (COL 480750)	Carvona (38 %)/limoneno (32 %)	1,7 ± 0,0	3,3 ± 0,0
<i>L. alba</i> (COL 512272)	Neral (19 %)/geranial (23 %)	NI	0,8 ± 0,0
<i>L. alba</i> (COL 560257)	Myrcenona (63 %)	1,7 ± 0,0	1,7 ± 0,0
<i>L. citriodora</i> (COL 555845)	Neral (16 %)/geranial (19 %)	0,8 ± 0,0	0,8 ± 0,0
<i>L. dulcis</i> (COL 512079)	δ -cadineno (9 %)/ <i>trans</i> - β -cariofileno (10 %)	1,7 ± 0,0	NI
<i>L. graveolens</i> (COL 555839)	Timol (70 %)/ ρ -cimeno (9 %)	0,2 ± 0,0	0,4 ± 0,0
<i>L. micromera</i> (COL 516924)	Timol (29 %)/timol metil eter (15 %)/ ρ -cimeno (13 %)	NI	0,8 ± 0,0
<i>L. organoides</i> (COL 512075)	Carvacrol (46 %)/ ρ -cimeno (11 %)/ γ -terpineno (12 %)	NI	0,4 ± 0,0
<i>L. organoides</i> (COL 519798)	α -felandreno (13 %)/ ρ -cimeno (11 %)/ <i>trans</i> - β -cariofileno (11 %)	1,7 ± 0,0	3,3 ± 0,0
<i>L. organoides</i> (COL 519799)	Timol (54 %)/ ρ -cimeno (10 %)	NI	0,4 ± 0,0

HNC: Herbario Nacional de Colombia, NI: sin inhibición

†: según Stashenko, et al. (2008)

Citral = Neral (19 %)/geranial (23 %). En letra negrilla se resaltan los datos o valores promisorios.

(CIG ≤ 125 µg/mL) (Cos, et al., 2006) con valores del porcentaje de inhibición significativa que oscilaron entre 52 y 100 % (Tabla 2).

De las 11 especies que mostraron efecto antígenotóxico frente a los rayos UVB, siete (7) tuvieron una eficacia fotoprotectora UVB consistentemente alta (FPS_{in vitro} ≥ 60,0). Esto sugiere que el 64 % de los compuestos mayoritarios de estos extractos funcionan como filtros solares que absorben o refractan la radiación ultravioleta. El extracto obtenido de la especie *Salvia aratocensis* registró un valor de λc de 370 nm, lo que indica que la mezcla de compuestos de este extracto permite una fotoprotección de amplio espectro. El modo de acción (filtros solares) de los compuestos mayoritarios de estos extractos es similar al que exhiben los “desmutágenos” (Kada & Shimoi, 1987), una categoría de compuestos que inactivan el mutágeno antes de que este dañe el ADN. Por otra parte, algunas especies de plantas (*Bacharis nitida*, *Hyptis suaveolens*, *Psidium sartorianum* y *Solanum crotonifolium*) mostraron una elevada actividad antígenotóxica frente a los rayos UVB, pero su eficacia fotoprotectora frente a los UVB fue limitada (Tabla 2). Esto sugiere que los compuestos mayoritarios de estos extractos reducen el nivel de daño genético de manera similar a los “bioantimutágenos” clásicos (Kada & Shimoi, 1987), estimulando o facilitando la reparación de los fotoproductos de la irradiación.

En diferentes estudios se ha evidenciado que las plantas contienen compuestos que reducen el daño genético inducido por la radiación ultravioleta, ya sea evitando su formación o

estimulando su eliminación. Por ejemplo, se ha señalado que los aceites esenciales de *Calophyllum inophyllum* (Said, et al., 2007) y de *Bauhinia microstachya* (Reis-Mansur, et al., 2016), así como los extractos de *Jatropha curcas* (Sundari, et al., 2013), *Sechium edule* (Metral, et al., 2018) y de las plantas antárticas *Colobanthus quitensis*, *Deschampsia antártica* y *Polytrichum juniperinum* (Pereira, et al., 2009), reducen el estrés oxidativo producido por la radiación ultravioleta evitando los daños en el ADN. Asimismo, una fracción flavonoide de *Araucaria angustifolia* (Yamaguchi, et al., 2009) y una de antocianina de *Fragaria ananassa* (Giampieri, et al., 2012) evitan la formación de los CPD producida por la radiación ultravioleta. Por otra parte, se encontró que la fracción de antocianina de *Vitis vinifera* (Vaid, et al., 2010) y la fracción polifenólica de *Phyllanthus orbicularis* (Vernhes, et al., 2013) promueven la remoción de los CPD producida por la radiación ultravioleta al modular la NER en humanos.

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos al estudiar las formas puras de los compuestos mayoritarios de extractos promisorios previamente identificados por Stashenko, et al. (2013).

La estimación del efecto antígenotóxico (CIG) de estos compuestos indica que los diferentes flavonoides estudiados, la curcumina y el GEGC fueron más activos que los compuestos terpenos, con valores de CIG más bajos (apigenina > pinocembrina > quercetina > curcumina > naringenina > GEGC > β-cariofileno >> timol > carvacrol > p-cimeno). Varios de los compuestos con elevado potencial

Tabla 2. Estimación del efecto antígenotóxico y la eficacia fotoprotectora de extractos de plantas promisorios. Los extractos se obtuvieron mediante el método de extracción con fluido (CO₂) supercrítico. Se presenta la concentración mínima que produce inhibición significativa (p ≤ 0.05) del efecto genotóxico (CIG) y el porcentaje de inhibición de dicho efecto (%IG) de cada extracto. Solo los valores de CIG ≤ 125 µg/mL se consideraron como concentraciones antígenotóxicas biológicamente relevantes (Cos, et al., 2006). Se presentan, además, los valores de la eficacia fotoprotectora basados en los índices de fotoprotección *in vitro* SPF_{in vitro} y λc.

Nombre de la especie (voucher del HNC)	Localidad (provincia)	CIG ‡ (µg/mL)	%IG ‡	FPS _{in vitro} †	λc †
<i>Achyrocline satureioides</i> (COL 579420)	Zapatoca (Santander)	125 ± 0	63 ± 5	192 ± 2	343 ± 0
<i>Baccharis nitida</i> (COL) 559436)	Villanueva (Santander)	16 ± 0	78 ± 4	17 ± 0	360 ± 0
<i>Chromolaena pellia</i> (COL) 559437)	Los Santos (Santander)	125 ± 0	58 ± 6	352 ± 16	367 ± 0
<i>Tagetes caracasana</i> (COL) 559441)	Zapatoca (Santander)	125 ± 0	52 ± 5	146 ± 1	360 ± 0
<i>Hyptis suaveolens</i> (COL) 560241)	Umpalá (Santander)	31 ± 0	67 ± 8	2 ± 0	340 ± 0
<i>Salvia aratocensis</i> (COL) 560246)	Los Santos (Santander)	125 ± 0	89 ± 5	173 ± 1	370 ± 0
<i>Persea caerulea</i> (COL) 560247)	Charalá (Santander)	31 ± 0	99 ± 1	165 ± 1	360 ± 0
<i>Psidium sartorianum</i> (COL) 578359)	Zapatoca (Santander)	125 ± 0	54 ± 6	3 ± 0	350 ± 0
<i>Piper eriopodon</i> (COL) 578364)	Zapatoca (Santander)	125 ± 0	55 ± 9	101 ± 1	350 ± 0
<i>Solanum crotonifolium</i> (COL) 560253)	Umpalá (Santander)	16 ± 0	72 ± 4	11 ± 0	360 ± 0
<i>Lippia origanoides</i> (COL) 560259)	Los Santos (Santander)	62 ± 0	100 ± 0	299 ± 3	350 ± 0

HNC: Herbario Nacional de Colombia. ‡ Valores de concentración mínima inhibitoria (CIG) del efecto genotóxico inducida por UVB previamente obtenida por Fuentes, et al. (2017). † La eficacia fotoprotectora (FPS_{in vitro} y λc) se calculó según lo indicado en García-Forero, et al. (2019). Diferentes categorías establecidas por la Food and Drugs Administration (FDA) de los Estados Unidos y por la European Cosmetic, Toiletry and Perfumery Association (COLIPA) para el índice FPS_{in vitro}: protección baja (6,0 ≤ FPS_{in vitro} ≤ 14,9), protección media (15,0 ≤ FPS_{in vitro} ≤ 29,9), protección alta (30,0 ≤ FPS_{in vitro} ≤ 59,9) y protección muy alta (FPS_{in vitro} ≥ 60,0). Las pautas de la FDA y COLIPA indican que un λc ≥ 370 nm define la protección de amplio espectro. En letra negrilla se resaltan los datos o valores promisorios.

Tabla 3. Constituyentes de aceites esenciales y extractos promisorios con propiedades fotoprotectoras contra el daño genético producido por la radiación UV. Se presentan los correspondientes valores de la concentración mínima que produce inhibición significativa ($p \leq 0,05$) del efecto genotóxico (CIG) y la actividad antioxidante medida mediante el método ORAC (Huang, *et al.*, 2002). Se presentan los valores de absorptividad molar (ϵ) y los índices *in vitro* de fotoprotección $\text{SPF}_{in vitro}$ y λ_c de cada compuesto.

Compuestos	CIG (μM)	Valor ORAC ($\mu\text{mol Trolox}^{\text{®}}$ /g sustancia)	$\epsilon_{295/315\text{nm}}$ ($\text{Lmol}^{-1}\text{cm}^{-1}$)	$\text{FPS}_{in vitro}$	λ_c
Apigenina	7 ± 0	24500 ± 615	2270 ± 13 / 2430 ± 13	38,3 ± 24,3	370,0 ± 0,0
Carvacrol	25414 ± 0	3410 ± 50	17 ± 0 / 1 ± 0	1,0 ± 0,0	280,0 ± 0,0
β -xariofileno	1911 ± 0	2800 ± 109	127 ± 0 / 121 ± 0	17,0 ± 0,2	380,0 ± 0,0
Curcumina	33 ± 0	4350 ± 77	19644 ± 11 / 18659 ± 12	5,9 ± 0,1	390,0 ± 0,0
<i>p</i> -cimeno	104151 ± 0	219 ± 2	1 ± 0 / 1 ± 0	0,2 ± 0,0	320,0 ± 0,0
GEGC	108 ± 0	13200 ± 531	6825 ± 3,15 / 1913 ± 2	5,0 ± 0,0	300,0 ± 0,0
Naringenina	38 ± 0	27600 ± 429	2764 ± 1 / 1473 ± 3	0,3 ± 0,0	320,0 ± 0,0
Pinocebrina	15 ± 0	20500 ± 128	13475 ± 11 / 5447 ± 4	14,8 ± 0,1	310,0 ± 0,0
Quercetina	26 ± 0	34000 ± 1531	2739 ± 8 / 2583 ± 8	2,4 ± 0,0	380,0 ± 0,0
Timol	8373 ± 0	2900 ± 103	32 ± 1 / 2 ± 0	1,0 ± 0,0	280,0 ± 0,0

NI: sin inhibición. NE: No evaluado. Diferentes categorías establecidas por la *Food and Drugs Administration* (FDA) de los Estados Unidos y por la *European Cosmetic, Toiletry and Perfumery Association* (COLIPA) para el índice $\text{FPS}_{in vitro}$: protección baja ($6,0 \leq \text{FPS}_{in vitro} \leq 14,9$), protección media ($15,0 \leq \text{FPS}_{in vitro} \leq 29,9$), protección alta ($30,0 \leq \text{FPS}_{in vitro} \leq 59,9$) y protección muy alta ($\text{FPS}_{in vitro} \geq 60,0$). Las pautas de la FDA y COLIPA indican que un $\lambda_c \geq 370$ nm define la protección de amplio espectro. En letra negrilla se resaltan los datos o valores promisorios.

antigenotóxico contra la radiación ultravioleta (por ejemplo, apigenina, GEGC, naringenina, pinocebrina y quercetina) presentan, además, una elevada actividad antioxidante según el método ORAC (Tabla 3). Sin embargo, un análisis de correlación indicó que la actividad antigenotóxica de todos estos compuestos se correlacionaba negativamente con su actividad antioxidante ($R = -0,55$ y $p < 0,009$ en una prueba de correlación producto-momento), lo que sugiere que existen modos de acción diferentes para estos dos tipos de bioactividad (Fuentes, *et al.*, 2017).

En la Tabla 3, se presentan, además, los datos de absorptividad molar (ϵ) de los compuestos estudiados en longitudes de ondas relevantes en términos de fotoprotección: $\lambda = 295$ nm (Figura S2) y $\lambda = 315$ nm (Ikehata, *et al.*, 2013b). Los valores de ϵ de cada compuesto fueron como sigue: curcumina > pinocebrina > GEGC > quercetina > naringenina > apigenina > β -cariofileno > timol > carvacrol > *p*-cimeno. En correspondencia con sus espectros de absorbancia (Figura S3, <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/841/2550>), la curcumina, la quercetina y la apigenina presentaron valores de ϵ muy similares a $\lambda = 295$ nm y $\lambda = 315$ nm. Por el contrario, la pinocebrina, la GEGC y la naringenina registraron valores de ϵ superiores a $\lambda = 295$ nm que a $\lambda = 315$ nm. Los valores de ϵ calculados coincidieron con los reportados previamente para algunos de estos compuestos (Stevanato, *et al.*, 2014).

Con base en los valores del índice $\text{FPS}_{in vitro}$, la eficacia fotoprotectora frente a los rayos UVB de los compuestos fue la siguiente: apigenina (alta) > β -cariofileno (medio) > pinocebrina (bajo). Por su parte, el índice λ_c indicó que la apigenina, el β -cariofileno, la curcumina y la quercetina

son fotoprotectores de amplio espectro ($\lambda_c \geq 370$ nm). El hecho de que estos compuestos con actividad antigenotóxica frente a los rayos UVB actúen como filtros solares respalda la hipótesis de que el efecto antigenotóxico de algunos de estos compuestos, detectado con el SOS Chromotest, está vinculado a su capacidad de absorción de radiación ultravioleta, lo que resulta en la inhibición de la formación de los CPD y, por ende, en la no inducción de la respuesta SOS (Figura 1). Esta hipótesis se vio respaldada, además, por el hecho de que la cepa microbiana usada en el SOS Chromotest (*E. coli* PQ37) es altamente sensible a la radiación ultravioleta (Prada-Medina, *et al.*, 2016), dado que carece de la NER (*uvrA*) y porque esta no restaura la división celular después del tratamiento con radiación ultravioleta (Estévez-Castro, *et al.*, 2018).

La hipótesis de que los componentes mayoritarios del tipo flavonoide actúan inhibiendo la formación de fotoproductos se confirmó en un estudio *in vitro* usando el ensayo del cometa en células humanas (García-Forero, *et al.*, 2019). En este estudio se usó una variante enzimática del ensayo del cometa que permitió la detección de los CPD en células tratadas con radiación ultravioleta y facilitó el estudio del efecto antigenotóxico de algunos compuestos flavonoides. En el estudio se determinó que los flavonoides apigenina, naringenina y pinocebrina, especialmente el primero y el último, reducían la formación de los CPD en células humanas tal como lo hicieron en bacterias. Este hallazgo, conjuntamente con los datos de la eficacia fotoprotectora, indica que actúan como filtros UV como se ha establecido en estudios previos (Saewan & Jimtaisong, 2013; Stevanato, *et al.*, 2014). Con base en estos resulta-

dos, se puede concluir que la pinocembrina podría ser útil en la fotoprotección contra la radiación UVB, mientras que la apigenina podría considerarse un fotoprotector de amplio espectro.

Aunque el hallazgo en torno a la presencia de los compuestos flavonoides apigenina y pinocembrina en plantas colombianas y su actividad fotoprotectora no constituyen un nuevo descubrimiento para la ciencia, nuestros estudios aportan información sobre el potencial de la flora colombiana como una fuente de estos compuestos (Stashenko, *et al.*, 2013; Stashenko & Martínez, 2018), en especial para el desarrollo de bloqueadores solares. Nuestros resultados sobre la prospección del potencial de fotoprotección de la flora colombiana son comparables con los obtenidos en Brasil (Velasco, *et al.*, 2008; Nunes, *et al.*, 2018), en India (Korać & Khambholja, 2011) y en Polonia (Jarzycka, *et al.*, 2013).

Como se deduce de la Figura S1, los compuestos fotoprotectores pueden modular diferentes funciones celulares mediante múltiples mecanismos de acción. Un patrón similar se evidenció en los extractos de algunas especies de plantas que resultaron promisorias en nuestro estudio. El mejor ejemplo, fue la especie *Lippia origanoides*, la cual tiene actividad antioxidante (Stashenko, *et al.*, 2008), antiviral (Meneses, *et al.*, 2009), antibacteriana (Bueno-Sánchez, *et al.*, 2009), antiprotozoaria (Escobar, *et al.*, 2010), antigenotóxica (Vicuña, *et al.*, 2010; López, *et al.*, 2011), fotoprotectora (Fuentes, *et al.*, 2017; Quintero-Ruiz, *et al.*, 2017) y antitumoral (Raman, *et al.*, 2017, 2018). En un trabajo reciente (García-Bores, *et al.*, 2017) se demostró que *Lippia graveolens*, una especie mexicana sinónimo de *L. origanoides* (Santamaría-Acevedo, *et al.*, 2018) con alto contenido de pinocembrina, inhibió el desarrollo de tumores en ratón inducido por la radiación UVB. En su conjunto, estos estudios respaldan el uso de este quimiotipo de la especie *L. origanoides* en quimiopreención de la fotocarcinogénesis.

Futuros desarrollos

En resumen, los datos descritos aquí indican que varias plantas en Colombia contienen compuestos con potencial para el desarrollo de bloqueadores solares. Estos compuestos pueden presentar una variedad de efectos al actuar como filtros solares y poseer propiedades antioxidantes, antigenotóxicas, fotoprotectoras y antitumorales, las cuales son útiles en la fotoprotección. Sin embargo, antes de poder usarlas en la preparación de bloqueadores solares será necesario atender los siguientes temas.

Primero, se conoce poco sobre su toxicidad y efecto genotóxico. Por lo tanto, se deben desarrollar estudios de toxicidad crónica y subcrónica, de mutagenicidad, de irritabilidad usando diferentes ensayos efectivos para tales fines (Pfuhler, *et al.*, 2014) y siguiendo los estándares internacionales para esta clase de productos (Eastmond, *et al.*, 2009). Ya se ha probado la utilidad del ensayo SOS Chromotest desarrollado en formato de microplacas de 96 pozos para la

evaluación de plantas medicinales (Sánchez-Lamar, *et al.*, 2002, 2008; Fuentes, *et al.*, 2006ab) y moléculas puras (Díaz-Durán, *et al.*, 2015). Sin embargo, se requieren ensayos de evaluación genotóxica que midan el daño genético en diferentes niveles de expresión (por ejemplo, el del cometa, el de micronúcleo, las aberraciones cromosómicas). En este sentido, ya nuestro grupo de investigación probó la utilidad del ensayo del cometa para la evaluación genotóxica de biopesticidas (Valencia, *et al.*, 2011; Meza-Joya, *et al.*, 2013, 2017), pero será necesario desarrollar nuevas plataformas con este ensayo que permitan una mejor capacidad de escrutinio (Sykora, *et al.*, 2018) y sean de utilidad en el marco de proyectos de bioprospección.

Segundo, algunos de los compuestos caracterizados en este estudio como promisorios en fotoprotección (por ejemplo, apigenina, *trans*- β -cariofileno, curcumina, pinocembrina y quercetina) son costosos en su forma pura. Por ello, el uso de fracciones vegetales enriquecidas con dichos compuestos puede ser una opción más factible y viable para el desarrollo de bloqueadores solares. Con ese propósito, se requerirá trabajar en la optimización de los métodos disponibles para la micropropagación de especies de plantas promisorias (Herrera-Moreno, *et al.*, 2013; Naranjo-Gómez, *et al.*, 2018), con el fin de asegurar una fuente permanente de materia prima para la producción de bloqueadores solares.

Tercero, con la excepción de la especie *L. origanoides*, se conoce muy poco sobre el modo de acción de las moléculas que componen los extractos de plantas promisorias en fotoprotección. En tal sentido, se requerirá profundizar en el estudio de la composición química de estas plantas y en el modo de acción de sus componentes químicos.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por Colciencias a través del “Patrimonio Autónomo Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, Francisco José de Caldas” (N° RC-0572–2012); por los Ministerios de Educación y de Comercio y Turismo, el ICETEX-Colombia Científica, el Fondo José de Caldas (subvención N° RC-FP44842-212-2018) y por la Universidad Industrial de Santander (proyectos VIE-5154, VIE-5176, BPP-UIS-1281). El autor agradece a las doctoras Elena E. Stashenko y Martha P. Ramírez por sus útiles comentarios sobre el manuscrito. Mis agradecimientos van también a todos los estudiantes de la Escuela de Biología de la UIS que desarrollaron sus trabajos de tesis de pregrado y posgrado en el marco de los proyectos mencionados y que son citados a lo largo del manuscrito: Gloria Carolina Vicuña Giraldo, Adriana García Forero, Natalia Olivar Rincón, Molkary Andrea López de la Torre, Nathalia Quintero Ruiz, Leidy Tatiana Díaz Duran, Diana Milena Basto Lozano, Edison Rodrigo Sánchez Ortiz, Elke Tatjana Aristizabal Tessmer, Juan Gabriel Quecho Sarmiento, Lady Johanna Cely Coronado, Rowens Andreick Cristancho Gómez, Natalia Rey Castellano, Diego

Alberto Contreras García, Liliana Santamaría Acebedo, Carlos Felipe Estévez Castro, Diego Armando Villamizar Mantilla, Dairo Arley Franco Niño y Silvia Juliana Florez González, especialmente a mis estudiantes César Augusto Prada Medina y Jhon Alexander Suescún Sepúlveda, por su colaboración en la preparación de las figuras contenidas en el manuscrito.

Material suplementario

Figura S1. Efectos adversos producidos por la radiación ultravioleta en la piel humana. Se presentan aquellos compuestos antioxidantes que han sido reconocidos en la literatura científica por su utilidad en fotoprotección. Para cada compuesto, se especifican los efectos biológicos adversos que pueden modular. Ácido cafeico (5), ácido *p*-cumárico (1) y ácido felúrico (1), apigenina (2, 3, 4, 7 y 8), cianidina-3-O-glucósido (5), curcumina (2, 3, 4 y 7), delphinidina (2, 4 y 7), 5,7-dimetoxiflavona (2 y 5), GEGC (2, 3, 4, 5, 7, 8 y 9), fisetina (2 y 4), genisteína (2, 4 y 5) honokiol (3, 4 y 7) quercetina (2 y 4), licopeno (3, 4, 5 y 7) luteolina (4) pomegranato (2, 4, 5, 7 y 9), proantocianidina (2, 3 y 5), resveratrol (2, 3, 4, 5, 7 y 9), silimarina (1, 2, 3, 4, 5, 7, 8 y 9), sulforafano (3, 4 y 5), vitamina A (4), vitamina C (2, 4 y 5), vitamina E (2, 4 y 7). Las abreviaciones usadas en la figura no citadas previamente son las siguientes: cinasas dependientes de ciclinas (QDC), hormona estimuladora de melanocitos α (HEM- α), factor de transcripción nuclear kB (FN-kB), proteína efectora del control del ciclo celular (p21), antígeno nuclear de proliferación celular (ANPC), interleucinas (IL), pro-opiomelanocortina (POMC), factor de necrosis tumoral α (FNT- α), factor de crecimiento transformante (FCT- β), proteína activadora 1 (PA-1), metalopeptidasas de matriz (MPM), mieloperoxidasa (MPO), glutatión (GSH), glutatión peroxidasa (GPX), catalasa (CAT), superóxido dimutasa (SOD) y transductor de señal y activador de la transcripción 3 (TSAT3). En la elaboración de la figura se consideró la información contenida en los siguientes trabajos de revisión: **Adhami, et al.** (2008), **Chen, et al.** (2012), **Chhabra, et al.** (2017), **Monte de Oca, et al.** (2017). Vea la figura S1 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/841/2548>

Figura S2. Comparación de los espectros de acción de inflamación (eritema), frecuencia de mutación y daño genético (DPC) producidos por la radiación UV en piel humana. La figura fue modificada a partir de los datos publicados por **Ikehata, et al.** (2013a). Vea la figura S2 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/841/2549>

Figure S3. Espectro de absorbancia UV (200–400 nm) de los compuestos **A.** Apigenina, **B.** naringenina, **C.** pinocembrina, **D.** curcumina, **E.** quercetina, **F.** GEGC, **G.** carvacrol/timol, **H.** β -cariofileno, **I.** *p*-cimeno, a las diferentes concentraciones evaluadas en cada caso. Nótese que el compuesto *p*-cimeno absorbe solo en la zona UVC (100–280 nm) del espectro UV, y los compuestos naringenina, pinocembrina, GEGC y carvacrol en las zonas UVC y UVB (315–280 nm), mientras que los restantes compuestos (apigenina, curcumina, quercetina y β -cariofileno), lo hacen a lo largo de todo el rango UV estudiado (200–400 nm). Vea la figura S3 en: <https://www.racefyn.co/index.php/racefyn/article/view/841/2550>

Conflicto de intereses

El autor declara que no tiene conflicto de intereses.

Referencias

- Adams DH, Shou Q, Wohlmuth H, Cowin AJ.** (2016). Data on keratin expression in human cells cultured with Australian native plant extracts. *Data in Brief.* **7:** 848-867.
- Adhami, V.M., Syed, D.N., Khan, N., Afaq, F.** (2008). Phytochemicals for prevention of solar ultraviolet radiation-induced damages. *Photochem. Photobiol.* **84:** 489-500.
- Afaq, F. & Katiyar, S.K.** (2011). Polyphenols: Skin Photoprotection and Inhibition of Photocarcinogenesis. *Mini Rev. Med. Chem.* **11:** 1200-1215.
- Arad, S., Konnikov, N., Goukassian, D.A., Gilchrest, B.A.** (2007). Quantification of inducible SOS-like photoprotective responses in human skin. *J. Invest. Dermatol.* **127:** 2629-2636
- Arad, S., Zattra, E., Hebert, J., Epstein, E.H., Goukassian, D.A., Gilchrest, B.A.** (2008). Topical thymidine dinucleotide treatment reduces development of ultraviolet-induced basal cell carcinoma in Ptch-1^{+/-} mice. *Am. J. Pathol.* **172:** 1248-1255.
- Bendová, H., Akerman, J., Krejčí, A., Kubáč, L., Jírová, D., Kejlová, K., Kolářová, H., Brabec, M., Malý, M.** (2007). In vitro approaches to evaluation of Sun Protection Factor. *Toxicology in Vitro.* **21:** 1268-1275.
- Brash, D.E.** (2015). UV signature mutations. *Photochem. Photobiol.* **91:** 15-26.
- Brem, R., Guven, M., Karran, P.** (2017). Oxidatively-generated damage to DNA and proteins mediated by photosensitized UVA. *Free Radic. Biol. Med.* **107:** 101-109.
- Bravo, K., Duque, L., Ferreres, F., Moreno, D.A., Osorio, E.** (2017). *Passiflora tarminiana* fruits reduce UVB-induced photoaging in human skin fibroblasts. *J. Photochem. Photobiol. B* **168:** 78-88.
- Bueno-Sánchez, J.G., Martínez-Morales, J.R., Stashenko, E.E., Ribón, W.** (2009). Anti-tubercular activity of eleven aromatic and medicinal plants occurring in Colombia. *Biomédica.* **29:** 51-60.
- Césarini, J.P. & Demanneville, S.** (2000). Toward a genotoxic protection factor. *Radiat. Prot. Dosim.* **91:** 89-91.
- Chandra-Pal, H., Athar, M., Elmets, C.A., Afaq, F.** (2015). Fisetin inhibits UVB-induced cutaneous inflammation and activation of PI3K/AKT/NF κ B signaling pathways in SKH-1 hairless mice. *Photochem. Photobiol.* **91:** 225-234.
- Chen, L., Hu, J.Y., Wang, S.Q.** (2012). The role of antioxidants in photoprotection: A critical review. *J. Am. Acad. Dermatol.* **67:** 1013-1024.
- Chhabra, G., Ndiaye, M.A., García-Peterson, L.M., Ahmad, N.** (2017). Melanoma chemoprevention: Current status and future prospects. *Photochem. Photobiol.* **93:** 975-989.
- Chiang, H.M., Chan, S.Y., Chu, Y., Wen, K.C.** (2015). Fisetin ameliorated photodamage by suppressing the mitogen-activated protein kinase/matrix metalloproteinase pathway and nuclear factor- κ B pathways. *J. Agric. Food Chem.* **63:** 4551-4560.
- Chua, L.S., Lee, S.Y., Abdullah, N., Sarmini, M.R.** (2012). Review on *Labisia pumila* (Kacip Fatimah): bioactive phytochemicals and skin collagen synthesis promoting herb. *Fitoterapia.* **83:** 1322-1335.

- Cos, P., Vlietinck, A.J., Vanden-Berghe, D., Maes, L. (2006). Antiinfective potential of natural products: How to develop a stronger in vitro 'proof-of-concept'. *J. Ethnopharmacol.* **106**: 290-302.
- Cui, R., Widlund, H.R., Feige, E., Lin, J.Y., Wilensky, D.L., Igras, V.E., D'Orazio, J., Fung, C.Y., Schanbacher, C.F., Granter, S.R., Fisher, D.E. (2007). Central role of p53 in the suntan response and pathologic hyperpigmentation. *Cell.* **128**: 853-864.
- Díaz-Durán, L.T., Olivar-Rincón, N., Puerto-Galvis, C.E., Kouznetsov, V., Fuentes, J.L. (2015). Genotoxicity risk assessment of substituted quinolines using the SOS chromotest. *Environmental Toxicology.* **30**: 278-292.
- Eastmond, D.A., Hartwig, A., Anderson, D., Anwar, W.A., Cimino, M.C., Dobrev, I., Douglas, G.R., Nohmi, T., Phillips, D.H., Vickers, C. (2009). Mutagenicity testing for chemical risk assessment: update of the WHO/IPCS harmonized scheme. *Mutagenesis* **24**: 341-349.
- Eller, M.S., Yaar, M., Gilchrest, B.A. (1997). Enhancement of DNA repair in human skin cells by thymidine dinucleotides: Evidence for a p53-mediated mammalian SOS response. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **94**: 12627-12632.
- Eller, M.S., Asarch, A., Gilchrest, B.A. (2008). Photoprotection in human skin- A multifaceted SOS response. *Photochem. Photobiol.* **84**: 339-349.
- Elmets, C.A., Singh, D., Tubesing, K., Matsui, M., Katiyar, S., Mukhtar, H. (2001). Cutaneous photoprotection from ultraviolet injury by green tea polyphenols. *J. Am. Acad. Dermatol.* **44**: 425-432.
- Escobar, P., Leal, S.M., Herrera, L.V., Martínez, J.R., Stashenko, E.E. (2010). Chemical composition and anti-protozoal activities of Colombian *Lippia* spp essential oils and their major components. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz.* **105**: 184-190.
- Escobar, P.A., Kemper, R.A., Tarca, J., Nicolette, J., Kenyon, M., Glowienke, S., Sawant, S.G., Christensen, J., Johnson, T.E., McKnight, C., Ward, G., Galloway, S.M., Custer, L., Gocke, E., O'Donovan, M.R., Braun, K., Snyder, R.D., Mahadevan, B. (2013). Bacterial mutagenicity screening in the pharmaceutical industry. *Mutat. Res.* **752**: 99-118.
- Estévez-Castro, C.F., Serment-Guerrero, J.H., Fuentes, J.L. (2018). Influence of the *uvrA*, *recJ* and *recN* gene mutations on the nucleoid reorganization in UV-treated *Escherichia coli* cells. *FEMS Microbiology Letters* **365**: fny110.
- European Cosmetic, Toiletry and Perfumery Association (COLIPA). (2011). Method for *In Vitro* Determination of UVA Protection. *In vitro* method for the determination of the UVA protection factor and "critical wavelength" values of sunscreen products. Guidelines March 2011.
- Food and Drug Administration. (2011). Department of Health and Human Services. 21 CFR Parts 201 and 310. [Docket No. FDA-1978-N-0018-0698]. Labeling and Effectiveness Testing; Sunscreen Drug Products for Over-the-Counter Human Use. Final Rule. *Fed. Regist.* **76**: 35620-35665.
- Fourtanier, A., Moyal, D., Maccario, J., Compan, D., Wolf, P., Quehenberger, F., Cooper, K., Baron, E., Halliday, G., Poon, T., Seed, P., Walker, S.L., Young, A.R. (2005). Measurement of Sunscreen Immune Protection Factors in Humans: A Consensus Paper. *J. Invest. Dermatol.* **125**: 403-409.
- Fuentes, J.L., Vernhe, M., Cuetara, E.B., Sánchez-Lamar, A., Santana, J.L., Llagostera, M. (2006a). Tannins from barks of *Pinus caribaeae* Morelet protect *Escherichia coli* cells against DNA damage induced by γ -rays. *Fitoterapia.* **77**: 116-120.
- Fuentes, J.L., Alonso, A., Cuétara, E., Vernhe, M., Álvarez, N., Sánchez-Lamar, A., Llagostera, M. (2006b). Usefulness of SOS Chromotest in the study of medicinal plant as radioprotectors. *Int. J. Radiat. Biol.* **82**: 323-329.
- Fuentes, J.L., García-Forero, A., Quintero-Ruiz, N., Prada-Medina, C.A., Rey-Castellanos, N., Franco-Niño, D.A., Contreras-García, D.A., Córdoba-Campo, Y., Stashenko EE. (2017). The SOS Chromotest applied for screening plant antigenotoxic agents against ultraviolet radiation. *Photochem. Photobiol. Sci.* **16**: 1424-1434.
- Ganesan, A. & Hanawalt P. (2016). Photobiological origins of the field of genomic maintenance. *Photochem. Photobiol.* **92**: 52-60.
- García-Bores, A.M., Espinosa-González, A.M., Reyna-Campos, A., Cruz-Toscano, S., Benítez-Flores, J.C., Hernández-Delgado, C.T., Flores-Maya, S., Urzúa-Meza, M., Peñalosa-Castro, I., Céspedes-Acuña, C.L., Ávila-Acevedo, J.G. (2017). *Lippia graveolens* photochemopreventive effect against UVB radiation-induced skin carcinogenesis. *J. Photochem. Photobiol. B* **167**: 72-81.
- García-Forero, A., Villamizar-Mantilla, D.A., Núñez, L.A., Ocazone, R.E., Stashenko, E.E., Fuentes, J.L. (2019). Photoprotective and antigenotoxic effects of the flavonoids apigenin, naringenin, and pinocembrin. *Photochem. Photobiol.* **95**: 1010-1018. Doi: 10.1111/php.13085.
- Gatz, S.A. & Wiesmuller, L. (2006). p53 in recombination and repair. *Cell Death Differ.* **13**: 1003-1016.
- Giampieri, F., Álvarez-Suárez, J.M., Tulipani, S., Gonzàles-Paramàs, A.M., Santos-Buelga, C., Bompadre, S., Quiles, J.L., Mezzetti, B., Battino, M. (2012). Photoprotective potential of strawberry (*Fragaria* × *Ananassa*) extract against UV-A irradiation damage on human fibroblasts. *J. Agric. Food Chem.* **60**: 2322-2327.
- Goukassian, D.A., Sharov, A., Rhodes, J., Coleman, C., Eller, M.S., Sharova, T., Bhawan, J., Gilchrest, B.A. (2012). Topical application of thymidine dinucleotide to newborn mice reduces and delays development of UV-induced melanomas. *J. Invest. Dermatol.* **132**: 2664-2666.
- Herrera-Moreno, A.M., Carranza, C.E., Chacón-Sánchez, M.I. (2013). Establishment of propagation methods for growing promising aromatic plant species of the *Lippia* (Verbenaceae) and *Tagetes* (Asteraceae) genera in Colombia. *Agronomía Colombiana.* **31**: 27-37.
- Herrling, T., Jung, K., Chatelain, E., Langenauer, M. (2006). Radical Skin/Sun Protection Factor RSF –Protection against UV-induced Free Radicals in Skin. *SÖFW-Journal.* **132**: 24-30.
- Huang, D., Ou, B., Hampsch-Woodill, M., Flanagan, J.A., Prior, R.L. (2002). High-throughput assay of oxygen radical absorbance capacity (ORAC) using a multichannel liquid handling system coupled with a microplate fluorescence reader in 96-well format. *J. Agric. Food Chem.* **50**: 4437-4444.
- Huisman, O. & D'Ari, R. (1981). An inducible DNA replication-cell division coupling mechanism in *Escherichia coli*. *Nature.* **290**: 797-799.

- Ikehata, H., Higashi, S., Nakamura, S., Daigaku, Y., Furusawa, Y., Kamei, Y., Watanabe, M., Yamamoto, K., Hieda, K., Munakata, N., Ono, T.** (2013). Action spectrum analysis of UVR genotoxicity for skin: The border wavelengths between UVA and UVB can bring serious mutation loads to skin. *J. Invest. Dermatol.* **133**: 1850-1856.
- Jansen, R., Osterwalder, U., Wang, S.Q., Burnett, M., Lim, H.W.** (2013). Photoprotection: Part II. Sunscreen: development, efficacy, and controversies. *J. Am. Acad. Dermatol.* **69**: 867.e1-14.
- Jarzycka, A., Lewińska, A., Gancarz, R., Wilk, K.A.** (2013). Assessment of extracts of *Helichrysum arenarium*, *Crataegus monogyna*, *Sambucus nigra* in photoprotective UVA and UVB; photostability in cosmetic emulsions. *J. Photochem. Photobiol. B* **128**: 50-57.
- Jonason, A.S., Kunala, S., Price, G.J., Restifo, R.J., Spinell, H.M., Persing, J.A., Leffell, D.J., Tarone, R.E., Brash, D.E.** (1996). Frequent clones of p53-mutated keratinocytes in normal human skin. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **93**: 14025-14029.
- Kada, T. & Shimoi K.** (1987). Desmutagens and bio-antimutagens - Their modes of action. *BioEssays.* **7**: 113-116.
- Kneuttinger, A.C., Kashiwazaki, G., Prill, S., Heil, K., Müller, M., Carell, T.** (2014). Formation and direct repair of UV-induced dimeric DNA pyrimidine lesions. *Photochem. Photobiol.* **90**: 1-14.
- Korać, R.R. & Khambholja, K.M.** (2011). Potential of herbs in skin protection from ultraviolet radiation. *Pharmacognosy Reviews.* **5**: 164-173.
- Linos, E., Swetter, S.M., Cockburn, M.G., Colditz, G.A., Clarke, C.A.** (2009). Increasing burden of melanoma in the United States. *J. Invest. Dermatol.* **129**: 1666-1674.
- López, M.A., Stashenko, E.E., Fuentes, J.L.** (2011). Chemical composition and antigenotoxic properties of the *Lippia alba* essential oils. *Genet. Mol. Biol.* **34**: 479-488.
- Lund, L.P. & Timmins, G.S.** (2007). Melanoma, long wavelength ultraviolet and sunscreens: Controversies and potential resolutions. *Pharmacol. Ther.* **114**: 198-207.
- Mayer, S., Eller, M.S., Gilchrist, B.A.** (2001). The SOS response in human skin. *Curr. Probl. Dermatol.* **13**: 153-158.
- Mejía-Giraldo, J.C., Henao-Zuluaga, K., Gallardo, C., Atehortúa, L., Puertas-Mejía, M.A.** (2016a). Novel *in vitro* antioxidant and photoprotection capacity of plants from high altitude ecosystems of Colombia. *Photochem. Photobiol.* **92**: 150-157.
- Mejía-Giraldo, J.C., Winkler, R., Gallardo, C., Sánchez-Zapata, A.M., Puertas-Mejía, M.A.** (2016b). Photoprotective potential of *Baccharis antioquiensis* (Asteraceae) as natural sunscreen. *Photochem. Photobiol.* **92**: 742-752.
- Meneses, R., Ocazonez, R.E., Martínez, J.R., Stashenko, E.E.** (2009). Inhibitory effect of essential oils obtained from plants grown in Colombia on yellow fever virus replication *in vitro*. *Ann. Clin. Microbiol. Antimicrob.* **8**: 8.
- Metral, E., Rachidi, W., Damour, O., Demarne, F., Bechetoille, N.** (2018). Long-term genoprotection effect of *Sechium edule* fruit extract against UVA irradiation in keratinocytes. *Photochem. Photobiol.* **94**: 343-350.
- Meza-Joya, F.L., Ramírez-Pinilla, M.P., Fuentes, J.L.** (2017). The direct-developing frog *Eleutherodactylus johnstonei* (Eleutherodactylidae) as biological model for the study of toxic, cytotoxic, and genotoxic effects of agrochemicals. In: Ecotoxicological and Genotoxicological Non-traditional Terrestrial Models, Issues in Toxicology 32, Marcelo L. Larramendy (editors), Chapter 10, Royal Society of Chemistry (RSC) Publishers, Cambridge, United Kingdom, p. 211-227.
- Mesa, F.L., Ramírez, M.P., Fuentes, J.L.** (2013). Toxic, cytotoxic and genotoxic effects of a glyphosate formulation (Roundup®SL-Cosmoflux®411F) in the direct developing frog *Eleutherodactylus johnstonei*. *Environ. Mol. Mutagen.* **54**: 362-373.
- Montes de Oca, M.K., Pearlman, R.L., McClees, S.F., Strickland, R., Afaq, F.** (2017). Phytochemicals for the prevention of photocarcinogenesis. *Photochem. Photobiol.* **93**: 956-974.
- Mukherjee, P.K., Maity, N., Nema, N.K., Sarkar, B.K.** (2011). Bioactive compounds from natural resources against skin aging. *Phytomedicine.* **19**: 64-73.
- Naranjo-Gómez, E.J., Puertas-Mejía, M.A., Mejía-Giraldo, J.C., Amaya-Nieto, A.Z., Atehortúa, L.** (2018). Micro-propagation of *Baccharis antioquiensis* (Asteraceae) and photoinduction of polyphenols by UV radiation. *Rev. Biol. Trop.* **66**: 754-764.
- Narayanan, D.L., Saladi, R.N., Fox, J.L.** (2010). Ultraviolet radiation and skin cancer. *Int. J. Dermatol.* **49**: 978-986.
- Nunes, A.R., Rodrigues, A.L.M., Brito de Queiroz, D., Vieira, I.G.P., Neto, J.F.C., Calixto Junior, J.T., Tintino, S.R., Maia de Morais, S., Coutinho, H.D.M.** (2018). Photoprotective potential of medicinal plants from Cerrado biome (Brazil) in relation to phenolic content and antioxidant activity. *J. Photochem. Photobiol. B* **189**: 119-123.
- Parrish, J., Jaenicke, K.F., Anderson, R.R.** (1982). Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin. *Photochem. Photobiol.* **36**: 187-191.
- Pereira, B.K., Rosa, R.M., da Silva, J., Guecheva, T.N., de Oliveira, I.M., Ianisteki, M., Benvegnú, V.C., Furtado, G.V., Ferraz, A., Richter, M.F., Schroder, N., Pereira, A.B., Henriques, J.A.P.** (2009). Protective effects of three extracts from Antarctic plants against ultraviolet radiation in several biological models. *J. Photochem. Photobiol. B* **96**: 117-129.
- Poon, F., Kang, S., Chien, A.L.** (2015). Mechanisms and treatments of photoaging. *Photodermatol. Photoimmunol. Photomed.* **31**: 65-74.
- Prada-Medina, C.A., Aristizábal-Tessmer, E.T., Quintero-Ruiz, N., Serment-Guerrero, J., Fuentes, J.L.** (2016). Survival and SOS response induction in ultraviolet B irradiated *Escherichia coli* cells with defective repair mechanisms. *Int. J. Radiat. Biol.* **92**: 321-328.
- Puertas-Mejía, M.A., Gutiérrez-Villegas, M.A., Mejía-Giraldo, J.C., Winkler, R., Rojano, B.** (2018). *In vitro* UV absorption properties and radical scavenging capacity of *Morella parvifolia* (Benth.) Parra-Os. extracts. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences.* **54**: e17498.
- Pfuhler, S., Fautz, R., Ouedraogo, G., Latil, A., Kenny, J., Moore, C., Diembeck, W., Hewitt, N.J., Reisinger, K., Barroso, J.** (2014). The Cosmetics Europe strategy for animal-free genotoxicity testing: Project status up-date. *Toxicology in Vitro.* **28**: 18-23.
- Quillardet, P., Huisman, O., D'Ari, R., Hofnung, M.** (1982). SOS chromotest, a direct assay of induction of an SOS function in *Escherichia coli* K-12 to measure genotoxicity. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **79**: 5971-5975.

- Quillardet, P. & Hofnung, M.** (1984). Induction by UV light of the SOS function *sfhA* in *Escherichia coli* strains deficient or proficient in excision repair. *J. Bacteriol.* **157**: 35-38.
- Quintero, N., Stashenko, E.E., Fuentes, J.L.** (2012). The influence of organic solvents on genotoxicity and antigenotoxicity estimates in the SOS Chromotest. *Genet. Mol. Biol.* **35**: 503-514.
- Quintero-Ruiz, N., Córdoba-Campo, Y., Stashenko, E.E., Fuentes, J.L.** (2017). Antigenotoxicity effect against ultraviolet radiation-induced DNA damage of the essential oils from *Lippia* species. *Photochem. Photobiol.* **93**: 1063-1072.
- Raman, V., Fuentes, J.L., Stashenko, E.E., Levy, M., Levy, M.M., Camarillo, I.G.** (2017). A *Lippia organoides* extract induces cell cycle arrest, apoptosis and suppresses NF- κ B signaling in MDA-MB-231 triple-negative breast cancer cells. *Int. J. Oncol.* **51**: 1801-1808.
- Raman, V., Aryal, U.K., Hedrick, V., Mohallem-Ferreira, R., Fuentes, J.L., Stashenko, E.E., Levy, M., Levy, M.M., Camarillo, I.G.** (2018). Proteomic analysis reveals an extract of the plant *Lippia organoides* suppresses mitochondrial metabolism in triple-negative breast cancer cells. *J. Proteome Res.* **17**: 3370-3383.
- Reis Mansur, M.C.P.P., Guimarães Leitão, S., Cerqueira-Couthino, C., Vermelho, A.B., Silva, R.S., Presgrave, O.A.F., Leitão, A.A.C., Leitão, G.G., Ricci-Junior, E., Santos, E.P.** (2016). *In vitro* and *in vivo* evaluation of efficacy and safety of photoprotective formulation containing antioxidant extracts. *Rev. Bras. Farmacogn.* **26**: 251-258.
- Saewan, N. & Jimtaisong, A.** (2013). Photoprotection of natural flavonoids. *J. Appl. Pharm. Sci.* **3**: 129-141.
- Said, T., Dutot, M., Martin, C., Beaudeau, J.L., Boucher, C., Enee, E., Baudouin, C., Warnet, J.M., Rat, P.** (2007). Cytoprotective effect against UV-induced DNA damage and oxidative stress: Role of new biological UV filter. *Eur. J. Pharm. Sci.* **30**: 203-210.
- Sánchez-Lamar, A., Fonseca, G., Fuentes, J.L., Cozzi, R., Cundari, E., Fiore, M., Ricordy, R., Perticone, P., Degrassi, F., De Salvia, R.** (2008). Assessment of the genotoxic risk of *Punica granatum* L. (Punicaceae) whole fruit extracts. *J. Ethnopharmacol.* **115**: 416-422.
- Sánchez-Lamar, A., Fuentes, J.L., Fonseca, G., Alonso, A., Cápiro, N., Ferrer, M., Baluja, L., Fiore, M., De Salvia, R., Cozzi, R., Llagostera, M.** (2002). Assessment of the potential genotoxic risk of *Phyllanthus orbicularis* HBK aqueous extract using *in vitro* and *in vivo* assays. *Toxicol. Lett.* **136**: 87-96.
- Santamaría-Acebedo, L., Prada-Medina, C.A., Rondón-González, F., Stashenko, E.E., Martínez-Pérez, F.J., Levy, M., Levy, M.M., Fuentes, J.L.** (2018). Interspecific variation and genetic relationships among Colombian *Lippia* species based on Small Ribosomal Subunit (SRS) gene sequence analysis. *J. Herbs Spices Med. Plants.* **24**: 99-108.
- Sayre, R.M., Agin, P.P., LeeVee, G.J., Morlowe, E.** (1979). A comparison of *in vivo* and *in vitro* testing of sunscreens formulas. *Photochem. Photobiol.* **29**: 559-566.
- Schärer, O.D.** (2013). Nucleotide excision repair in eukaryotes. *Cold Spring Harb Perspect Biol.* **5**: a012609.
- Schlacher, K. & Goodman MF.** (2007). Lessons from 50 years of SOS DNA-damage-induced mutagenesis. *Nature Reviews.* **8**: 587-594.
- Schuch, A.P., Moraes, M.C.S., Yagura, T., Menck, C.F.M.** (2014). Highly sensitive biological assay for determining the photoprotective efficacy of sunscreen. *Environ. Sci. Technol.* **48**: 11584-11590.
- Schuch, A.P., Moreno, N.C., Schuch, N.J., Menck, C.F.M., García, C.C.M.** (2017). Sunlight damage to cellular DNA: Focus on oxidatively generated lesions. *Free Radic. Biol. Med.* **107**: 110-124.
- Stashenko, E.E., Ruiz, C., Muñoz, A., Castañeda, M., Martínez, J.** (2008). Composition and antioxidant activity of essential oils of *Lippia organoides* HBK grown in Colombia. *Nat. Prod. Commun.* **3**: 563-566.
- Stashenko, E.E., Martínez, J.R., Cala, M.P., Durán, D.C., Caballero, D.** (2013). Chromatographic and mass spectrometric characterization of essential oils and extracts from *Lippia* (Verbenaceae) aromatic plants. *J. Sep. Sci.* **36**: 192-202.
- Stashenko, E.E. & Martínez, J.R.** (2018). The expression of biodiversity in the secondary metabolites of aromatic plants and flowers growing in Colombia. In: Potential of essential oils, Hany A. El-Shemy (Ed.), Chapter 4, Intechopen, pp: 59-86. Doi: 10.5772/intechopen.78001.
- Stanfield, J., Osterwalder, U., Herzog, B.** (2010). *In vitro* measurements of sunscreen protection. *Photochem. Photobiol. Sci.* **9**: 489-494.
- Stevanato, R., Bertelle, M., Fabris, S.** (2014). Photoprotective characteristics of natural antioxidant polyphenols. *Regul. Toxicol. Pharmacol.* **69**: 71-77.
- Sundari, J., Selvaraj, R., Rajendra-Prasad, N., Elumalai, R.** (2013). *Jatropha curcas*, leaf and bark fractions protect against ultraviolet radiation-B induced DNA damage in human peripheral blood lymphocytes. *Environ. Toxicol. Pharmacol.* **36**: 875-882.
- Sykora, P., Witt, K.L., Revanna, P., Smith-Roe, S.L., Dismukes, J., Lloyd, D.G., Engelward, B.P., Sobol, R.W.** (2018). Next generation high throughput DNA damage detection platform for genotoxic compound screening. *Scientific Reports.* **8**: 2771.
- Tewari, A., Sarkany, R.P., Young, A.R.** (2012). UVA¹ induces cyclobutane pyrimidine dimers but not 6-4 photoproducts in human skin *in vivo*. *J. Invest. Dermatol.* **132**: 394-400.
- Ullrich, S.E.** (2005). Mechanisms underlying UV-induced immune suppression. *Mutat. Res.* **571**: 185-205.
- Vaid, M., Sharma, S.D., Katiyar, S.K.** (2010). Proanthocyanidins inhibit photocarcinogenesis through enhancement of DNA repair and Xeroderma Pigmentosum group A-dependent mechanism. *Cancer Prev. Res.* **3**: 1621-1619.
- Vaisman, A. & Woodgate, R.** (2017). Translesion DNA polymerases in eukaryotes: what makes them tick?. *Crit. Rev. Biochem. Mol. Biol.* **52**: 274-303.
- Valencia, L., García, A., Ramírez, M.P., Fuentes, J.L.** (2011). Estimates of DNA damage by the comet assay in the direct-developing frog *Eleutherodactylus johnstonei* (Anura: Eleutherodactylidae). *Genet. Mol. Biol.* **34**: 681-688.
- Velasco, M.V.R., Sarruf, F.D., Salgado-Santos, I.M.N., Haroutiounian-Filho, C.A., Kaneko, T.M., Baby, A.R.** (2008). Broad spectrum bioactive sunscreens. *Int. J. Pharm.* **363**: 50-57.
- Vernhes, M., González-Pumariiega, M., Andrade, L., Schuch, A.P., de Lima-Bessa, K.M., Menck, C.F.M., Sánchez-**

- Lamar, A.** (2013). Protective effect of a *Phyllanthus orbicularis*, aqueous extract against UVB light in human cells. *Pharm. Biol.* **51**: 1-7.
- Vicuña, G.C., Stashenko, E.E., Fuentes, J.L.** (2010). Chemical composition of the *Lippia origanoides* essential oils and their antigenotoxicity against bleomycin-induced DNA damage. *Fitoterapia.* **81**: 343-349.
- Vink, A.A. & Roza, L.** (2001). Biological consequences of cyclobutane pyrimidine dimers. *J. Photochem. Photobiol. B.* **65**: 101-104.
- Wang, S.Q., Xu, H., Stanfield, J.W., Osterwalder, U., Herzog, B.** (2017). Comparison of ultraviolet A light protection standards in the United States and European Union through in vitro measurements of commercial sunscreens. *J. Am. Acad. Dermatol.* **77**: 42-47.
- White, P.A. & Rasmussen, J.B.** (1996). SOS Chromotest results in a broader context: Empirical relationships between genotoxic potency, mutagenic potency, and carcinogenic potency. *Environ. Mol. Mutagen.* **27**: 270-305.
- White, P.A., Rasmussen, J.B., Blaise, C.** (1996). A semiautomated, microplate version of the SOS Chromotest for the analysis of complex environmental extracts. *Mutat. Res.* **360**: 51-74.
- Yamaba, H., Haba, M., Kunita, M., Sakaida, T., Tanaka, H., Yashiro, Y., Nakata, S.** (2016). Morphological change of skin fibroblasts induced by UV irradiation is involved in photoaging. *Exp. Dermatol.* **25** (Suppl 3): 45-51.
- Yamaguchi, L.F., Kato, M.J., Di Mascio, P.** (2009). Biflavonoids from *Araucaria angustifolia* protect against DNA UV induced damage. *Phytochemistry.* **70**: 615-620.
- Yeeles, J.T.P., Poli, J., Mariani, K.J., Pasero, P.** (2013). Rescuing Stalled or Damaged Replication Forks. *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* **5**: a012815.
- Young, A.R., Chadwick, C.A., Harrison, G.I., Nikaido, O., Ramsden, J., Potten, C.S.** (1998). The similarity of action spectra for thymine dimers in human epidermis and erythema suggests that DNA is the chromophore for erythema. *J. Invest. Dermatol.* **111**: 982-988.
- Zaidi, M.R., Day, C.P., Merlino, G.** (2008). From UVs to metastases: modeling melanoma initiation and progression in the mouse. *J. Invest. Dermatol.* **128**: 2381-2391.
- Zeiger, E.** (2007). What is needed for an acceptable antimutagenicity manuscript? *Mutat. Res.* **626**: 1-3.
- Zhang, W.J. & Björn, L.O.** (2009). The effect of ultraviolet radiation on the accumulation of medicinal compounds in plants. *Fitoterapia.* **80**: 207-218.
- Ziegler, A., Jonason, A.S., Leffell, D.J., Simon, J.A., Sharma, H.W., Kimmelman, J., Remington, L., Jacks, T., Brash, D.E.** (1994). Sunburn and p53 in the onset of skin cancer. *Nature.* **372**: 773-776.

Una convolución muy útil y unas derivadas ilustres

Carlos E. Mejía

Escuela de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 23 de julio del 2019

Resumen

En el artículo se exponen aspectos importantes sobre los operadores de molificación discreta y las derivadas fraccionarias. Los operadores de molificación se definen a partir de convoluciones con núcleos gaussianos truncados en una o en dos dimensiones. Se incluye aquí una descripción de sus orígenes y de sus principales propiedades, y se describen en detalle dos aplicaciones que indican su gran utilidad. Las aplicaciones se basan en ecuaciones diferenciales parciales difusivas con derivadas temporales fraccionarias, derivadas que, como se explicará más adelante, merecen el calificativo de ilustres. La primera aplicación consiste en la solución estable de un problema inverso de advección-dispersión con derivada temporal fraccionaria, en el que la concentración es desconocida en la frontera de un dominio unidimensional semiinfinito. La segunda aplicación es la solución estable de un problema inverso bidimensional de identificación de un término fuente en una ecuación de difusión con derivada temporal fraccionaria. En cada caso se incluye la descripción del problema, la implementación de la molificación, el método de solución y algunos experimentos numéricos. En cuanto al problema en dos dimensiones, se incluyen resultados recientemente publicados.

Palabras clave: Convolución; Derivadas fraccionarias; Molificación discreta; Problemas inversos.

A very useful convolution and some illustrious derivatives

Abstract

This paper deals with discrete mollification operators and fractional derivatives. The mollification operators are based on convolutions with truncated Gaussian kernels in one and two dimensions. We begin with a description of their origin and main properties and then we consider two applications that show the usefulness of these operators. Both applications are based on time-fractional diffusion equations. Fractional derivatives deserve to be called illustrious, as we will see later. The first application consists of the stable solution of an inverse problem for a time fractional advection-dispersion equation. The problem consists of the identification of the boundary concentration in a one-dimensional semi-infinite setting. The second application is the stable solution of a problem of source term identification in a bidimensional time-fractional diffusion equation. In each case, we include a description of the problem, the mollification implementation, the method of solution, and some numerical experiments. For the two dimensions problem we include results that were recently published.

Key words: Convolution; Fractional derivatives; Discrete mollification; Inverse problems.

Introducción

La palabra “molificar” significa “suavizar” y fue introducida en la matemática en un artículo de **Friedrichs** (1944). Así, hacer la convolución de una función con un núcleo gaussiano se denomina molificación y ciertamente tiene un efecto suavizante o regularizador. En este artículo nos referimos a una forma específica de suavizar funciones que consiste en calcular su convolución discreta con pesos definidos a partir de una campana gaussiana truncada. Dicha convolución, denominada “molificación discreta”, se puede definir en una y en dos dimensiones. El poder regularizador de la convolución con un núcleo gaussiano fue descrito por primera vez por **Manselli & Miller** (1980). Miller explicó su

idea de molificación a su estudiante doctoral Diego A. Murio y fue este quien emprendió la tarea de utilizar la molificación en una amplia serie de problemas, pues Manselli y Miller declinaron continuar con el tema y se dedicaron a otros asuntos.

La utilidad de la molificación discreta se ha comprobado en una gran variedad de problemas unidimensionales, como los descritos por **Mejía** (2007), **Acosta & Mejía** (2014),

Correspondencia:

Carlos E. Mejía; cemejia@unal.edu.co

Recibido: 29 de septiembre de 2018

Aceptado: 7 de junio de 2019

Editor: Jaime Lesmes Camacho

Murio (1993, 2002.) Las aplicaciones que se presentan a continuación son de desarrollo reciente y corresponden a un tema de investigación muy actual, pues la generalización del operador de molificación en dos dimensiones y la inclusión de derivadas fraccionarias en las ecuaciones abrieron un importante campo de acción a quienes trabajamos con la molificación.

El presente artículo se organizó de la siguiente manera: la primera sección se ocupa de las definiciones y las propiedades de la molificación discreta y las ilustres derivadas fraccionarias. En la siguiente sección se considera un problema inverso unidimensional de recuperación de información en la frontera de un dominio semiinfinito para una ecuación difusiva con derivada temporal fraccionaria. Se continúa con una sección centrada en un problema inverso bidimensional consistente en la identificación de un ingrediente dentro de un término fuente, también para una ecuación difusiva con derivada temporal fraccionaria, en tanto que la última sección está dedicada a la discusión y las conclusiones.

Principales operadores

En la primera parte de esta sección se define el operador de molificación discreta en una dimensión y su generalización a dos dimensiones. En la segunda parte, se introducen las derivadas fraccionarias, se explica el por qué se las llama ilustres y se consideran brevemente algunas de sus aplicaciones.

Molificación discreta unidimensional. El método de molificación es un procedimiento de filtrado basado en la convolución con un núcleo gaussiano truncado que sirve para regularizar problemas mal condicionados y para estabilizar y evitar oscilaciones ficticias en la discretización de ecuaciones diferenciales parciales por medio de esquemas explícitos.

Sea $y = \{y_j\}_{j \in \mathbb{Z}}$ una función discreta, por ejemplo, evaluaciones o promedios de una función real $y = y(x)$, definida en una malla de puntos equidistantes

$$X = \{x_j : x_j = x_0 + jh, j \in \mathbb{Z}\},$$

donde x_0 y h son reales y h es positivo. La molificación de esta función discreta es la convolución

$$(Jy)_j := \sum_{i=-\eta}^{\eta} \omega_i y_{j-i},$$

donde η es el parámetro de soporte y los factores de ponderación o pesos satisfacen

$$\omega_i = \omega_{-i}, 0 \leq \omega_i \leq \omega_{i-1}, i = 1, \dots, \eta; \sum_{i=-\eta}^{\eta} \omega_i = 1, \sum_{i=-\eta}^{\eta} i \omega_i = 0.$$

Tabla 1. Pesos de molificación

η	ω_0	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5
1	8.4272e-1	7.8640e-2				
2	6.0387e-1	1.9262e-1	5.4438e-3			
3	4.5556e-1	2.3772e-1	3.3291e-2	1.2099e-3		
4	3.6266e-1	2.4003e-1	6.9440e-2	8.7275e-3	4.7268e-4	
5	3.0028e-1	2.2625e-1	9.6723e-2	2.3430e-2	3.2095e-3	2.4798e-4

Para calcular los pesos se utiliza un núcleo gaussiano truncado que se construye con base en dos números reales positivos, p y δ que satisfacen la igualdad $\delta = \frac{\eta + \frac{1}{2}}{p}$. El núcleo es

$$\kappa_{p\delta} = \begin{cases} A_p \delta^{-1} \exp\left(-\frac{t^2}{\delta^2}\right), & |t| \leq p\delta \\ 0, & |t| > p\delta, \end{cases}$$

donde la constante de normalización $A_p = \left(\int_{-p}^p \exp(-s^2) ds\right)^{-1}$ es tal que $\int_{\mathbb{R}} \kappa_{p\delta} dx = 1$. El núcleo tiene soporte compacto, pues es cero fuera del intervalo $[-p\delta, p\delta]$. En adelante suponemos que $p = 3$. El número p determina el soporte del núcleo y el número δ se encarga de la forma de la campana gaussiana, mientras mayor es δ más aplanada es la campana. Los pesos se definen así: $\omega_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \kappa_{p\delta}(-s) ds$, donde $t_i = (i - \frac{1}{2})h, i \in \mathbb{Z}$. Nótese que estos pesos son independientes de h pues $\frac{t_i}{\delta} = p \frac{(i-\frac{1}{2})h}{(\eta+\frac{1}{2})h} = p \frac{(i-\frac{1}{2})}{(\eta+\frac{1}{2})}$ es decir, los pesos no dependen del parámetro de discretización espacial, ya que

$$\omega_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \kappa_{p\delta}(-s) ds = A_p \delta^{-1} \int_{t_i}^{t_{i+1}} \exp\left(-\frac{s^2}{\delta^2}\right) ds = A_p \int_{\frac{t_i}{\delta}}^{\frac{t_{i+1}}{\delta}} \exp(-s^2) ds.$$

La tabla 1 muestra una lista de pesos.

La Figura 1 ilustra la suavización que genera la molificación cuando se aplica a una función ruidosa. Más precisamente, sea

$$f(x) = \begin{cases} 2x, & 0 \leq x \leq \frac{1}{2} \\ -2(x-1), & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \\ 0, & x \notin [0,1]. \end{cases}$$

La función f y su molificación, que denotaremos Jf aparecen en la primera gráfica de la figura 1. Por otro lado, sea $\varepsilon > 0$ y sea f^ε una aproximación de f que cumple $\|f - f^\varepsilon\|_\infty \leq \varepsilon$. La función aproximada se denomina “ruidosa”, pues se obtiene sumando a cada punto un número aleatorio distribuido uniformemente en el intervalo $[-\varepsilon, \varepsilon]$. A una tal distribución de números aleatorios se le conoce como “ruido” gaussiano.

En la segunda gráfica de la Figura 1 aparecen f^ε y Jf^ε . El código MATLAB utilizado para generar las dos funciones f y f^ε para $\varepsilon = 0.1$, es el siguiente:

```
f = @(x) 2*x.*(x < 0.5 & 0 < x) + (2-2*x).*(0.5 < x & x < 1);
x = linspace(-.2,1.2);
```

```
fx = f(x);
epsil = 0.1;
fep = fx + (2*rand(size(x))-1)*epsil;
```

Algunos ejemplos de problemas mal condicionados en los que se puede trabajar con molificación son los inversos de difusión (Mejía & Murio, 1996; Murio, 2007; Murio & Mejía, 2008a; Mejía & Piedrahita, 2017) y los inversos de identificación de modelos (Mejía & Murio, 1995; Murio & Mejía, 2008b; Mejía, et al., 2011; Acosta, et al., 2014; Acosta, et al., 2015; Echeverry & Mejía, 2018).

La mayoría de las veces trabajamos con funciones definidas en intervalos, lo cual hace que la definición de molificación, por ser una convolución, no se pueda usar en algunos puntos vecinos de los extremos del intervalo. Esta dificultad se discute en el trabajo de Acosta & Mejía (2008), en el que se definen las llamadas condiciones de borde, las cuales consisten en modificaciones del operador de molificación para esos puntos limítrofes. A pesar del éxito de tales modificaciones, este es un aspecto de la molificación que aún requiere más estudio.

A manera de conclusión podemos decir que la molificación es una buena alternativa como método de regularización. Además, es una herramienta para hacer menos estrictas las condiciones de estabilidad del tipo Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), que esperamos que siga vigente por un buen tiempo. Este uso de la molificación se puede consultar en Acosta, et al. (2012, 2014, 2015).

Las propiedades de aproximación de la molificación discreta se pueden consultar en Acosta & Mejía (2014). Hay aspectos de la molificación que requieren profundización, por ejemplo, las condiciones de borde y la escogencia de los parámetros δ o η , que sería deseable hacer de forma automática según cuán perturbados estén los datos que se van a molificar.

Existen otras versiones del método de molificación, por ejemplo, las de Garshasbi & Dastour (2015), Hao (1994), Li & Fu (2011) y Shi, et al. (2016), las cuales se diferencian

en la implementación, pero, en todos los casos, se trata de métodos basados en convolución que son útiles para la regularización de problemas mal condicionados.

Hay pocas referencias de molificación bidimensional. Entre las mencionadas arriba, solamente en el estudio de Li & Fu (2011) se aborda un problema con dominio en una franja de \mathbb{R}^2 , pero se utiliza solamente la molificación unidimensional. El tema de la molificación en dos dimensiones se trata en la siguiente sección.

Molificación discreta bidimensional. El propósito de esta sección es presentar una generalización a dos dimensiones del operador de molificación unidimensional introducido en la sección anterior. El operador bidimensional de molificación discreta que definiremos enseguida fue introducido por Acosta & Bürger (2012). Sin embargo, debe advertirse que la molificación bidimensional se está realizando por lo menos desde los años 90 (Zhan & Murio, 1999; Zhan, et al., 2001).

Nuestro dominio es una malla uniforme bidimensional del plano \mathbb{R}^2 dada por $(x_i, y_j) = (x_0 + ih, y_0 + jk)$, donde h y k son los reales positivos que determinan tamaños de paso en cada dirección. Para una función G , definida en esta malla como $G(x_i, y_j) = G_{ij}$, se establece su molificación discreta como $(J_\eta^2 G)_{ij} = \sum_{k=-\eta}^{\eta} \sum_{l=-\eta}^{\eta} \omega_k \omega_l G_{i+l, j+k}$, donde η determina el soporte discreto y los pesos ω_j son los de la molificación unidimensional. Nótese que

$$(J_\eta^2 G)_{ij} = \sum_{k=-\eta}^{\eta} \omega_k \sum_{l=-\eta}^{\eta} \omega_l G_{i+l, j+k} = \sum_{k=-\eta}^{\eta} \omega_k (J_\eta^x)_{i, j+k} = J_\eta^y (J_\eta^x G)_{ij},$$

donde los dos operadores J_η^x y J_η^y corresponden a la molificación unidimensional ya definida.

Las propiedades de aproximación de este operador aparecen en Acosta & Bürger (2012) y en Echeverry (2018). Para las propiedades del operador de molificación bidimensional definido en la década de los 90 por el grupo liderado por Murio, recomendamos consultar Zhan & Murio (1999).

Otro aspecto del método de molificación que ha suscitado mucho interés recientemente es el de las derivadas fraccionarias, las cuales se definen en la siguiente sección.

Derivadas fraccionarias. El estudio de las derivadas fraccionarias se denomina cálculo fraccional y sus orígenes se remontan a fines del siglo XVII. Importantes matemáticos de distintas épocas, como Leibniz, L'Hôpital, Johann Bernoulli, Euler, Abel, Riemann y Liouville, han contribuido al establecimiento de esta teoría. La calificación de estas derivadas como "ilustres" se justifica por la nómina de matemáticos destacados que ha ayudado a su nacimiento y evolución. Asimismo, nos atrevemos a afirmar que también son ilustres por el lugar destacado que ocupan en la matemática aplicada y porque estamos seguros de que su protagonismo aumentará en los próximos años. En el campo del cálculo fraccional sugerimos consultar a Oldham & Spanier (2006), Miller & Ross (1993), Podlubny (1999), Diethelm (2010) y Guo, et al. (2015).

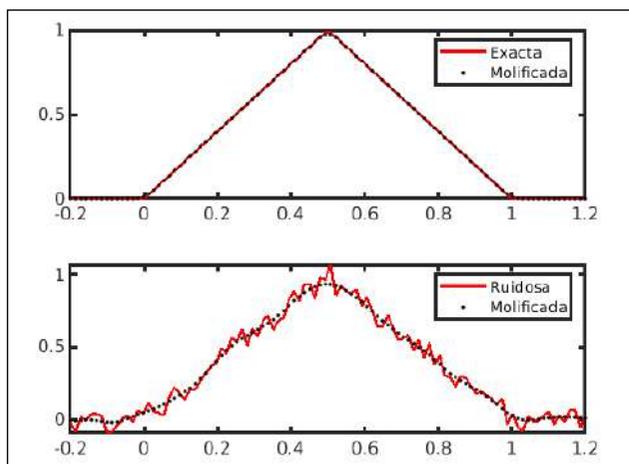


Figura 1. Molificación de función sin ruido y con ruido.

Recientemente, la investigación en cálculo fraccional se ha intensificado, pues hay evidencia de que varios modelos matemáticos mejoran cuando se cambian las derivadas usuales por las fraccionarias.

En el caso específico de difusión en un medio poroso y con fracturas, **Fomin, et al.** (2010) han establecido mediante experimentos que la difusión en el medio es anómala y que en lugar de las tradicionales leyes de Fick, es conveniente recurrir a ecuaciones de difusión con derivadas fraccionarias.

En el campo del modelamiento matemático de materiales viscoelásticos, se está encontrando que es preferible un modelo fraccional que uno con derivadas enteras (**Diethelm, 2010**). La regla general es que si el proceso bajo estudio tiene propiedades asociadas con la memoria o la herencia, es útil intentar un modelo fraccional en lugar de uno tradicional.

A continuación definimos dos de las derivadas fraccionarias más conocidas. El orden de derivación en ambos casos es un número real positivo α .

Derivada fraccional de Caputo. Para una función real f suficientemente suave, la derivada de Caputo de orden α es

$${}_a^C D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_a^t \frac{f^{(m)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau,$$

donde el entero m cumple $m - 1 < \alpha \leq m$ y $\Gamma(z) = \int_0^\infty x^{z-1} \exp(-x) dx$ es la función gamma, que es una generalización del factorial, pues si n es un entero positivo, $\Gamma(n) = (n - 1)!$

Derivada de Riemann-Liouville. Sea f una función real continua a trozos en $(0, \infty)$, integrable en cualquier subintervalo finito de $(0, \infty)$. Entonces para $t > 0$, la integral fraccional de Riemann-Liouville de orden α de f es

$${}^R L_a^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_a^t (t - \tau)^{\alpha-1} f(\tau) d\tau$$

Para definir la derivada fraccional de Riemann-Liouville de orden α , utilizamos el entero m tal que $m - 1 \leq \alpha < m$ y tomamos $\lambda = m - \alpha$. La derivada fraccional de Riemann-Liouville de orden α de f es

$${}^R L_a^\alpha D_t^\alpha f(t) = \frac{d^m}{dt^m} ({}^R L_a^\lambda f(t)) = \frac{1}{\Gamma(\lambda)} \frac{d^m}{dt^m} \int_a^t (t - \tau)^{\lambda-1} f(\tau) d\tau.$$

El siguiente lema advierte sobre cuán distintas pueden ser las derivadas fraccionarias.

Lema 1. *Para funciones constantes, la derivada fraccional de Caputo es cero y en cambio la derivada fraccional de Riemann-Liouville no es cero.*

Dem: tomemos $0 < \alpha < 1$, $m = 1$ y $f(t) = 1$ para todo t . Debido a la presencia de la derivada en el integrando, la derivada fraccional de Caputo de orden α de f es 0. En cambio, la derivada de Riemann-Liouville de orden α de f es la función

$$g(t) = \frac{t^{-\alpha}}{\Gamma(1 - \alpha)}.$$

Una anotación pertinente en este momento es: las derivadas de orden entero dependen del comportamiento “local” de la función y las derivadas fraccionarias se calculan con base en los valores de la función a todo lo largo del dominio de definición. Eso hace que a los operadores del cálculo fraccional se les denomine operadores “no locales” o “con memoria”.

Problema inverso de advección-dispersión con derivada temporal fraccional

El objetivo es estudiar la aplicación de la molificación como método de regularización para la solución del siguiente problema inverso: reconstrucción de la concentración de soluto en la frontera del dominio físico que es unidimensional semiinfinito. La derivada fraccional se toma en el sentido de Caputo y los coeficientes de advección y de dispersión son constantes. La información adicional que se requiere para enunciar correctamente el problema inverso y poderlo resolver consiste en una distribución de datos perturbados correspondientes a la concentración y al flujo en un punto interior del dominio para todo tiempo.

La configuración es unidimensional, lo cual significa que estamos ante una primera aproximación, tal como lo explican **Benson, et al.** (2000), de quienes citamos unas líneas que son pertinentes: “Una pregunta típica que se hace un hidrogeólogo que estudia el transporte de un contaminante es: ¿qué tan lejos y qué tan rápido avanzará el contaminante? Como primera aproximación, la mayoría de problemas de esta naturaleza se reducen a una ecuación unidimensional de advección-dispersión”.

Advertimos que nos proponemos estudiar la solución numérica del problema inverso por molificación discreta y no consideramos el problema matemático de existencia y unicidad de soluciones.

Problemas directo e inverso. Enunciamos un problema inverso a partir del siguiente problema directo:

$$\begin{aligned} {}_0^C D_t^\alpha u + au_x &= du_{xx}, & 0 < x, 0 < t, \\ u(0, t) &= \rho(t), & 0 \leq t, \\ u(x, 0) &= 0, & 0 < x, \end{aligned}$$

y se trabaja con la hipótesis adicional $u(x, t)$ acotada para $x \rightarrow \infty$. La variable u representa la concentración del soluto, u_x es el flujo de dispersión, y las constantes positivas a y d representan la velocidad promedio del fluido y el coeficiente de dispersión, respectivamente. De ahora en adelante, a la derivada de Caputo ${}_0^C D_t^\alpha u$ la denotamos como $D_t^\alpha u$.

El problema inverso de interés es:

$$\begin{aligned} D_t^\alpha u(x, t) + au_x(x, t) &= du_{xx}(x, t), & 0 < x, 0 < t, \\ u(1, t) &= \rho(t), & 0 < t, & \text{dato,} \\ u_x(1, t) &= \sigma(t), & 0 < t, & \text{dato,} \\ u(0, t) &= \xi(t), & 0 \leq t, & \text{incógnita,} \\ u_x(0, t) &= \beta(t), & 0 \leq t, & \text{incógnita,} \\ u(x, 0) &= 0, & 0 < x. \end{aligned}$$

La información adicional consiste en las medidas interiores en $x = 1$ para la concentración y el flujo de dispersión. Para hacer realista la situación, suponemos que la información adicional no se conoce exactamente y sus aproximaciones ρ^ε y σ^ε satisfacen los estimados $\|\rho - \rho^\varepsilon\|_\infty < \varepsilon$ y $\|\sigma - \sigma^\varepsilon\|_\infty < \varepsilon$, donde ε representa el máximo nivel de perturbaciones en los datos.

Se trata de un problema mal condicionado según el siguiente teorema.

Teorema 1. *Aproximar ζ y β a partir de la ecuación diferencial y las mediciones interiores adicionales ρ^ϵ y σ^ϵ es un problema gravemente mal condicionado en las componentes de alta frecuencia.*

Dem: proponemos solamente un esbozo. Suponemos que todas las funciones dependientes del tiempo con las que trabajamos se pueden extender a toda la recta real. Aplicamos la transformada de Fourier con respecto a t y llegamos al sistema

$$\begin{bmatrix} \widehat{\xi}(\omega) \\ \widehat{\beta}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \mu\nu & \frac{1}{\mu\nu} \sinh \mu\nu \\ \mu\nu \sinh \mu\nu & \cosh \mu\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\rho}(\omega) \\ \widehat{\sigma}(\omega) \end{bmatrix}.$$

La variable en el espacio de frecuencias es ω , $\mu = |a^2 + 4d(i\omega)^\alpha|^{1/2}$ y $\nu = \cos(\theta/2) + i \sin(\zeta\theta/2)$, donde $\theta = \arg(a^2 + 4d(i\omega)^\alpha) = \arctan\left(\frac{4d|\omega|^\alpha \sin(\frac{\zeta\pi\alpha}{2})}{a^2 + 4d|\omega|^\alpha \cos(\frac{\zeta\pi\alpha}{2})}\right)$. Además, $\theta = \arg(a^2 + 4d(i\omega)^\alpha) = \tan^{-1}\left(\frac{4d|\omega|^\alpha \sin(\frac{\zeta\pi\alpha}{2})}{a^2 + 4d|\omega|^\alpha \cos(\frac{\zeta\pi\alpha}{2})}\right)$. Además, $(i\omega)^\alpha = |\omega|^\alpha \exp\left(i\frac{\zeta\pi\alpha}{2}\right)$ con $\zeta = \text{sgn}(\omega)$. Se cumple que si $|\omega| \rightarrow \infty$, entonces

$$|\cosh \mu\nu| = \left| \cosh\left(|a^2 + 4d(i\omega)^\alpha|^{1/2} \left(\cos\frac{\theta}{2} + i \sin\frac{\zeta\theta}{2}\right)\right) \right| \rightarrow \infty$$

y $|\sinh \mu\nu| = \left| \sinh\left(|a^2 + 4d(i\omega)^\alpha|^{1/2} \left(\cos\frac{\theta}{2} + i \sin\frac{\zeta\theta}{2}\right)\right) \right| \rightarrow \infty$, de donde se concluye el mal condicionamiento anunciado (Mejía & Piedrahita, 2017).

La molificación y la derivada fraccionaria. La presencia de la derivada dentro de la integral en la derivada fraccionaria de Caputo anuncia la posibilidad de un problema mal condicionado cuando los datos no se conocen exactamente. Seguimos a Murio (2008) para el esquema implícito de discretización de la derivada fraccionaria y a Murio & Mejía (2008b) para la combinación de la derivada fraccionaria con la molificación.

Lema 2. *Sea g una función continuamente diferenciable. Consideremos la cuadratura con parámetro de discretización temporal k de la derivada de Caputo de g dada por la fórmula*

$$C^\alpha g(t) = \sigma_{\alpha,k} \sum_{i=0}^{\lfloor \frac{t}{k} \rfloor} \omega_i^{(\alpha)} (g(t-ik+1) - g(t-ik)),$$

donde $\lfloor \cdot \rfloor$ denota la función parte entera o piso, $\sigma_{\alpha,k} = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{k^\alpha}$ y $\omega_i^{(\alpha)} = i^{1-\alpha} - (i-1)^{1-\alpha}$.

Entonces esta cuadratura satisface la aproximación de primer orden

$$D_i^\alpha g(t) = C^\alpha g(t) + O(k).$$

Dem: Ver Murio (2008).

El problema estabilizado por molificación se define para las variables $v = J_\delta u$ y $v_x = J_\delta u_x$ y es el siguiente:

$$\begin{aligned} D_t^\alpha v(x,t) + av_x(x,t) &= dv_{xx}(x,t), & 0 < x, 0 < t, \\ v(1,t) &= J_\delta \rho^\epsilon(t), & 0 < t, \text{ dato}, \\ v_x(1,t) &= J_\delta \sigma^\epsilon(t), & 0 < t, \text{ dato}, \\ v(0,t) &= J_\delta \xi(t), & 0 \leq t, \text{ incógnita}, \\ v_x(0,t) &= J_\delta \beta(t), & 0 \leq t, \text{ incógnita}, \\ v(x,0) &= 0, & 0 \leq x, \end{aligned}$$

donde $D_t^\alpha v = D_t^\alpha J_\delta u = J_\delta D_t^\alpha u$.

Enseguida se enuncia un esquema de diferencias finitas con sentido de marcha en la dirección del espacio. Esta es una técnica que ha probado su efectividad en la solución

de problemas inversos (Murio, 2002; Mejía, et al., 2011; Mejía & Murio, 2008a; Mejía & Murio, 2008b; Garshasbi & Dastour, 2015).

Los parámetros de discretización son: números reales positivos k, h y números enteros positivos N, M tales que $Nk = \tau$ es el tiempo final y $Mh = 1$. La malla espacial es $x = (mh)_{m=0,\dots,M}$ y el vector de instantes de tiempo es $t = (nk)_{n=0,\dots,N}$. Denotamos R_m^n, W_m^{ny} y Q_m^n a las aproximaciones calculadas para la concentración de soluto $v(mh, nk)$, el flujo molificado $v_x(mh, nk)$ y la derivada temporal fraccionaria de la concentración de soluto $D_t^\alpha v(mh, nk)$ respectivamente. El esquema con sentido de marcha en la dirección espacial es el siguiente:

$$\begin{aligned} R_{m-1}^n &= R_m^n - hW_m^n, \\ W_{m-1}^n &= \left(1 - \frac{a}{d}h\right) W_m^n - \frac{h}{d} Q_m^n, \end{aligned}$$

donde $m = M, M-1, \dots, 1$ y $n = 1, \dots, N$. Las aproximaciones buscadas son R_0^n y W_0^n para $n = 1, \dots, N$.

Para poder calcular con este esquema es indispensable un método numérico de solución del problema directo en $[0,1]$ pues esa es la forma de obtener los datos de inicio. De esto se ocupa la próxima sección.

Generación de los datos para la solución numérica del problema directo. Lo usual es que no se disponga de solución exacta para el problema directo. De hecho, en las industrias y talleres es muy frecuente que se enuncien problemas inversos y se resuelvan en el computador debido a la imposibilidad de medir en una de las fronteras, o en el interior del equipo con el que se está trabajando, por ejemplo, una caldera o una turbina.

El problema directo de advección difusión con derivada temporal fraccionaria asociado al problema molificado es

$$\begin{aligned} D_t^\alpha v(x,t) + av_x(x,t) &= dv_{xx}(x,t), & 0 < x < 1, 0 < t < \tau, \\ v(0,t) &= v_l(t), & 0 < t \leq \tau, \\ v(1,t) &= v_r(t), & 0 < t \leq \tau, \\ v(x,0) &= f(x), & 0 \leq x \leq 1. \end{aligned}$$

Para este problema directo se enuncia un método implícito de solución por diferencias finitas que tiene en cuenta el método de aproximación de la derivada fraccionaria del Lema 2. Los detalles se pueden consultar en Mejía & Piedrahita (2017).

Teorema 2 (Convergencia)

La aproximación de la concentración obtenida con el esquema de marcha en la dirección espacial para la frontera activa $x = 0$, converge a la concentración exacta cuando el paso temporal y el tamaño de las subdivisiones espaciales tienden a cero.

Experimento numérico. El experimento consiste en la recuperación de una concentración con forma de paso unitario. Más precisamente, la concentración en la frontera izquierda (por identificar) es la función

$$w_0(t) = \begin{cases} 1, & 0.2 \leq t \leq 0.6, \\ 0, & t \notin [0.2, 0.6], \end{cases}$$

y la concentración en la frontera derecha es $w_1(t) = 0$. Los errores absolutos de la Tabla 2 se obtuvieron con la norma RMS (*root mean square*), que se define así: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ si entonces $RMS(x)$ es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los x_j . La Figura 2 ilustra la calidad de la identificación. Se obtuvo con los parámetros de discretización $h = \frac{1}{100}$ y $k = \frac{1}{128}$.

En la Tabla 2 se presenta un informe de resultados numéricos para dos valores de α . Sirve para observar la dependencia del error de los parámetros de discretización h y k y, por lo tanto, para verificar el teorema de convergencia. Nótese que la concentración en el borde $x = 0$ es una función de t y que los errores son menores para los menores valores del parámetro de discretización temporal k .

Problema inverso de identificación de término fuente

En esta sección presentamos los resultados obtenidos para un problema inverso de identificación de término fuente en una ecuación de difusión en la que la derivada temporal es fraccionaria en el sentido de Caputo y la configuración espacial es bidimensional.

El problema directo. El problema directo de difusión de interés para nosotros corresponde al seguimiento de la concentración de un contaminante en un acuífero en el que la dispersión o difusión es dominante y, por lo tanto, no se tiene en cuenta la advección. El término fuente de la ecuación cumple la regla de variables separables en la que el factor dependiente de espacio es la magnitud o intensidad de la descarga del contaminante y el factor dependiente del tiempo es un coeficiente de atenuación. El término de dispersión o difusivo es un operador diferencial denotado con la letra L y se explica más adelante. El problema directo de valor inicial y valores en la frontera son

$$\begin{aligned} D_t^\alpha u(z, t) - (Lu)(z, t) &= p(t)f(z), \quad z \in \Omega \quad t \in (0, T) \\ u(z, t) &= 0, \quad z \in \partial\Omega \quad t \in (0, T) \\ u(z, 0) &= 0, \quad z \in \bar{\Omega}, \end{aligned}$$

donde $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, $\bar{\Omega}$ es su clausura, la derivada temporal fraccionaria es en el sentido de Caputo, la difusión es

$$Lu(z) = \sum_{i=1}^d \frac{\partial}{\partial z_i} \left(\sum_{j=1}^d a_{ij}(z) \frac{\partial}{\partial z_j} u(z) \right) + c(z)u(z), \quad z \in \Omega$$

y los coeficientes en L satisfacen las siguientes relaciones:

$$a_{ij} = a_{ji} \in C^1(\bar{\Omega}), \sum_{i,j=1}^d a_{ij} \zeta_i \zeta_j > \theta \sum_{i=1}^d |\zeta_i|^2, \theta > 0, c(z) \leq 0, c \in C(\bar{\Omega}).$$

Con estas condiciones el operador $-L$ es simétrico y uniformemente elíptico, definido en $D(-L) = H^2(\Omega) \cap H_0^1(\Omega)$.

El problema inverso. Nos interesa identificar el factor $f(z)$ en el término fuente, lo cual exige que tengamos alguna información adicional. En nuestro caso se trata de la distribución espacial de la concentración $u(z, T) = q(z)$ en el interior del dominio para un tiempo futuro T . Más aun, suponemos que la información adicional es una medición y está sujeta a errores. Por lo tanto, en lugar de la distribución exacta q disponemos de una aproximación q^ϵ que cumple con $\|q - q^\epsilon\|_\infty \leq \epsilon$.

Existencia de la solución. Obtenemos de Ma, et al. (2018) y Sakamoto & Yamamoto (2011) una expansión

Tabla 2. Reconstrucción de $u(0, t)$ con ruido máximo $\epsilon = 0,05$

h	k	Error absoluto, $\alpha = 0,5$	Error absoluto, $\alpha = 0,9$
1/50	1/128	0,0875	0,1256
1/50	1/256	0,0754	0,1051
1/100	1/128	0,0958	0,1216
1/100	1/256	0,0830	0,1054
1/100	1/512	0,0809	0,0982

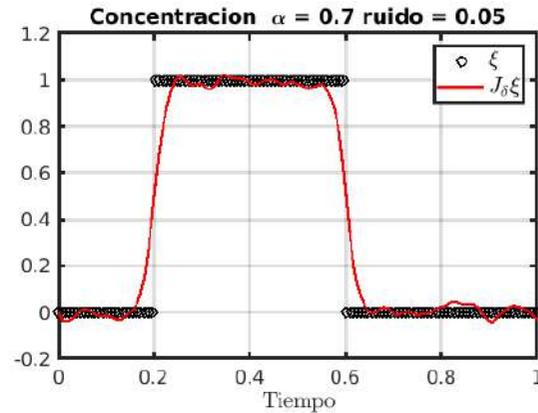


Figura 2. Exacta: línea con diamantes; calculada: línea continua

en serie para la solución del problema directo. Está basada en las funciones propias del operador $-L$ y en la función de Mittag-Leffler de dos parámetros positivos α y β dada por

$$E_{\alpha, \beta}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(\alpha k + \beta)}$$

Nótese que esta función es una generalización de la función exponencial. Denotemos por $\{\chi_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ las funciones propias de $-L$ y $\{\lambda_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ a sus valores propios. Además, denotamos (\cdot, \cdot) al producto interno en $L^2(\Omega)$. La solución del problema directo es

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n \left[\int_0^t p(\tau)(t-\tau)^{\alpha-1} E_{\alpha, \alpha}(-\lambda_n(t-\tau)^\alpha) d\tau \right] \chi_n(z),$$

donde $f_n = (f, \chi_n)$. Por lo tanto,

$$u(z, T) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n \left[\int_0^T p(\tau)(T-\tau)^{\alpha-1} E_{\alpha, \alpha}(-\lambda_n(T-\tau)^\alpha) d\tau \right] \chi_n(z) = q(z).$$

Denotemos $Q_n(t) = \int_0^t p(\tau)(t-\tau)^{\alpha-1} E_{\alpha, \alpha}(-\lambda_n(t-\tau)^\alpha) d\tau$. Entonces, $q(z) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n Q_n(T) \chi_n(z)$, es decir, sus coeficientes de Fourier son $q_n = f_n Q_n(T)$. Para $\gamma \in \mathbb{R}$ definimos el espacio

$$D(((-L)^\gamma) = \{\psi \in L^2(\Omega) : \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n^{2\gamma} |(\psi, \chi_n)|^2 < \infty\}.$$

Es un espacio de Hilbert con la norma $\|\psi\|_{D((-L)^\gamma)} = (\sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n^{2\gamma} |(\psi, \chi_n)|^2)^{\frac{1}{2}}$.

Para la solución del problema inverso definimos el operador

$$(Kf)(z) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n \left[\int_0^t p(\tau)(t-\tau)^{\alpha-1} E_{\alpha, \alpha}(-\lambda_n(t-\tau)^\alpha) d\tau \right] \chi_n(z)$$

y buscamos una función f_η^ϵ que minimiza al funcional $Hf = \|Kf - J_\eta^\epsilon q^\epsilon\|_2^2$.

Teorema 3

Supongamos que $p \in C([0, T])$ y satisface $p(t) \geq p_0 > 0$ para todo $t \in [0, T]$. Supongamos además $\|q - q^\epsilon\|_\infty < \epsilon$ y existen $m \in \mathbb{R}^+$ y $E \in \mathbb{R}$ tales que $\|f\|_{D((-L, L)^2)} \leq E$. Entonces

$$\|f_\eta^\epsilon - f\|_2 \leq C_1(\delta + \epsilon)^{\frac{m}{m+2}},$$

donde C_1 es una constante que puede depender de α, T, λ_1 y la medida del dominio $\mu(\Omega)$. Además, δ es el parámetro de molificación asociado con η .

Dem: la solución está dada por

$$f_\eta^\epsilon(z) = \sum_{n=1}^\infty \frac{(J_\eta^2 q^\epsilon)_n}{Q_n(T)} \chi_n(z), \text{ donde } (J_\eta^2 q^\epsilon)_n = (J_\eta^2 q^\epsilon, \chi_n)$$

(Echeverry & Mejía, 2018).

El método numérico. La solución del problema inverso se realiza con diferencias finitas y requiere de la solución del problema directo. El método implícito utilizado está descrito en Mejía & Piedrahita (2018), pero no tiene todavía un sistema eficiente de condiciones de borde para la molificación bidimensional, aspecto en el que estamos trabajando todavía. Por tal razón, la medida de errores en el experimento que presentamos enseguida, se realiza sobre puntos interiores de la malla. Los puntos fronterizos y los inmediatamente siguientes se dejan por fuera en el cálculo del error. Utilizamos la norma RMS.

El experimento numérico en el que se basan las figuras siguientes consiste en la ecuación diferencial fraccional

$$D_t^\alpha u(z, t) - (Lu)(z, t) = p(t)f(z),$$

donde $z = (x, y) \in \Omega, t \in (0, T)$ y $Lu(z, t)$ está dado por

$$Lu(x, y, t) = \frac{\partial}{\partial x}(a_{11}(x, y) \frac{\partial}{\partial x} u(x, y, t)) + \frac{\partial}{\partial y}(a_{22}(x, y) \frac{\partial}{\partial y} u(x, y, t)),$$

con $a_{11}(x, y) = x^2 + 1, a_{22}(x, y) = y^2 + 1, p(t) = 1 + \exp(-(t + \alpha))$, y el ingrediente por identificar es $f(x, y) = \sin 3\pi x \sin 3\pi y$. El dominio Ω es un rectángulo unitario y $T = 1$. Como parámetros de discretización usamos $h = 1/32$ tanto en x como en y y $k = 1/10$ en tiempo. El máximo nivel de ruido en los datos es $\epsilon = 0,05$.

En primer lugar, en la Figura 3 se ilustra la importancia de incluir la molificación para lograr un método estable. En segundo lugar, en la Figura 4 se ilustra la calidad de la identificación que se logra con una adecuada molificación.

Por último, en la Tabla 3 se presentan los resultados de otros experimentos que sirven para verificar la convergencia del algoritmo. Los errores en la identificación de f se calculan con la norma RMS.

Discusión y conclusiones

En este artículo verificamos la utilidad de los operadores de molificación en aplicaciones a problemas inversos en una y dos dimensiones basados en ecuaciones difusivas en las que la derivada temporal es fraccionaria. También expusimos argumentos para justificar el apelativo de “ilustres” para las derivadas fraccionarias. Creemos haber establecido que las derivadas fraccionarias serán cada vez más importantes en la matemática aplicada y que la molificación discreta es un método de regularización adecuado para resolver problemas inversos en los que esas derivadas participan.

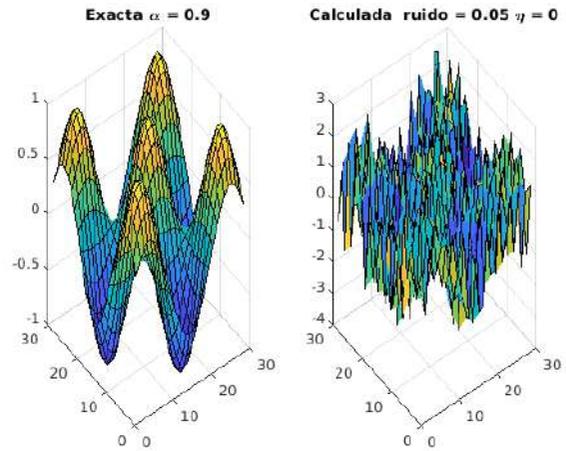


Figura 3. A. Identificación fallida del factor f por falta de molificación

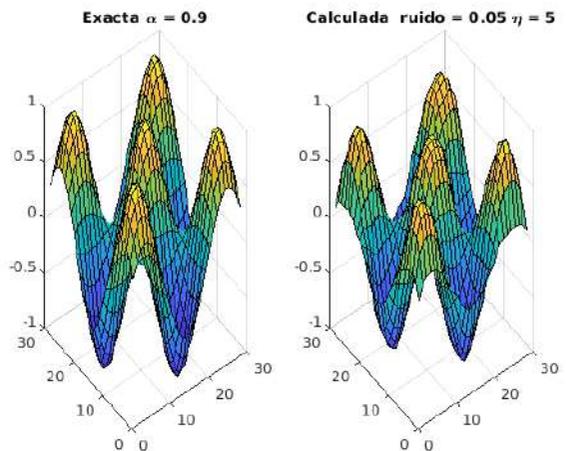


Figura 4. Identificación de factor f con $h=1/32$ y $k=1/10$

Tabla 3. Identificación del factor f para $\epsilon = 0,05$

h	alpha			
	0,1	0,5	0,7	0,9
En x y en y	0,1157	0,1186	0,1203	0,1190
1/30	0,0824	0,0874	0,0888	0,0883
1/40	0,0734	0,0742	0,0746	0,0754
1/50	0,0657	0,0735	0,0741	0,0712
1/60				

Seguiremos intentando ayudar en el desarrollo de este campo de investigación de análisis numérico, con especial énfasis en el estudio de ecuaciones diferenciales fraccionarias en las que las derivadas fraccionarias están en las variables espaciales. Asimismo, aspiramos a mejorar el operador de molificación bidimensional en lo que respecta a las condiciones de borde. Por último, nos proponemos enfrentar problemas inversos basados en ecuaciones

difusivas no lineales en las que hay derivadas fraccionarias. Recientemente, consideramos ecuaciones de advección-dispersión con término fuente no lineal y derivada temporal fraccionaria (Mejía & Piedrahita, 2019), y el plan es continuar explorando este tema y enfrentar nuevos problemas en el futuro inmediato.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo de la Universidad Nacional de Colombia a través del proyecto “Operadores no locales y con memoria”, código Hermes 33154.

Referencias

- Acosta, C. D. & Bürger, R.** (2012). Difference schemes stabilized by discrete mollification for degenerate parabolic equations in two space dimensions, *IMA J. Numer. Anal.* **32**: 1509-1540.
- Acosta, C. D., Bürger, R., Mejía, C. E.** (2012). Monotone difference schemes stabilized by discrete mollification for strongly degenerate parabolic equations, *Numer. Meth. Partial Diff. Eqns.* **28**: 38-62.
- Acosta, C. D., Bürger, R., Mejía, C. E.** (2014). A stability and sensitivity analysis of parametric functions in a sedimentation model, *DYNA Vol.* **81** (183): 22-30.
- Acosta, C. D. Bürger, R., Mejía, C. E.** (2015). Efficient parameter estimation in a macroscopic traffic flow model by discrete mollification, *Transportmetrica A: Transport Science.* **11** (8): 702-715.
- Acosta, C. D. & Mejía, C. E.** (2014). Stable computations by discrete mollification, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. p. 108.
- Acosta, C. D. & Mejía, C. E.** (2008). Stabilization of explicit methods for convection diffusion equations by discrete mollification. *Computers Math. Applic.* **55**: 368-380.
- Benson, D. A., Wheatcraft, S. W., Meerschaert M. M.** (2000). Application of a fractional advection-dispersion equation. *Water Resources Research.* **36**: 1403-1412.
- Diethelm, K.** (2010). The analysis of fractional differential equations. An application-oriented exposition using differential operators of Caputo type. Berlin, Springer. p. 247.
- Echeverry, M. D.** (2018). Fractional differential equations and inverse problems. Tesis de Doctorado en preparación, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- Echeverry, M. D. & Mejía, C. E.** (2018). A two dimensional discrete mollification operator and the numerical solution of an inverse source problem. *Axioms.* **7** (4): 89. Doi: 0.3390/axioms7040089
- Fomin, S., Chugunov, V., Hashida, T.** (2010). Application of fractional differential equations for modeling the anomalous diffusion of contaminant from fracture into porous rock matrix with bordering alteration zone. *Transp. Porous Med.* **81**: 187-205.
- Friedrichs, K. O.** (1944). The identity of weak and strong extensions of differential operators. *Trans. AMS.* **55**: 132-151.
- Garshasbi, M. & Dastour, H.** (2015). Estimation of unknown boundary functions in an inverse heat conduction problem using a mollified marching scheme. *Numer. Algor.* **68**: 769-790.
- Guo, B., Pu, X., Huang, F.** (2015). Fractional partial differential equations and their numerical solutions. New Jersey, World Scientific. p. 336.
- Hao, D. N.** (1994). A mollification method for ill-posed problems. *Numer. Math.* **68**: 469-506.
- Li, Z. & Fu, C.** (2011). A mollification method for a Cauchy problem for the Laplace equation. *Applied Mathematics and Computation.* **217**: 9209-9218.
- Ma, Y.-K., Prakash, P., Deiveegan, A.** (2018). Generalized Tikhonov methods for an inverse source problem of the time-fractional diffusion equation. *Chaos, Solitons and Fractals.* **108**: 39-48.
- Manselli, P. & Miller K.** (1980). Calculations of the surface temperature and heat flux on one side of a wall from measurements on the opposite side. *Ann. Math. Pura Appl.* **123**: 161-183.
- Mejía, C. E.** (2007). Sobre el método de molificación. Trabajo presentado como requisito parcial para promoción a profesor titular, Medellín, Universidad Nacional de Colombia.
- Mejía, C. E., Acosta, C. D., Saleme, K.** (2011). Numerical identification of a nonlinear diffusion coefficient by discrete mollification. *Computers Math. Applic.* **62**: 2187-2199.
- Mejía, C. E. & Murio, D. A.** (1995). Numerical identification of diffusivity coefficient and initial condition by discrete mollification. *Computers Math. Applic.* **30**: 35-50.
- Mejía, C. E. & Murio, D. A.** (1996). Numerical solution of generalized inverse heat conduction problem by discrete mollification. *Computers Math. Applic.* **32**: 33-50.
- Mejía, C. E. & Piedrahita, A.** (2019). A numerical method for a time fractional advection-dispersion equation with a nonlinear source term. *J. Appl. Math. Comput.* Doi: 10.1007/s12190-019-01266-x
- Mejía, C. E. & Piedrahita, A.** (2017). Solution of a time fractional inverse advection-dispersion problem by discrete mollification. *Revista Colombiana de Matemáticas.* **51** (1): 83-102.
- Mejía, C. E. & Piedrahita, A.** (2018). A finite difference approximation of a two dimensional time fractional advection-dispersion problem. <https://arxiv.org/abs/1807.07393>
- Miller, K. S. & Ross, B.** (1993). An introduction to the fractional calculus and fractional differential equations. New York, John Wiley & Sons. p. 366.
- Murio, D. A.** (1993). The mollification method and the numerical solution of ill-posed problems. New York, Estados Unidos. John Wiley and Sons. p. 254.
- Murio, D. A.** (2002). Mollification and space marching. En K. Woodbury (ed.), *Inverse Engineering Handbook*. Boca Raton, Estados Unidos. CRC Press. p. 466.
- Murio, D. A.** (2007). Stable numerical solution of a fractional-diffusion inverse heat conduction problem. *Computers Math. Applic.* **53**: 1492-1501.
- Murio, D. A.** (2008). Implicit finite difference approximation for time fractional diffusion equations. *Computers Math. Applic.* **56**: 1138-1145.
- Murio, D. A. & Mejía, C. E.** (2008a). Generalized time fractional IHCP with Caputo Fractional Derivatives, *Journal of Physics: Conference Series.* **135**: 012074.

- Murio, D. A. & Mejía, C. E.** (2008b). Source Terms Identification for Time Fractional Diffusion Equation. *Revista Colombiana de Matemáticas*. **42** (1): 25-46.
- Oldham, K. B. & Spanier, J.** (2006). *the fractional calculus. Theory and applications of differentiation and integration to arbitrary order*. Mineola, New York, Estados Unidos. Dover Publications. p. 234.
- Podlubny, I.** (1999). *Fractional differential equations*. Academic Press. p. 340.
- Sakamoto, K. & Yamamoto, M.** (2011). Initial value/boundary value problems for fractional diffusion-wave equations and applications to some inverse problems. *J. Math. Anal. Appl.* **382**: 426-447.
- Shi, C., Wang, C., Wei, T.** (2016). Convolution regularization method for backward problems of linear parabolic equations. *Applied Numerical Mathematics*. **108**: 143-156.
- Zhan, S. & Murio, D. A.** (1999). Surface fitting and numerical gradient computations by discrete mollification. *Computers Math. Applic.* **37**: 85-102.
- Zhan, S., Coles, C., Murio, D. A.** (2001). Automatic numerical solution of generalized 2-D IHCP by discrete mollification. *Computers Math. Applic.* **41**: 15-38.

Humboldtiana NEOGRANADINA

Alberto Gómez Gutiérrez

Presentación del autor

La *Humboldtiana neogranadina*, obra en cinco volúmenes escrita, compilada y editada por el autor de la presente nota, busca revisar en detalle el aporte Alexander von Humboldt (1769-1859) en la ciencia y la cooperación transnacional en lo que se refiere al actual territorio de Colombia. El *modus operandi* por el que se optó, menos con ánimo apologético y más con ánimo de documentar una sustanciosa serie de encuentros y presencias decimonónicas que se pueden deducir de los papeles humboldtianos, consiste en hacer girar los hallazgos de Alexander von Humboldt en los dominios de la naturaleza y de la sociedad en torno al día a día de su paso por el virreinato de la Nueva Granada. La obra acompaña a Alexander von Humboldt y a Aimé Bonpland (1773-1858), su binomio francés, en un recorrido esencialmente limitado por las actuales fronteras de Colombia.

Este recorrido –que se abre en el primer volumen con la reflexión del profesor Frank Holl, de la Münchner Wissenschaftstage de Alemania, seguidas por las palabras del padre Jorge Humberto Peláez, S. J., rector de la Pontificia Universidad Javeriana, y luego por las de Pablo Navas Sanz de Santamaría, rector de la Universidad de los Andes de Bogotá– se inicia con la descripción de los encuentros preliminares que trajeron al explorador prusiano a la Nueva Granada, una vez presentada una corta autobiografía preneogranadina escrita por él mismo en España –acompañada de su cronología juvenil–, así como una reseña biográfica sobre su compañero Aimé Bonpland.

La obra se interna luego en territorios hoy colombianos, partiendo de la desembocadura del río Meta en el Orinoco, en lo que hoy corresponde a los Llanos Orientales, y de allí sigue hacia el sur, río arriba, hasta la población de San Carlos sobre el Río Negro que prolonga las aguas del río Guainía más allá de la frontera suroriental de Colombia. Dejando de lado los pormenores de su regreso a la costa venezolana y su paso por la isla de Cuba, se hace referencia a su segunda (y muy azarosa) entrada a este territorio, esta vez por vía marítima sobre las aguas caribeñas del golfo de Morrosquillo, hasta llegar a Cartagena; después se sigue, en sentido nortesur, a través de la ruta Cartagena-Turbaco-Canal del Dique hasta el río Magdalena, remontando esta arteria fluvial hasta Honda. Una vez allí, se describe su correría por las minas de Santa Ana y Mariquita antes de volver a la villa ribereña en donde habían desembarcado, para ascender finalmente la cordillera oriental de los Andes, por la vía de Guaduas, hasta Santafé. Humboldt y Bonpland se estacionaron en la Sabana de Bogotá cerca de dos meses con diferentes encuentros en torno a José Celestino Mutis (1732-1808), su principal anfitrión, en medio de valiosas excursiones y hallazgos.

El viaje continúa posteriormente hacia Popayán por la vía Fusagasugá-Ibagué-Cartago, cruzando por el hito geográfico principal de lo que se llamó “el Quindío”, es decir, el paso de la cordillera Central entre el valle del río Combeima y el valle del río Cauca. En Popayán se constata cómo se fue configurando la tercera convivencia neogranadina en orden de importancia científica después de sus interacciones con el capitán Joaquín Francisco Fidalgo (1758-1820) en Cartagena y con Mutis en Santafé: su encuentro al norte de Ibarra con un joven ilustrado, Francisco José de Caldas (1768-1816). Una vez visitada con Humboldt y Bonpland la



villa natal de Caldas y sus alrededores, la crónica lleva a Pasto para salir definitivamente del hoy territorio colombiano al terminar el año de 1801, cuando los viajeros se internaron en las regiones actuales de Ecuador y luego en los territorios del virreinato del Perú.

Un tercer paso fugaz, a través de las fronteras marítimas de Colombia, los llevó a navegar cerca de la isla de Malpelo en el océano Pacífico colombiano. Este no fue, sin embargo, el último adiós a la sociedad neogranadina. Sucesivamente, en el curso del nuevo siglo, se configuraron encuentros críticos, con impacto positivo tanto en esta nación como en los trabajos del propio barón prusiano, entre los cuales se destaca su encuentro personal en París con Simón Bolívar (1783-1830), pero, sobre todo, desde el punto de vista científico, con algunos miembros de las élites neogranadinas cuyo principal exponente en esos años fue el coronel Joaquín Acosta (1800-1852) y, muy especialmente, con quienes vendrían a continuar la cooperación científica transnacional europea, esta vez originada en Francia y en Italia, en cabeza de Jean-Baptiste Boussingault (1801-1887) y Agustín Codazzi (1793-1859), respectivamente. Todo esto se describe en el segundo volumen.

Se incluyen luego, en el tercer volumen, después de la Presentación del psicólogo y comunicador Germán Rey Beltrán y de la Introducción de Henry Bradford Sicard, rector del Colegio de Estudios Superiores en Administración en Bogotá, once textos originales de Humboldt asociados con la Nueva Granada que comprenden: a) una autobiografía escrita por el prusiano en Bogotá en 1801; b) la *Memoria raciocinada de las salinas de Zipaquirá*; c) el texto integral de la *Geografía de las plantas* (con comentarios de Francisco José de Caldas, Joaquín Acosta y Ernesto Guhl); d) el “Prefacio” en la obra *Plantæ æquinoctiales*; e) “Extractos neogranadinos a la Estadística de México”, comentados por Caldas; f) el “Estado de las minas metálicas en la Nueva Granada”; g) extractos de los “Prolegómenos e índices” en la obra *Nova genera et species plantarum*; h) La “Memoria sobre la Provincia de Antioquia y sobre el descubrimiento del platino en su matriz”; i) la “Descripción de la Sabana de Bogotá”; j) las “Notas biográficas” de Humboldt sobre José Celestino Mutis, y de Bonpland sobre Francisco Antonio Zea, publicadas en la *Biografía Universal* de los hermanos Michaud; k) la serie de estudios sobre las “Fuentes termales y volcanes de lodo, de azufre y de fuego en la Nueva Granada”. Además de estos textos, una detallada relación de “Publicaciones originales de Alexander von Humboldt” busca sintetizar la heteróclita producción impresa del viajero berlinés. Cierra este tomo el Epílogo de Juan Luis Mejía Arango, exministro de Cultura de Colombia y rector de la Universidad Escuela de Administración, Finanzas y Tecnología (EAFIT) de Medellín.

El acompañamiento detenido a los viajeros de la comisión franco-prusiana del paso del siglo XVIII al siglo XIX y su producción específicamente neogranadina se complementaron, en el cuarto volumen, con la presentación de la iconografía original y los textos científicos de Humboldt relativos al virreinato de la Nueva Granada. Estos trabajos se presentan temáticamente, en capítulos titulados “Cartografía”, “Astronomía”, “Paisajismo”, “Arqueología”, “Zoología”, “Paleontología”, “Antropología biológica” y “Geografía e hidrología”. Adicionalmente, se ofrecen dos capítulos que tratan sobre dimensiones complementarias de la prospección científica de esta comisión que abrió el siglo XIX: el primero, bajo el título de “Geología y mineralogía neogranadinas” (escrito con el historiador Jorge Tomás Uribe Ángel) y el segundo, “Humboldt, Bonpland y las plantas neogranadinas” (redactado en colaboración con el botánico e historiador Santiago Díaz Piedrahita y con el filólogo y orquideólogo Pedro Ortiz Valdivieso, S. J., quienes aportaron sus luces sobre la magna obra taxonómica que publicaron estos viajeros en los dos tomos del *Plantæ æquinoctiales* y en los siete tomos del *Nova genera et species plantarum*). Se incluyen a continuación la descripción e instrucciones de utilización del portal www.geoatco.net –desarrollado en colaboración con Fernando Salazar, Omar Rivera y Mauricio Cubides–, en el que se podrá encontrar la georreferenciación digital del recorrido de la expedición de Humboldt y Bonpland, en escala 1:24000.

Este mismo volumen fue presentado por Hernando García Martínez, subdirector de investigaciones del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, y epilogado por José Manuel Restrepo Abondano, rector saliente de la Universidad del Rosario y actual ministro de Comercio, Industria y Turismo de Colombia, y contiene cinco aportes independientes de los académicos bogotanos Mauricio Nieto Olarte, Jorge Arias de Greiff, Margarita Serje de la Ossa, Vicente Durán Casas, S. J. y Carl Langebaek Rueda, bajo los respectivos títulos de “Ciencia, romanticismo y viajes de exploración”, “Encuentros científicos en torno a Alexander von Humboldt en la España americana”, “Ideas para una geografía de las plantas: la paradójica visión de Humboldt sobre la América equinoccial”, “Kant, Humboldt y el Salto de Tequendama: dos prusianos unidos por la geografía” y “Civilización y salvajismo en un hombre europeo: entre la Ilustración y el Romanticismo”.

El quinto volumen de la *Humboldtiana neogranadina*, que contiene la cartografía y otras ilustraciones en gran formato además de una iconografía específicamente neogranadina de Humboldt y Bonpland, se abre con las palabras de Luis David Prieto Martínez, vicerrector académico de la Pontificia Universidad Javeriana y del genetista Jaime Bernal Villegas, cuando era rector de la Universidad Tecnológica de Bolívar en Cartagena, y se cierra con el Epílogo de Juan Carlos Henao, rector de la Universidad Externado de Colombia y de Fernán Vejarano Alvarado, uno de sus más destacados profesores de demografía e historia.

Finalmente, en un cuadernillo anexo, se recopilan el “Índice general” y el “Índice onomástico” correspondientes a todos los tomos anteriores, y se incluye el listado de biografías académicas de los colaboradores y autores de los textos recopilados en esta colección.

Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS

Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Editor asociado en Ciencias Biomédicas, *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*

Humboldtiana NEOGRANADINA

Alberto Gómez Gutiérrez

Humboldtiana neogranadina is a five volume collection written, compiled and edited by geneticist Alberto Gómez Gutiérrez, corresponding member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences, which seeks to review in high detail the contribution Alexander von Humboldt (1769-1859) and Aimé Bonpland (1773-1858) to science and transnational cooperation, on the current territory of Colombia. This work registers the findings of Alexander von Humboldt in the domains of nature and society on his day to day passage through the Viceroyalty of New Granada in a journey essentially limited by the current borders of Colombia, less with an apologetic spirit than with the intention of documenting a substantial series of nineteenth-century encounters and presences that can be deduced from the Humboldtian papers.

Volume I opens with the words of Professor Frank Holl, from the Münchner Wissenschaftstage in Germany, the words of Father Jorge Humberto Peláez, S. J., rector of Pontificia Universidad Javeriana, and Pablo Navas Sanz de Santamaría, rector of Universidad de los Andes in Bogotá, followed by a description of preliminary meetings that brought the Prussian explorer to New Granada. Volume 1 includes a short pre-biographical autobiography written by himself in Spain accompanied by his juvenile chronology, as well as a biographical review of Aimé Bonpland.

The work then enters into Colombian territory, starting on April 12, 1800, on the river mouths of the Meta into the Orinoco. From there it continues southward and upstream, up to the town of San Carlos upon Rio Negro which extends the waters of the Guainía river beyond the southeastern border of Colombia. Leaving aside the details of his return to the Venezuelan coast and his passage on the island of Cuba, reference is made to his second (and very risky) entry to the Colombian territory, this time by sea on the Caribbean waters of the Morrosquillo Gulf, then Cartagena, and their journey by the Turbaco-Canal del Dique route towards the Magdalena River, going up this fluvial artery up to Honda.

Once there, after visiting the mines of Santa Ana and Mariquita and returning to Honda, they finally ascend the eastern mountain range of the Andes, via Guaduas up to Santafé de Bogotá. Humboldt and Bonpland stationed in the Bogotá Savannah nearly two months and had multiple personal meetings around José Celestino Mutis (1732-1808), his main host, in the midst of valuable excursions and discoveries.

The trip then continues to Popayán via the Fusagasugá-Ibagué-Cartago trail, crossing the main geographical landmark of what was called “El Quindío”, that is: the passage of the Central mountain range between the valley of the Combeima river and the valley of the Cauca river. In Popayán, a third Neogranadian encounter of scientific value is prepared and associated with the enlightened Francisco José de Caldas (1768-1816), months after his interactions with Captain Joaquín Francisco Fidalgo (1758-1820) in Cartagena and José Celestino Mutis in Santafé de Bogotá.

Once Humboldt and Bonpland ended their visit to the native town of Caldas and its surroundings, the chronicle takes them to Pasto before definitively leaving the Colombian territory on the last day of december 1801, when the travelers continued to the present lands of Ecuador and the territories of the Viceroyalty of Peru.



A third passage through today's Colombian maritime territories, led them to navigate near the island of Malpelo, in the Colombian Pacific Ocean. This was not, however, their last goodbye to the Neogranadian society. Subsequently, in the course of the first half of the XIXth century, critical encounters with Neogranadians took place in Europe, with a positive impact both on the upcoming nation of Colombia and the works of the Prussian Baron himself among which his personal encounter in Paris with Simón Bolívar (1783-1830) stands out. These encounters are described in the second volume where subsequent personal relationships with some members of the Colombian elites in scientific domains are detailed, among which the reader will find those with a main disciple in those years, Colonel Joaquín Acosta (1800-1852), and especially with two europeans who would continue the transatlantic scientific cooperation, Jean-Baptiste Boussingault (1801-1887) and Agustín Codazzi (1793-1859).

The third volumen of *Humboldtiana neogranadina* starts with the Presentation of the psychologist and communicator Germán Rey Beltrán and the Introduction of Henry Bradford Sicard, rector of the College of Advanced Studies in Administration in Bogotá, and includes eleven original Humboldt writings specifically associated with New Granada, comprising: a) an autobiography written by the Prussian in Bogotá in 1801; b) a *Reasoned report on the salt mines of Zipaquirá*; c) the integral text of the *Geography of the plants* (with comments by Francisco José de Caldas, Joaquín Acosta and Ernesto Guhl); d) the "Preface" in the work *Plantæ æquinoctiales*; e) "Extracts from the statistics of Mexico", commented by Caldas; f) the "State of metallic mines in New Granada"; g) extracts of the "Prolegomena and Indexes" in the work *Nova genera et species plantarum*; h) The "Report on the Province of Antioquia and on the discovery of platinum in its matrix"; i) the "Description of the Bogotá Savannah"; j) the "Biographical Notes" of Humboldt on José Celestino Mutis, and Bonpland on Francisco Antonio Zea, published in the *Biographie Universelle* of the Michaud brothers, and k) the series of studies on "Thermal sources and volcanoes of mud, sulfur and of fire in New Granada", in addition to a list of "Original publications by Alexander von Humboldt", which seeks to synthesize the heteroclite printed production of the Prussian traveler. This volume closes the Epilogue of Juan Luis Mejía Arango, past minister of Culture in Colombia and present rector of the University School of Administration, Finance and Technology of Medellín.

The detailed accompaniment of the travelers of the Franco-Prussian commission in the eighteenth and the nineteenth century and their Neogranadian endeavors were complemented, in the fourth volume – after the Presentation of Hernando García Martínez, deputy director of research at the Alexander von Humboldt Biological Resources Research Institute, and before the Epilogue of José Manuel Restrepo Abondano, past rector of Universidad del Rosario and present minister of Commerce, Industry and Tourism in Colombia–, with the original iconography and scientific texts of Humboldt concerning the viceroyalty of New Granada. These works are distributed thematically, in chapters entitled “Cartography”, “Astronomy”, “Landscape”, “Archeology”, “Zoology”, “Paleontology”, “Biological anthropology” and “Geography and hydrology”. Additionally, two chapters are offered which deal with complementary dimensions of the scientific prospecting of this commission that opened the eighteenth century: the first, under the title of “Geology and Neogranadian mineralogy” (written with the historian Jorge Tomás Uribe Ángel) and the second, “Humboldt, Bonpland and the plants of New Granada” (written in collaboration with the late botanist and historian Santiago Díaz Piedrahita and the late philologist and orchidologist Pedro Ortiz Valdivieso, S.J., who contributed their thoughts on the great taxonomic work that these travelers published in the two tomes of the *Plantæ æquinoctiales* and in the seven volumes of *Nova genera et species plantarum*). The description and instructions for using the web portal www.geoatico.net –developed in collaboration with Fernando Salazar, Omar Rivera and Mauricio Cubides– are included below, in which the digital georeferencing of the Humboldt and Bonpland expedition route can be found in scale 1:24.000. This same volume was, and contains five independent contributions by Colombian scholars – Mauricio Nieto Olarte, Jorge Arias de Greiff, Margarita Serje de la Ossa, Vicente Durán Casas, S.J., and Carl Langebaek Rueda–, under the titles “Science, romanticism and exploration voyages”, “Scientific encounters around Alexander von Humboldt in the American Spain”, “Ideas for a geography of plants: the paradoxical vision of Humboldt on equinoctial America”, “Kant, Humboldt and the Tequendama Falls: two Prussians united by geography” and “Civilization and savagery in a European man: between the Enlightenment and Romanticism”.

The fifth volume of *Humboldtiana neogranadina*, which contains large-scale cartography and other Neogranadian illustrations, in addition to a selected iconography of Alexander von Humboldt and Aimé Bonpland, opens with the words of Luis David Prieto Martínez, vice-rector of Pontificia Universidad Javeriana and those of geneticist Jaime Bernal Villegas, rector of Technological University of Bolívar in Cartagena, and closes with the Epilogue of Juan Carlos Henao, rector of Externado de Colombia and of Fernán Vejarano Alvarado, one of its most outstanding professors of demography and history.

Finally, an annexed booklet compiles the “General Index” and the “Onomastic Index” corresponding to all the previous volumes, as well as academic biographies of collaborators and authors of the texts compiled in *Humboldtiana neogranadina*.

Alberto Gómez Gutiérrez, PhD FLS

Miembro correspondiente de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Editor asociado en Ciencias Biomédicas, Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Durante la Sesión Solemne Estatutaria realizada el miércoles 14 de agosto de 2019 se hizo entrega del Premio Nacional a la Obra Integral en Ciencia 2019 al doctor Luis Fernando García Moreno y también se dio posesión como Miembro Honorario al Profesor Sir Ghillean T. Prance.

Compartimos las palabras de agradecimiento del doctor García y el resumen de la conferencia del nuevo Académico Honorario: “The Earth under Threat”

Palabras de agradecimiento del doctor Luis Fernando García.

Al recibir la noticia de que había sido seleccionado como ganador del **Premio Nacional a la Obra Integral en Ciencia - 2019** fueron muchas las preguntas y las reflexiones que me hice y los recuerdos que vinieron a mi mente. ¿Qué significa "obra integral"? ¿Es realmente mi quehacer en ciencia merecedor de esta distinción? ¿Será que mis maestros, mis discípulos, mis colegas y quienes han estado cerca de mis actividades en ciencia estarán de acuerdo con el jurado? ¿si he realmente aportado al conocimiento en las áreas en que he enfocado mis investigaciones? ¿es este país un poco mejor gracias a mi trabajo? En fin, son muchas las preguntas de estas últimas semanas, pero el adjetivo “integral”, del título de la distinción, es el que más inquietudes me ha suscitado y creo que su significado se puede abordar desde tres elementos principales: generar conocimiento científico, formar científicos, y ayudar a la institucionalización de la ciencia, en un país que aún no logra hacerlo “integralmente”.

Permítanme, brevemente, hacer mi propio resumen de estos tres elementos. Debo empezar afirmando que, desde mis años de bachillerato, cuando descubrí la ciencia, siempre quise ser un investigador y debo agradecerle a la vida, a mis maestros y a mi institución, la Universidad de Antioquia, que me hayan permitido serlo. Estudié medicina porque quería investigar la biología del ser humano, nunca el ejercicio clínico fue una tentación. Desde el primer semestre de universidad me encontré con la inmunología, gracias a mis maestros de esa época y de siempre, la académica honoraria Ángela Restrepo (la patrona) y los profesores Marcos Restrepo y Federico Díaz del Departamento de Microbiología y Parasitología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia. El estudio del sistema inmune en condiciones normales y patológicas es lo que me ha fascinado en estas cinco décadas de vida académica. Entender como la evolución ha generado un complejo sistema de reconocimiento de la individualidad biológica que nos permite, en un continuo contraste entre lo propio y lo no propio, enfrentar a otros seres vivos que también evolutivamente han desarrollado estrategias para sobrevivir,

en algunos casos a costa de la salud y muchas veces de la vida de sus hospederos. Pero esa difícil tarea de identificar, reaccionar y tratar de eliminar los microorganismos patógenos no siempre se logra y en oportunidades es deficiente, o se reacciona agresivamente frente a moléculas que no representan un peligro real, e inclusive se llega a reaccionar contra nuestras propias moléculas. En mi caso han sido dos las líneas principales de investigación: la respuesta inmune en tuberculosis y la inmunología de los trasplantes de órganos y tejidos; que curiosamente, a pesar de lo diferentes, tienen como trasfondo una misma pregunta: ¿por qué unos si y otros no? como trataré de demostrarles.

La tuberculosis es una infección que hace unos años creímos haber derrotado y que encontraríamos solo en las obras literarias de Thomas Mann, en las pinturas de Edvard Munch o en algunas óperas, para dar solo algunos ejemplos. Sin embargo, la tuberculosis sigue siendo en el mundo la primera causa de muerte por un único microorganismo, con cerca de dos millones de muertes por año a nivel mundial. Su agente etiológico, el *Mycobacterium tuberculosis*, comúnmente conocido como el Bacilo de Koch, tiene la misma edad y el mismo origen geográfico del *Homo sapiens*, ambos se originaron hace 5 millones de años en África y desde entonces han coevolucionado y se han acompañado, no siempre en los mejores términos; al punto de que el daño de los tejidos característico de la enfermedad no es causado directamente por el microorganismo, sino por la reacción inmunológica que la infección desencadena. Nuestras preguntas, y las de muchos otros investigadores en el mundo, tienen que ver con las diferencias inmunológicas y genéticas entre quienes, después de infectarse, desarrollan la enfermedad activa, alrededor de un 10%, y el 90% de los infectados que permanecen con una infección latente durante su vida, mientras su sistema inmune funcione adecuadamente. Vale resaltar que una tercera parte de la humanidad está infectada con esta bacteria. Han sido dos nuestros principales aportes en este campo: Durante más de veinte años en nuestro grupo, y particularmente con mis antiguos estudiantes y hoy colegas, Mauricio Rojas y Luis Fernando Barrera, hemos estudiado los mecanismos genéticos, moleculares y celulares que inciden en el destino de los macrófagos, las células

que fagocitan el bacilo. Nuestros hallazgos permitieron evidenciar dos posibles desenlaces: la primera posibilidad es que el bacilo se multiplique intracelularmente, el macrófago sufra un proceso de muerte conocido como necrosis, se liberen las bacterias que infectarán otros macrófagos y, adicionalmente sustancias capaces de causar el daño de los tejidos del hospedero. La segunda posibilidad es que el macrófago infectado inicie unos programas de muerte celular conocidos como apoptosis y autofagia en los cuales muere, pero no permite la proliferación, ni la liberación de las micobacterias, ni de las sustancias proinflamatorias, de tal manera que este segundo proceso es un mecanismo de defensa. Estudiamos, además, la presentación de estos tipos de muerte de los macrófagos en los pacientes y en los individuos con tuberculosis latente y su posible utilización como un biomarcador de susceptibilidad o resistencia en las personas convivientes de pacientes con tuberculosis activa. El otro aspecto de la inmunología de la tuberculosis que hemos estudiado en detalle, principalmente con Sara París y Nancy Marín, entre otros estudiantes y colegas, es la respuesta de las células T, particularmente las alteraciones en la respuesta de las pacientes con tuberculosis activa en comparación con quienes tienen una infección latente. Una investigación importante fue el estudio de una numerosa cohorte de más de 2000 convivientes de pacientes con tuberculosis activa, realizado en colaboración con epidemiólogos de la Facultad de Salud Pública y microbiólogos de la Corporación para Investigaciones Biológicas, en la que encontramos que, paradójicamente, los convivientes altos productores de la citoquina IFN- γ , tienen un mayor riesgo de desarrollar enfermedad activa en los dos años siguientes al contacto.

La otra línea de trabajo, la inmunología de trasplantes se originó por la solicitud institucional de darle apoyo al programa de trasplantes de la Universidad de Antioquia y el Hospital San Vicente de Paúl, pionero en el país en los años setenta con los primeros trasplantes exitosos de riñón, médula ósea, e hígado y posteriormente de corazón en la Clínica Santa María; desde entonces nuestro laboratorio ha realizado los estudios de compatibilidad (HLA) y de anticuerpos antidonante para estos programas, pero también hemos investigado los mecanismos inmunológicos de la tolerancia operativa que se presentan en algunos pacientes, que a pesar de no recibir terapia inmunosupresora, no rechazan los injertos, en la búsqueda de biomarcadores predictores de rechazo o tolerancia y la correlación entre HLA y sobrevida de injertos. Mi estudiante y hoy colega Cristiam Alvarez ha continuado la coordinación de la prestación de estos servicios en forma muy exitosa. Quiero resaltar dos hechos importantes en el campo de los trasplantes: primero nuestra participación, desde 1985, en el Estudio Colaborativo Internacional (CTS), coordinado por el profesor Gerhard Opelz de la Universidad de Heidelberg (Alemania), en el cual hemos sido los principales contribuyentes en América Latina y que nos ha permitido una colaboración muy productiva con esa prestigiosa universidad; segundo, lograr

la acreditación internacional de la European Federation of Immunogenetics (EFI) que nos garantiza prestar estos servicios científico-técnicos con los más altos estándares de calidad establecidos en el mundo.

Hay otras áreas diferentes en que también hemos investigado, aunque no con la profundidad de las dos ya mencionadas; sin embargo, todo lo anterior pasa por la participación de un gran número de estudiantes de pregrado, maestría y doctorado, que a lo largo de estos años me han brindado el privilegio de ayudarles en su formación científica. La gran mayoría son hoy excelentes investigadores, algunos en instituciones nacionales, otros en reconocidas universidades de Norteamérica y Europa. Para todos los que han creído que yo podía participar en su formación científica, que siempre me enriquecieron como persona y como científico y que son quienes realmente, con sus inteligencias y sus manos, lograron que los proyectos llegaran a un buen final, expreso mis más profundos sentimientos de agradecimiento y admiración. Ellos constituyen la pequeña “bola de nieve” que todos los que transitamos por la vida científica vamos formando poco a poco, que ellos luego incrementan con sus propios estudiantes y que confluyen en las comunidades de ciencia que trascienden las barreras de tiempo y espacio geográfico. Y es que pertenecer a esas comunidades hace más fascinante la vida científica; en mi caso, permítanme afirmarlo, en la comunidad nacional e internacional de inmunólogos he encontrado seres humanos, científicos y amigos maravillosos que me hacen valorar aún más mi proyecto de vida.

El tercer componente de la integralidad es la institucionalidad, tanto local como nacional e internacional. A nivel local, la Universidad de Antioquia, mi alma mater, “invicta en su fecundidad”, ha sido siempre pródiga en apoyos y reconocimientos. Durante cincuenta años, desde el pregrado, ha sido el eje fundamental para mi proyecto de vida en ciencia; me enorgullece haberle podido servir y contribuir en la consolidación de la investigación, uno de sus principios misionales, desde la dirección del Centro de Investigaciones Médicas, la Vicerrectoría de Investigación, la dirección científica de la Sede de Investigación Universitaria, los posgrados en ciencias básicas biomédicas y, principalmente, en la creación y coordinación del Grupo de Inmunología Celular e Inmunogenética, hoy coordinado por Gloria Vásquez.

A nivel nacional no puedo dejar de recordar el entusiasmo con que en los años noventa del siglo pasado, en compañía de muchos científicos aquí presentes, participamos, así fuera en segundos planos, en la implementación de la ley 29 de 1990 que creó el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología. Bajo el liderazgo de Clemente Forero y Fernando Chaparro, directores de Colciencias en esos años, y sus equipos directivos, se implementaron los Consejos Nacionales de Ciencia y Tecnología, se formalizó la figura de los grupos de investigación se impulsó la creación de los programas

de doctorados y se establecieron las becas doctorales, entre otras importantes iniciativas que en su momento llenaron a la comunidad científica de esperanzas. Tuve el honor de participar en dos periodos en el Consejo Nacional de Ciencias Básicas y en otros dos en el Consejo de Ciencia y Tecnología de la Salud y créame que el entusiasmo que como comunidad científica le pusimos a esas tareas, no se corresponde con las frustraciones por el manejo político de la ciencia y los magros recursos recibidos por parte de los gobiernos nacionales en las décadas siguientes. De todas maneras, debo agradecer a Colciencias el apoyo recibido durante muchos años que permitió que nuestras propuestas de investigación pudieran realizarse y nuestros estudiantes de doctorado tuvieran el apoyo necesario para su formación.

Espero que el nuevo Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación sea capaz de convocar a una comunidad científica, comprometida, pero escéptica, y ofrecerle al país las bases de una política de desarrollo científico sostenible social, económica y ambientalmente. Hago explícito el reconocimiento al papel cada vez más protagónico de nuestra querida Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, con el liderazgo de Enrique Forero, en el impulso de una política de ciencia y tecnología robusta y duradera.

No puedo terminar sin hacer una alusión a mi familia, a mi padre un profesor de música soñador, a mi madre una mujer de gran inteligencia y empuje, a mis siete hermanos soñadores e inteligentes, con quienes los lazos afectivos siempre se han complementado con un permanente intercambio intelectual muy enriquecedor. Finalmente, a Lina, mi compañera y cómplice en las buenas y las malas durante 40 años. Lina siempre entendió y respetó esas frases que seguramente todos nosotros, los investigadores aquí

presentes, hemos repetido mil veces: “no tengo tiempo, tengo que estudiar”, “no puedo, tengo que ir al laboratorio”. Para ella todo mi amor.

Muchas gracias

Luis Fernando García Moreno

Académico de Número de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Resumen de la conferencia a cargo del nuevo Académico Honorario profesor Sir Ghilleen T. Prance.

“The Earth under Threat”

Many recent reports draw attention about the urgency of addressing and halting climate change. No one is more aware of this than biologists who study nature and are observing the changes caused by climate change. Many of these changes are having negative effects and are causing the loss of habitat and species. This lecture will concentrate on some examples of biological indications of climate change such as changes in the phenology of plant flowering times and bird migrations, the advance of plants towards the poles and to higher elevations on mountains and the blanching of coral reefs. Some of the solutions needed are the halting of deforestation accompanied by an increase in reforestation, a reduction in the amount of cattle accompanied by an increase in fish farming, halting world population growth, and much greater use of sustainable and nonpolluting sources of energy. To accomplish the degree of change needed to reverse climate change will require considerable ethical and moral decisions and choices by world leaders and by individuals. ■

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.racefyn.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.racefyn.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 been 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.



