

ISSN 0370-3908 ISSN 2382-4980 (En linea)

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

Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

Vol. 40 · Número 155 · Págs. 185-374 · Abril - Junio de 2016 · Bogotá - Colombia

FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS **Y THENORIO**



Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales ISSN 0370-3908 ISSN 2382-4980 (En linea)

Elizabeth Castañeda

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

Vol. 40 • Número 155 • Págs. 185-374 · Abril - Junio de 2016 · Bogotá - Colombia

Comité editorial

Editora en jefe

Ū	Instituto Nacional de Salud, Bogotá, Colombia					
Editores asociados	Ciencias físicas Bernardo Gómez Departamento de Física,	Hernando Ariza Calderón Universidad del Quindío, Armenia, Colombia				
	Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia Rubén Antonio Vargas Zapata	Rafael Baquero Cinvestav, México				
	Universidad del Valle, Cali, Colombia Pedro Fernández de Córdoba	Angela Stella Camacho Beltrán Departamento de Física, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia				
	Universidad Politécnica de Valencia, España	Matemáticas				
	Diógenes Campos Romero Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia	Victor Albis Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia				
	Román Eduardo Castañeda Sepúlveda Universidad Nacional, Medellín, Colombia	Jorge Ivan Cossio Betancur Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia				
	Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia	Luis Español González Universidad de la Rioja, España				
	Universidad del Valle, Cali, Colombia Gabriel Téllez	Jaime Ignacio Lesmes Camacho Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia				
	Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia Luis Álvaro Morales Aramburo	Luis Carlos Arboleda Universidad del Valle, Cali, Colombia				
	Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia Germán A. Pérez Alcázar	José R. Quintero Universidad del Valle, Cali, Colombia				
	Universidad del Valle, Cali, Colombia	Ciencias químicas				
	Enrique Vera López Universidad Politécnica, Tunja, Colombia	Sonia Moreno Guaqueta Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia				
	Jairo Roa-Rojas Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia	Fanor Mondragón Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia				

Moisés Wasserman Lerner Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Myriam Sánchez de Gómez Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Héctor Fabio Zuluaga Corrales Universidad del Valle, Cali, Colombia

Fernando Martínez Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Betty Lucy López Osorio Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia

Ciencias naturales

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

Jaime Cantera Universidad del Valle, Cali, Colombia

Gabriel Roldán Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Antioquia, Colombia

Juan Armando Sánchez Muñoz Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Patricia Chacón de Ulloa Universidad del Valle, Cali, Colombia

Sandra Baena Garzón Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia

Néstor Hernando Campos Campos Universidad Nacional de Colombia, Sede Caribe, Colombia

Jorge Enrique Llorente Universidad Nacional Autónoma de México, México

Santiago Melo Gaviria Universidad de Viena, Austria

Martha Patricia Ramírez Pinilla Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Carlos Daniel Cadena Ordoñez Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia Santiago Madriñán Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Ciencias de la tierra

José Ignacio Martínez Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Germán Poveda Jaramillo Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

Armando Espinosa Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

Carlos Alberto Vargas Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Fabio Cediel Melo Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Jaime Ignacio Vélez Upegui Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Carlos Alberto Jaramillo Muñoz Smithsonian Tropical Research Institute, Panamá

Ciencias biomédicas

Luis Fernando García Universidad de Antioquia, Medellin, Colombia

Felipe Guhl Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Leonardo Puerta Llerena Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia

Gustavo Adolfo Vallejo Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia

Luis Caraballo Universidad de Cartagena, Colombia

Eduardo Alberto Egea Bermejo Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia

Ciencias humanas

Rubén Ardila Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Guillermo Páramo Universidad Central, Bogotá, Colombia

Comité científico internacional

Ángela María Guzmán University of Central Florida, Orlando, Estados Unidos

Antoine M. Cleef University of Amsterdam, Holanda Carlos Jiménez Universidad de La Coruña, España

Gioconda San Blas Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, Venezuela José Rubens Pirani Universidade de São Paulo, Brasil

Wolfgang Gieren Universidad de Concepción, Chile

Asistencia y coordinación editorial Carolina Acosta

Corrección de estilo y ortografía Marta Renza **Diagramación** Johanna Morales **Impresión y acabados** Gente Nueva

Reseñada en los siguientes índices nacionales e internacionales:

Actualidad Iberoamericana Agris CIRS Current Mathematical Publications Dialnet EBSCO Historia Mathematica Index Kewensis Latindex Mathematical Reviews MathSciNet (on line data base) OCLC (Online Computer Library Center)

PERIODICA Publindex, Colciencias RLG SciELO Zentralblatt für Mathematik Zoological Record

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

Página web de la revista: www.raccefyn.co Correo electrónico: revista@accefyn.org.co Sede de la Academia: Cra. 28a No.39a - 63 Bogotá, Colombia Teléfonos: (571) 244 3186 - 268 3290 - 268 2846



Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

ISSN 0370-3908 ISSN 2382-4980 (En linea)

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

Vol. 40 • Número 155 • Págs. 185-374 · Abril - Junio de 2016 · Bogotá - Colombia

Contenido - Contents

	Las mariposas de Francisco José de Caldas y Thenorio						
Nuestra	The butterfly collection of Francisco José de Caldas y Thenorio						
portaŭa	M. Gonzalo Andrade-C						
	Proporciones de la entropía aplicadas a la unidad de cuidados intensivos: predicciones en infarto agudo de miocardios						
Ciencias biomédicas Biomedical Sciences	Entropy proportions applied to intensive care unit: Predictions in acute myocardial infarction Javier Rodríguez-Velásquéz, Signed Prieto-Bohórquez, Catalina Correa-Herrera, Gydnea Aguirre-Dávila, Sandra Medina-Araujo, María Soracipa-Muñoz, Aura Wilches-Betancour, Laura Méndez-Pino, Hebert Bernal-Castro, Natalia Hoyos-Ortíz						
	Los diversos efectos de las helmintiasis sobre la inflamación alérgica						
	The various effects of helminthiases on allergic inflammation						
	Luis Caraballo	200					
	Distribution functions for a family of axially symmetric galaxy models						
	Funciones de distribución para una familia de modelos de galaxias axialmente simétricas						
Ciencias	Guillermo A. González, Juan F. Pedraza, Javier Ramos-Caro	209					
físicas Physical Sciences	Imanes permanentes: características, aplicaciones y futuro						
·	Permanent magnets: features, applications and future						
	Germán Antonio Pérez-Alcázar	221					
Ciencias	Las chalconas y su uso como precursores en la síntesis de compuestos heterocíclicos nitrogenados						
químicas Chemical Sciences	Chalcones and their use as precursors in the synthesis of nitrogen-containing heterocyclic compounds						
	Braulio Insuasty-Obando	234					
Ciencias	Biomasa del fitoplancton eucariota y su disponibilidad para la red trófica del embalse Riogrande II (Antioquia, Colombia)						
naturales Natural Sciences	Eukariotic phytoplankton biomass and its availability for the food web at Riogrande II reservoir (Antioquia, Colombia)						
	Mónica Tatiana López-Muñoz, John Jairo Ramírez-Restrepo, Jaime Alberto Palacio-Baena, Ricardo O. Echenique, Carlos E. De Mattos-Bicudo, Edison Andrés Parra-García	244					

	Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamerica					
	Macroinvertebrates as bioindicators of water quality: four decades of development in Colombia and Latin America					
	Gabriel Roldán-Pérez	. 254				
	Climate, habitat associations and the potential distributions of Neotropical birds: Implications for diversification across the Andes					
	Clima, asociaciones de hábitat y la distribución potencial de aves neotropicales: implicaciones para la diversificación a través de los Andes					
Ciencias naturales	Carlos Daniel Cadena, Carlos A. Pedraza, Robb T. Brumfield					
Natural Sciences	Bioerosion patterns in Tertiary rock cliffs of the Pacific coast of Colombia (Eastern Tropical Pacific)					
	Patrones de bioerosión en las serranias de roca del Terciario en la costa Pacífica colombiana (Pacífico occidental tropical)					
	Jaime R. Cantera-Kintz					
	Holobiont assemblages of dominant coral species (<i>Symbiodinium</i> types and coral species) shape Caribbean reef community structure					
	Conjuntos de holobiontes de especies dominantes de corales (Tipos de <i>Symbiodinium</i> y especies de corales) moldean la estructura comunitaria en arrecifes coralinos del Caribe					
	Alejandro Grajales, Juan Armando Sánchez	. 300				
	Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropias de basamento en el Valle Medio del Magdalena (VMM)					
	Structural style variation related with basement anisotropies in the Middle Magdalena Valley (MMV)					
Ciencias	Giovanny Jimenez, Oscar López, Leonardo Jaimes, Ricardo Mier Umaña	. 312				
de la tierra Earth Sciences	Nuevas evidencias que soportan la escisión de la formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia)					
	New evidence supporting the Silgara Formation' split-off and proposal of a new stratigraphic framework for the metamorphic basement of the Santander Massif (Colombian Fastern Cordillera)					
	Luis Carlos Mantilla-Figueroa, Carlos Alberto García-Ramírez, Víctor A. Valencia	. 320				
	Topological properties of spaces of projective unitary representations					
	Propiedades topológicas del espacio de representaciones unitarias proyectivas					
Matemáticas Mathematica	Jesús Espinoza, Bernardo Uribe	. 337				
Wathematics	Una aproximación a la construcción de modelos matemáticos para la					
	descripción de la naturaleza An approximation to setting un mathematical models for nature description					
	Farid Chejne J	. 353				
	Corressión de los outores	366				
	Correction de los autores	. 500				
	Enfoque y alcance	267				
	rocus and scope	. 30/				

Las mariposas de Francisco José de Caldas y Thenorio



Jorge Reynolds Pombo es un enamorado de la naturaleza, de la vida y de la obra del sabio Caldas, su pariente por el lado Thenorio. Es esta la razón por la cual heredó de su madre, la señora Rosa Pombo de Reynolds, una colección de insectos y mariposas que pertenecieron a Francisco José de Caldas y Thenorio, razón por la cual, las conserva desde hace muchos años.

Lino de Pombo, pariente de Reynolds en sexta generación, nació en Cartagena, tuvo mucho que ver con Caldas, eran muy amigos y cuando se vino para Bogotá ya estaban planeando la forma de cómo sacar a los españoles del país. Rafael Pombo, probablemente conoció a Caldas pero fue de su padre de quien recibió mucha información. Rafael Pombo vivió casi 20 años en Nueva York y a su regreso, heredó una buena fortuna por lo que-se dedicó a comprarle a la gente objetos del sabio Caldas. De esta forma hizo una colección y dentro de lo comprado estaba su escritorio. A su muerte y puesto que Rafael era soltero, los recuerdos de Caldas se

repartieron entre sus sobrinos nietos; uno de los cuales era Jorge Pombo, abuelo de Jorge quien había sido nombrado albacea de su testamento pero quien murió 8 días después de Rafael Pombo ya que durante los discursos en el cementerio desarrolló una pulmonía, y en esa época la pulmonía era prácticamente mortal. Fue entonces cuando nombraron a otra persona de la familia, en fin... por lo que finalmente la mamá de Jorge heredó el escritorio con sus cajas y todo.

Las cajas se encontraron en el escritorio del Sabio Caldas, que hoy es el escritorio de Jorge. La historia de todo esto comienza en la ciudad de Bogotá, en la casa de la carrera 13 con calle sexta, la casa donde él había nacido y como lo habían hecho otras cinco generaciones.

Frente a estas cajas, se resolvió que lo primero de todo sería realizar su limpieza, se procedió a abrirlas y a remover la enorme capa de polvo, a pesar de que se veían más o menos bien los colores, pero ya con la limpieza esto cambió totalmente, fueron como seis meses de este trabajo llevado a cabo una vez por semana.

Una de las cosas curiosas fueron los vidrios de las cajas, vidrios hechos a mano, en ese tiempo todavía no existían las máquinas para pulir y el tamaño de los vidrios era muy pequeño, además se anotaban las ondulaciones porque no eran totalmente planos. En una caja, Ángela Botero, esposa de Jorge, miró con cuidado y después de quitar la capa oscura que tenía encima, encontró un montón de arabescos dorados en todo el marco de las cajas, además y hasta donde era posible también se hizo una reconstrucción en el fondo de las cajas, las que tenía papel cromado (estaño), no se le quitó el papel cromado, sólo se arreglaron las cajas.

Alfredo Bateman nos contó en 1948 y 1952, Francisco José de Caldas nació en Popayán en el año de 1768, inició sus estudios en el seminario de su ciudad natal, en 1788 viajó a Santa Fe para continuar sus estudios en el Colegio Mayor del Nuestra señora del Rosario para viajar en 1801 a Quito, con el objeto de defender un pleito de su familia. Volvió ese mismo año hasta Ibarra (Ecuador) para encontrarse con Alexander von Humboldt, en cuya compañía hizo varias excursiones por los alrededores de Quito, y permanecieron

juntos algún tiempo en los Chillos, casa de campo del Marqués de Selva Alegre. Los estudios que Caldas llevara a cabo durante sus viajes estaban enfocados a realizar observaciones con el barómetro, la brújula, y el termómetro; midió así la altitud de varios sitios, y fijó las coordenadas geográficas de muchos lugares; también experimentó para descubrir si un insecto era venenoso, entre otros interesantes temas.

Decidimos estudiar las dos cajas en el apartamento de Jorge, por dos razones: la primera por la importancia histórica que tenían estos insectos y segundo porque ese era el lugar donde éstas se encontraban, por lo que el trabajo de curaduría se realizó allá.

En las cajas de insectos de Caldas, encontramos mariposas, cucarrones, libélulas, polillas, abejas y avispas, las que se calcula llevaban más o menos unos doscientos años sin que tales cajas se abrieran por primera vez. Esto lo comprobamos porque en la base de las cajas no habían más agujeros producto de los alfileres que tenían los ejemplares para sujetarlos, Jorge narra "Me acuerdo que en mi casa durante toda la vida desde que yo estaba muy pequeño, ahí estaban los dos marcos, cuando las miraba mi mamá me decía: - Estas cajas vienen por herencia del sabio Caldas, fue una colección que él hizo. - Cuando lo fusilaron, abrieron la casa, la gente entraba y cogían lo que quisieron, eso era: el motín de herencias "

Encontramos en total 106 insectos, divididos en dos cajas, una con 40 y la otra con 66. Los insectos se encontraban pinchados con un alfiler de la época, ya que su forma y textura no correspondían con los recientes por que los alfileres de ahora son los que se utilizan para la costura, no sirven para preservar insectos porque se oxidan muy rápido y esos alfileres tampoco eran entomológicos que están elaborados en acero inoxidable con cabeza de nylon.

Inicialmente le tomamos fotos a las dos cajas, antes de ser abiertas por primer vez, para después volver a dejar los insectos en sus lugares originales; así fue como nos dimos a la tarea de comenzar la limpieza de cada uno de los insectos, con mucho cuidado, primero utilizamos un pincel muy fino, para no quitarle las escamas a las mariposas; ya que las alas de las mariposas están cubiertas de unas escamas muy pequeñas.

El polvo que íbamos recolectando de los ejemplares fue guardado en un vial, algunas mariposas y demás insectos fueron soplados con aparatos de limpiar lentes de las cámaras de fotografía, los cucarrones, abejas fueron también limpiados con pincel y luego les dimos una baño con una solución contra hongos hasta lograr sus brillos naturales.

Actualmente continuamos con el estudio de estos insectos.

M. Gonzalo Andrade-C

Profesor Asociado Curador colección de mariposas Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia Miembro de Número, Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

La reproducción de la portada fue autorizada por los académicos Jorge Reynolds Pombo y M. Gonzalo Andrade-C

Artículo original

Proporciones de la entropía aplicadas a la unidad de cuidados intensivos: predicciones en infarto agudo de miocardio

Javier Rodríguez-Velásquéz^{1,2,*}, Signed Prieto-Bohórquez^{1,2}, Catalina Correa-Herrera^{1,2}, Gydnea Aguirre-Dávila³, Sandra Medina-Araujo⁴, María Soracipa-Muñoz^{1,2}, Aura Wilches-Betancour^{1,2}, Laura Méndez-Pino³, Hebert Bernal-Castro³, Natalia Hoyos-Ortíz³

¹Grupo de Investigación Insight, Línea de Profundización e Internado Especial
 "Teorías físicas y matemáticas aplicadas a la Medicina", Universidad Militar Nueva Granada
 ²Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, Bogotá, Colombia
 ³Facultad de Medicina, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia
 ⁴Departamento de Matemáticas, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia

Resumen

La teoría de sistemas dinámicos, así como la probabilidad y las proporciones de la entropía, sustentan una nueva metodología diagnóstica predictiva que diferencia los estados normales, agudos y crónicos, y la progresión hacia la enfermedad. En este estudio se evaluó la probabilidad y la entropía y sus proporciones de atractores dinámicos construidos a partir de la frecuencia cardiaca y el número de latidos por hora de 30 registros en monitor Holter normales y 60 de infarto agudo de miocardio. La metodología diferenció las dinámicas indicativas de infarto agudo de miocardio de gravedad, lo que la convierte en una herramienta de diagnóstico útil en la práctica clínica. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: diagnóstico, infarto agudo de miocardio, cuidado crítico.

Entropy proportions applied to intensive care unit: Predictions in acute myocardial infarction

Abstract

The theory of dynamical systems, as well as probability and entropy proportions support a predictive diagnostic methodology which differentiates normal, acute and chronic states and progression towards disease. We evaluated probability and entropy and its proportions of attractors constructed from heart rate and number of beats per hour of 30 normal Holter records and 60 with acute myocardial infarction. The methodology differentiated those dynamics indicative of myocardial infarction from normal ones, and quantified the severity of the dynamics, which makes it a useful diagnostic tool in clinical practice. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Diagnosis, acute myocardial infarction, critical care.

Introducción

La teoría de los sistemas dinámicos tiene como objeto de estudio el estado y la evolución de los sistemas (**Devaney**, 1992). En el contexto de esta teoría la dinámica puede representarse en espacios de fase y constituir atractores que pueden ser predecibles o impredecibles; un ejemplo de estos últimos son los atractores caóticos, como los que se observan en la dinámica cardiaca. Estos atractores presentan una forma irregular, la cual puede medirse mediante la geometría fractal (**Peitgen**, *et al.*, 1992). Otra de las teoría usadas en el análisis de los sistemas es la teoría de la probabilidad; la probabilidad es una medida de la posibilidad de que un evento ocurra en el futuro en un espacio muestral determinado desde el cual se define una función matemática que cuantifica todas las probabilidades (**Mood**, *et al.*, 1974; **Laplace**, 1995). En este trabajo no se

hizo uso de la probabilidad como medida estadística sino como medida predictiva en el contexto de la entropía, la cual se definió inicialmente en el marco de la teoría cinética de los gases como una función del número de posibles estados para sistemas equiprobables, y posteriormente se generalizó en la mecánica estadística para los sistemas no equiprobables (**Matvéev**, 1987; **Tolman**, 1979), y se ha reinterpretado en diferentes campos como sucede en la teoría de la información (**Machta**, 1999).

Según los reportes de la Organización Mundial de la Salud, enpara el 2011 las enfermedades cardiovasculares ocupaban el primer lugar en cuanto a mortalidad a nivel mundial, con

^{*}Correspondencia:

Javier Rodríguez Velásquez, grupoinsight2025@yahoo.es Recibido: 7 de noviembre de 2015 Aceptado: 3 de mayo de 2016

30 % de las muertes reportadas. Entre todas las enfermedades cardiovasculares, la cardiopatía isquémica representaba 42 % de las causas de muerte. En Colombia el infarto agudo de miocardio se encontraba entre las primeras cinco causas de mortalidad según los reportes del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para el 2009, conpn 28.650 muertes (**Robledo & Escobar**, 2010).

Diversas investigaciones en el campo de la cardiología y la medicina intensiva se han enfocado al estudio de la variabilidad de la frecuencia cardiaca a partir de los cambios en el intervalo RR (Malik, 1996; Chen,, 2008; Chen & Kuo, 2007; Huikuri, et al., 2000; Mäkikallio, et al., 2001; Voss, et al., 2009), sin embargo, su aplicabilidad clínica es limitada, y no ha sido posible establecer medidas predictivas generalizadas a partir de su análisis. El análisis de la variabilidad se basa en la concepción homeostática convencional que equipara la normalidad con un comportamiento cardiovascular regular; no obstante, se ha evidenciado que la dinámica cardiaca exhibe un comportamiento irregular, con características no lineales como las del comportamiento caótico (Wu, et al., 2009; Braun, et al., 1998). En el marco de la teoría de los sistemas dinámicos, Goldberger, et al. (2002) han propuesto una reinterpretación de la concepción de normalidad y enfermedad aplicada a la fisiología cardiaca que contradice la concepción homeostática convencional, en la cual se evidencia que tanto el comportamiento regular y periódico como un comportamiento excesivamente aleatorio se consideran patológicos, en tanto que el estado de normalidad se halla en medio de estos dos comportamientos extremos. Los análisis desarrollados a partir de la teoría de los sistemas dinámicos y de la geometría fractal han resultado ser predictores de la mortalidad más eficaces que los convencionales en pacientes con infarto agudo de miocardio con fracción de eyección menor a 35 % (Huikuri, et al., 2000); del mismo modo, se han desarrollado métodos predictivos de la muerte en pacientes con falla cardiaca (Mäkikallio, et al., 2001) y en pacientes con sepsis (Chen, et al., 2008; Chen & Kuo, 2007; Gómez, et al., 2012).

Desde esta perspectiva, **Rodríguez** (2010a) desarrolló un método de evaluación de la dinámica cardiaca a partir de los registros continuos en monitor Holter en pacientes mayores de 21 años mediante una inducción matemática que permitió diferenciar los estados de normalidad, de enfermedad crónica y aguda, y de la evolución entre estos estados. Dicha metodología se basó en la evaluación de la ocupación de pares ordenados de la frecuencia cardiaca entre los atractores de diez pacientes en un espacio de fases, utilizando la teoría de los sistemas dinámicos, la teoría de la probabilidad y las proporciones de la entropía, lo cual permitió el establecimiento de medidas diagnósticas preventivas cuya aplicabilidad clínica se ha podido confirmar (**Rodríguez, 2011; Rodríguez, 2012a; Rodríguez, et al.,** 2013; **Rodríguez, et al.,** 2014; **Rodríguez, et al.,** 2015). Además, esta metodología se ha aplicado a la predicción de la dinámica cardiaca en la unidad de cuidados coronarios, en donde se logró establecer cuantitativamente que después de la intervención quirúrgica de un paciente que no evidenciaba deterioro clínico, sus proporciones de la entropía mostraban una agudización de la dinámica cardiaca, lo cual se corroboró clínicamente más tarde (**Rodríguez**, *et al.*, 2015). Así mismo, el método se aplicó a la evaluación de casos normales y otros de pacientes de la unidad de cuidados coronarios, y se logró predecir exitosamente tanto la normalidad como la enfermedad aguda y crónica. También fue posible cuantificar el impacto que tenían las intervenciones quirúrgicas o farmacológicas sobre la dinámica cardiaca mediante el cambio en las proporciones geométricas del atractor caótico (**Rodríguez**, 2011).

En este contexto, el propósito del presente trabajo fue confirmar la aplicabilidad clínica de la metodología previamente desarrollada (Rodríguez, 2010a), contrastando el diagnóstico físico-matemático con el diagnóstico clínico convencional de dinámicas cardiacas normales y de las de pacientes con infarto agudo de miocardio atendidos en la unidad de cuidados intensivos.

Materiales y métodos

Definiciones

Espacio de fases: espacio de dos o más dimensiones en el que se representa de manera gráfica la dinámica de un sistema por medio de la representación geométrica de sus variables en un tipo de atractor específico en el cual se ubican pares ordenados de los valores de cada variable consecutiva en el tiempo.

Par ordenado de variables dinámicas: corresponde a la combinación de dos frecuencias cardiacas consecutivas en el espacio de fases representadas como (x,y) y distribuidas en rangos de cinco según sus coordenadas.

Probabilidad de pares ordenados: corresponde al cociente que resulta de dividir el número de pares ordenados que ocupan un rango específico de cinco en entre el número total de pares ordenados de todo el registro Holter (**Rodríguez**, 2010a). Se representa mediante la siguiente ecuación, en la cual X y Y son múltiplos de 5:

$$P(X,Y) = \frac{Frecuencia de aparición de pares ordenados en X, Y}{Total de pares ordenados}$$
(1)

Entropía del atractor: la entropía de la ocupación de un atractor en el espacio de fases se calcula mediante la ecuación de la entropía no equiprobable de Boltzmann-Gibbs:

$$S = -k \sum_{x=1}^{n} \sum_{y=1}^{n} P(X, Y) \times Ln P(X, Y)$$
(2)

donde X, Y son múltiplos de 5; P (X,Y) corresponde a la probabilidad para el rango (X,Y), k representa la constante de Boltzmann, cuyo valor es $1,38 \times 10^{-23}$ (joules/kelvin), y S representa la entropía (**Matvéev**, 1987; **Tolman**, 1979).

Proporción S/k del atractor: se obtiene de la ecuación 2 al dividirla por la constante de Boltzmann:

$$\frac{S}{k} = -\sum_{x=1}^{n} \sum_{y=1}^{n} P(X, Y) \times Ln P(X, Y),$$
(3)

la cual puede rescribirse así:

$$\frac{S}{k} = -\sum_{x=1}^{n} P(a,b) \times Ln P(a,b) - \sum_{x=1}^{n} P(c,d) \times Ln P(c,d)$$

$$-\sum_{x=1}^{n} P(e,f) \times Ln P(e,f) - \sum_{x=1}^{n} P(g,h) \times Ln P(g,h)$$
(4)

donde a, b, c, d, e, f, g, h representan los múltiplos de la frecuencia cardiaca en múltiplos de 5, P (a,b) es igual al valor de la probabilidad para los rangos con frecuencias de ocupación del orden de unidades, P (c,d) es igual al valor de la probabilidad para los rangos con frecuencias de ocupación del orden de decenas, P (e,f) es igual al valor de la probabilidad para los rangos con frecuencias de ocupación del orden de centenas, P (g,h) es igual al valor de la probabilidad para los rangos con frecuencias de ocupación del orden de centenas, P (g,h) es igual al valor de la probabilidad para los rangos con frecuencias de ocupación del orden de miles, *K* representa la constante de Boltzmann, 1,38x10⁻²³ (joules/kelvin), y S es el valor de la entropía (**Matvéev**, 1987; **Tolman**, 1979).

La ecuación anterior, se puede simplificar como sigue:

$$\frac{S}{k} = U + D + C + M, \tag{4}$$

donde U corresponde a la suma de las probabilidades asociadas a frecuencias de ocupación del orden de unidades por su logaritmo natural, D corresponde a estos mismos valores para el orden de decenas, C a los de centenas, y M a los de miles, mientras que k es igual a la constante de Boltzmann, 1,38x10⁻²³ (joules/kelvin), y S es el valor de la entropía.

Proporciones de la entropía: corresponden a las divisiones entre las sumas previamente definidas con respecto a la totalidad (T), que a su vez corresponde a la proporción S/k, o a ellas mismas:

$$U/T;$$
 $D/T;$ $C/T;$ $M/T;$ $C/M;$ $D/C.$

Regiones del atractor: regiones definidas con base en los prototipos de la inducción de la siguiente manera.

La región uno, que abarca todos los rangos de la frecuencia cardiaca comunes a los registros en monitor Holter normales.

La región dos, que incluye todos los rangos ocupados por los registros en monitor Holter normales, excluidos los de la región uno.

La región tres, que comprende los rangos de frecuencia cardiaca de la región total restante del espacio de fases correspondiente a los que no son ocupados por los prototipos normales.

Procedimiento

Se analizaron 90 registros continuos de la frecuencia cardiaca producto de la monitorización con monitor Holter durante 21 horas. Treinta de estos registros correspondían a pacientes con diagnósticos normales y 60 a pacientes con infarto agudo de miocardio cuyos registros provenían de la base de datos del Grupo Insight. La conclusión sobre el diagnóstico basado en el registro en monitor Holter fue emitida por un cardiólogo experto según los parámetros convencionales, y se enmascaró para garantizar un estudio ciego, dejando visibles solamente los valores de las frecuencias cardiacas mínima y máxima cada hora, así como el número de latidos por hora.

A partir de estos valores máximos y mínimos de la frecuencia cardiaca se realizó una simulación computacional de la totalidad del trazado electrocardiográfico con el fin de construir el atractor cardiaco en el espacio de fases según la metodología previamente desarrollada (**Rodríguez**, *et al.*, 2014; **Rodríguez**, 2010a; **Rodríguez**, *et al.*, 2013; **Rodríguez**, 2011; **Rodríguez**, 2012; **Rodríguez**, *et al.*, 2015), graficando la frecuencia de aparición de cada uno de los pares ordenados agrupados en rangos de múltiplos de cinco latidos por minuto. A continuación se evaluó la probabilidad de ocupación para cada uno de los rangos y cada una de las regiones, asumiendo que cada pareja de frecuencias cardiacas constituía un evento (ecuación 1). Se procedió a hallar la entropía de cada atractor (ecuación 2) y la relación S/k (ecuación 3).

Los sumandos que correspondían a las probabilidades de frecuencias de ocupación del orden de unidades (1-9) se agruparon y se sumaron (ecuación 4), al igual que los de decenas (10-99), centenas (100-999) y miles (1.000 a 9.999). Estos valores fueron consecutivamente utilizados para calcular las proporciones existentes entre cada sumando con respecto a la totalidad (relación S/k) y entre las partes (centenas/miles y centenas/decenas), las cuales se calcularon para cada región determinada (ver definiciones).

Más adelante, se evaluó si por lo menos dos de las proporciones en cualquiera de las tres regiones se encontraban por fuera de los límites de la normalidad definidos previamente (Rodríguez, 2010a), asumiendo esta condición como diferenciadora entre normalidad y enfermedad. Para establecer cuantitativamente el nivel de gravedad de cada dinámica con respecto a los límites de normalidad, se restó de los valores de las proporciones mayores que el límite superior de normalidad este último valor, mientras que los valores menores que el límite inferior de normalidad se restaron de este valor límite. Dichas diferencias se agruparon en cuatro conjuntos de acuerdo a si estaban asociadas con frecuencias del orden de los miles, las centenas, las decenas o las unidades, mediante una suma aritmética de cada grupo, lo cual permitió cuantificar qué tan lejos se encontraban estas proporciones de la normalidad, pues entre mayores sean

estos valores, más alejada de la normalidad se considera la dinámica. Los valores de la suma de las restas del orden de los miles son las que tienen mayor peso en la determinación del nivel de gravedad de la dinámica, después se evalúan consecutivamente los valores de las centenas, decenas y unidades. El aumento de las sumas del orden de los miles corresponde a una agudización o deterioro de la condición de un paciente, lo cual puedese manifiestarse clínicamente como un infarto agudo de miocardio, por ejemplo (**Rodríguez,** *et al.*, 2015). En el caso de que las sumas del orden de miles tiendan a disminuir consecutivamente en el tiempo, esto indicaría una evolución a un estado menos agudo.

Análisis estadístico

Para confirmar la aplicabilidad clínica del diagnóstico físicomatemático, se comparó el diagnóstico convencional, el cual se asumió como el estándar, con el resultado arrojado por la metodología matemática, calculando la especificidad y la sensibilidad. Para obtener estos valores, se hizo una clasificación binaria en la que los verdaderos positivos correspondían al número de pacientes con diagnóstico convencional y físico-matemático de la enfermedad; los falsos positivos, al número de casos diagnosticados matemáticamente como patológicos, pero cuyo diagnóstico convencional era normal; los falsos negativos, al número de casos diagnosticados matemáticamente como normales, pero cuyo diagnóstico convencional era patológico, y los verdaderos negativos correspondían a aquellos casos con diagnóstico de normalidad tanto desde el punto de vista matemático como clínico.

Para evaluar la concordancia entre los dos diagnósticos, se calculó el coeficiente kappa mediante la siguiente ecuación:

$$K = \frac{Co - Ca}{To - Ca},\tag{5}$$

donde Co corresponde al número de concordancias observadas, en otras palabras, el número de pacientes con el mismo diagnóstico matemático y estándar; To corresponde a la totalidad de observaciones, es decir, la totalidad de casos normales y patológicos, y Ca corresponde a las concordancias atribuibles al azar, las cuales se calculan de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Ca = [(f_1 \times C_1) / To] + [(f_2 \times C_2) / To], \quad (6)$$

donde f_1 representa el número de pacientes con valores matemáticos de normalidad, C_1 representa el número de pacientes diagnosticados clínicamente como normales, f_2 , el número de pacientes con valores matemáticos indicativos de enfermedad, C2, el número de pacientes diagnosticados clínicamente como patológicos y To, el número total de casos normales y patológicos.

Resultados

Al evaluar los registros del monitor Holter de los pacientes con infarto agudo de miocardio, los valores de la entropía variaron entre 4,6062X10⁻²³ y 5,069X10⁻²³. En los registros

normales, este valor se halló entre 6,478X10⁻²³ y 7,058X10⁻²³ (tabla 1). Se encontró que para los registros de los pacientes con infarto agudo de miocardio, los valores de la relación S/k variaron entre -3,6733 y -3,3378. En el caso de los registros normales, los valores de la relación S/k se encontraron entre -5,115 y -4,694 (tablas 1 y 2). Se evidenció que tanto las medidas de entropía como las relaciones S/k diferenciaron cuantitativamente los grupos.

En de los pacientes con infarto agudo de miocardio, los valores de las proporciones de la entropía U/T se encontraron entre 0 y 0,0020, los de la entropía D/T estuvieron entre 0.0077 y 0.0480, los de C/T, entre 0.0684 y 0.3974, los de M/T variaron entre 0,5753 y 0,8784, los de C/M entre 0,0778 y 0,6908 y los de D/C entre 0,0310 y 0,2337. En los registros normales los valores de la proporción U/T de la entropía se encontraron entre 0 y 0,0084, los de D/T entre 0 y 0,1345, los de C/T entre 0 y 0,5515, los de M/T entre 0 y 0,4592, los de C/M entre 0 y 3,5131 y los de D/C entre 0 y 3,2814. Ninguno de los casos normales presentó valores correspondientes a las sumas de las restas de las proporciones de la entropía por fuera de los límites de normalidad, mientras que en los pacientes con infarto agudo de miocardio se encontraron por lo menos dos valores por fuera de estos límites. Además, las medidas matemáticas de las sumas de las restas de las proporciones por fuera de los límites de normalidad del orden de los miles se encontraron entre 0,4194 y 2,2593, y las del orden de las centenas, entre 0,1348 y 3,3521 (tablas 1 y 2), lo cual evidenció el carácter agudo de las dinámicas indicativas de infarto agudo de miocardio.

Los valores de sensibilidad y especificidad encontrados para esta metodología fueron de 100 %, con un coeficiente kappa de 1, lo cual confirma la capacidad de la metodología para diferenciar clínicamente las dinámicas cardiacas normales de aquellas indicativas de infarto agudo de miocardio.

Asimismo, al desenmascarar los datos se observó que había tres registros de un mismo paciente en tres días consecutivos, en cuyo caso se observó que las sumas del orden de los miles habían permanecido relativamente estables entre el día 1 y el día 2, con valores de 1,2001 y 1,1101, respectivamente (registros 10.1 y 10.2 de la tabla 2). Sin embargo, pasaron de 1,1101 a 2,2593 en el día 3 (registros 10.2 y 10.3 de la tabla 2); de igual forma, las sumas de las centenas pasaron de 0,3217 a 2,7122. Las diferencias en los valores de las sumas de las centenas y de los miles evidenciaron cuantitativamente la evolución progresiva de la dinámica hacia un estado mucho más crítico. Esta evolución hacia la agudización se corroboró con los datos clínicos del paciente y el diagnóstico emitido por el especialista.

Discusión

Este el primer trabajo en el que se establece la capacidad de la metodología diagnóstica basada en la teoría de la probabilidad y la entropía proporcional del atractor cardiaco para diferenciar clínicamente dinámicas normales

Tabla 2. Valores de la entropía, proporción S/k, proporciones de la entropía y sumas de las restas del orden de las unidades (U), decenas (D), centenas (C) y miles (M) correspondientes a 12 registros en monitor Holter de pacientes con diagnóstico convencional de infarto agudo de miocardio, de los cuales tres (10.1, 10.2, 10.3) pertenecían al mismo paciente en diferentes estados de evolución

Número del r	registro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10.1	10.2	10.3
Proporción S/k		-3,4743	-3,6029	-3,6636	-3,6262	-3,3379	-3,6544	-3,4981	-3,4154	-3,6733	-3,3691	-3,4919	-3,3795
Entropía		4,80E-23	5,00E-23	5,10E-23	5,00E-23	4,60E-23	5,00E-23	4,80E-23	4,70E-23	5,10E-23	4,60E-23	4,80E-23	4,70E-23
Área 1	U/T	0	0,0002	0,0002	0	0	0	0,002	0,0014	0	0,0002	0	0,0006
	D/T	0,0255	0,0122	0,0355	0,0422	0,0136	0,0123	0,048	0,0315	0,0303	0,0157	0,0339	0,0077
	C/T	0,1868	0,134	0,2035	0,215	0,2235	0,3974	0,2052	0,2076	0,2468	0,1455	0,1699	0,0684
	M/T	0,7877	0,8528	0,7499	0,7321	0,7629	0,5753	0,7242	0,7559	0,7211	0,8386	0,7901	0,8784
	C/M	0,2372	0,1571	0,2713	0,2936	0,293	0,6908	0,2834	0,2746	0,3422	0,1735	0,215	0,0778
	D/C	0,1363	0,091	0,1746	0,1965	0,0607	0,031	0,2337	0,1516	0,1228	0,1078	0,1995	0,1128
	U/T	0	0	0	0	0	0	0,0016	0,0005	0	0	0	0,0006
	D/T	0	0,0008	0,0087	0,0089	0	0,015	0,0128	0,0032	0,0018	0	0,005	0,002
Ároa 2	C/T	0	0	0	0	0	0	0,002	0	0	0	0	0,0113
Alea 2	M/T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	C/M												
	D/C							6,3329					0,1775
	U/T	0	0	0	0	0	0	0,0007	0	0	0	0	0
	D/T	0	0	0,0021	0,0018	0	0	0,0035	0	0	0	0,0011	0
Área 3	C/T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0148
	M/T	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0163
	C/M												0,9075
	D/C												0
	U	0	0	0	0	0	0	0,0024	0,0012	0	0	0	0,0004
Sumas	D	0,015	0,0275	0,0055	0,0018	0,0269	0,0266	0,0035	0,0075	0,0086	0,0248	0,0061	0,0312
	С	0,2956	0,3485	0,279	0,2736	0,279	0,1348	3,3521	0,2749	0,2357	0,337	0,3217	2,7122
	М	1,0854	1,2306	1,0135	0,9733	1,0048	0,4194	0,9757	1,0162	0,9138	1,2001	1,1101	2,2593

de aquellas indicativas de infarto agudo de miocardio en pacientes atendidos en la unidad de cuidados intensivos y en el contexto de un estudio ciego de concordancia diagnóstica. Los resultados de este estudio indican que la dinámica cardíaca de todos los pacientes con infarto agudo de miocardio presentó valores matemáticos característicos de la enfermedad aguda, que permitieron su diferenciación de los estados de normalidad. Al comparar los diagnósticos clínicos con los resultados encontrados mediante un análisis estadístico, se obtuvieron los máximos valores de sensibilidad y especificidad, y de coeficiente kappa, lo cual confirma la aplicabilidad clínica de esta metodología.

Así mismo, la metodología previamente desarrollada permitió cuantificar el grado de gravedad del compromiso cardiaco a partir de la distancia de las proporciones de la entropía con respecto a los límites de normalidad y la agudización de una dinámica particular de un día a otro. El registro de la evolución estudiado en los registros 10.1, 10.2 y 10.3, provenientes del mismo paciente en tres días consecutivos, mostró diferencias significativas en la transición de un paciente con infarto agudo de miocardio hacia un estado más agudo, evidenciando la capacidad de la metodología para cuantificar procesos que evolucionan hacia la agudización o "estabilización". De este modo se demostró que la metodología diagnóstica puede facilitar la evaluación oportuna de intervenciones farmacológicas y quirúrgicas, por lo cual constituye una herramienta de apoyo en las decisiones terapéuticas en la unidad de cuidados intensivos y en otros contextos, y confirma los hallazgos previos (**Rodríguez, et al.,** 2014; **Rodríguez, et al.,** 2013; **Rodríguez,** 2011; **Rodríguez,** 2012, **Rodríguez, et al.,** 2015).

En otros estudios las metodologías desarrolladas para la evaluación de la dinámica cardiaca se han enfocado en el análisis de la variabilidad mediante la medición de la

Tabla 1. Valores de la entropía, proporción S/k, proporciones de la entropía y sumas de las restas del orden de las unidades (U), decenas (D), centenas (C) y miles (M) correspondientes a cinco registros en monitor Holter de pacientes con diagnóstico convencional dentro de los límites normales

Número de registro		1	2	3	4	5
Entropía		6,55E-23	6,49E-23	7,06E-23	6,48E-23	6,51E-23
Proporción S/k		-4,7476	-4,7001	-5,1146	-4,6944	-4,7169
	U/T:	0,0001	0,0002	0,0001	0,0002	0
	D/T:	0,0881	0,0398	0,0888	0,0392	0,0887
Áron 1	C/T:	0,483	0,4837	0,5515	0,4834	0,4833
Alea I	M/T:	0,3156	0,4567	0,157	0,4592	0,3136
	C/M:	1,5303	1,059	3,5131	1,0527	1,5409
	D/C:	0,1825	0,0822	0,161	0,0811	0,1835
	U/T:	0,0084	0,007	0,0073	0,0079	0,0084
	D/T:	0,0792	0,0127	0,1345	0,0101	0,0802
Áros 2	C/T:	0,0256	0	0,041	0	0,0258
Alea 2	M/T:	0	0	0,0198	0	0
	C/M:					
	D/C:			3,2814		3,1129
	U/T:	0	0	0	0	0
	D/T:	0	0	0	0	0
Áros 2	C/T:	0	0	0		0
Alea 5	M/T:	0	0	0		0
	C/M:					
	D/C:					
	U:	0	0	0	0	0
Sumag	D:	0	0	0	0	0
Sumas	C:	0	0	0	0	0
	M:	0	0	0	0	0

magnitud global de la fluctuación RR alrededor de su valor medio, o de la magnitud de las fluctuaciones de algunas frecuencias predeterminadas. Por el otro lado, debido al comportamiento impredecible de la dinámica cardiaca, se han desarrollado múltiples métodos de evaluación a partir de la teoría del caos y la teoría de los sistemas no lineales (Schumacher, 2004; Babloyantz & Destexhe, 1988), entre los cuales se encuentran los de la medición de la entropía aproximada (Pincus, 1991; Richman & Moorman, 2000), el análisis multifractal (Ivanov, et al., 1999), y la entropía muestralsample (Richman & Moorman, 2000), entre otros. Sin embargo, sus alcances se limitan a enfermedades específicas y requieren de validaciones adicionales para su aplicabilidad clínica (Voss, et al., 2009; Richman & Moorman, 2000). Los valores obtenidos al comparar el diagnóstico convencional con esta metodología físicomatemática mediante el análisis estadístico fueron de 100 % para la sensibilidad y la especificidad, lo cual pone de manifiesto su utilidad como herramienta de ayuda diagnóstica en la clínica.

En el campo de la teoría de los sistemas dinámicos aplicada a la dinámica cardiaca, se desarrolló una ley exponencial para predecir la evolución hacia la agudización del comportamiento cardiaco (**Rodríguez**, 2011a), cuya aplicabilidad fue confirmada posteriormente en el marco de un estudio ciego con 115 registros en monitor Holter normales e indicativos de enfermedad, con valores de sensibilidad y especificidad de 100 % y un coeficiente kappa de uno (**Rodríguez**, *et al.*, 2013a), lo cualque también la convierte en una herramienta de prevención aplicable a la clínica. Recientemente se realizó un estudio con la misma metodología aplicada a pacientes con arritmias cardiacas, el cual reveló su aplicabilidad general al evaluar y detectar ligeros cambios de la dinámica que no se habían determinado clínicamente como patológicos (**Rodríguez**, *et al.*, 2013b).

Uno de los inconvenientes que tienen las metodologías de diagnóstico actuales es que al estar basadas en consideraciones estadísticas, sus afirmaciones se aplican a grupos poblacionales, pero no pueden hacer predicciones en cuanto a los individuos. En cambio la metodología aplicada en este trabajo está sustentada en las formas de razonamiento no causal de la física moderna. Así, del mismo modo que en la mecánica cuántica (**Feynman**, 1964a), la mecánica estadística (**Feynman**, *et al.*, 1964b; **Tolman**, 1979), o la teoría del caos (**Geisel**, 1982), es posible llegar a afirmaciones objetivas y reproducibles para cada caso particular, independientemente del análisis de carácter epidemiológico.

Se han desarrollado mecanismos de predicción en otros campos a partir de aproximaciones similares de la física y la matemática, por ejemplo, en la diferenciación de las células escamosas de cuello uterino normales y enfermas (Rodríguez, et al., 2010b), así como de eritrocitos normales y anormales (Correa, et al., 2012). También se desarrolló una generalización que halló todos los prototipos posibles de arteriales normales y con reestenosis posibles (Rodríguez, et al., 2010c), y en el campo de la salud pública, un método predictivo con una efectividad de 99,86 % (Rodríguez, 2010d). Recientemente, se hizo una predicción con aplicabilidad clínica relativa a los linfocitos T CD4 a partir de la información del cuadro hemático en pacientes con VIH (Rodríguez, et al., 2012b; Rodríguez, et al., 2013c), y se han diseñado teorías para la predicción de la unión de péptidos al complejo mayor de histocompatibilidad de clase II (Rodríguez, 2008).

Conclusiones

Las proporciones de la entropía lograron diferenciar dinámicas cardiacas indicativas de infarto agudo de miocardio de aquellas normales. También se cuantificó qué tan alejada se encontraba la dinámica cardiaca de estos pacientes de la normalidad a partir de la cuantificación de su nivel de gravedad. El efecto de los agentes vasopresores e inotrópicos sobre la dinámica cardiaca requiere de un estudio más detallado que no se abordó en esta ocasión, de manera que se requieren nuevas investigaciones para hallar posibles asociaciones clínicas que permitan hacer predicciones de los resultados posteriores a las intervenciones médicas.

Agradecimientos

A los doctores Fernando Cantor, Vicerrector de Investigaciones, Martha Bahamón, Vicerrectora Académica, Jorge Enrique Luque, Decano de la Facultad de Medicina, Luis Antonio Castro, Director del Centro de Investigaciones, y al ingeniero Mario Alejandro Castro, Jefe de la División de Investigación Científica de la Universidad Militar Nueva Granada, así como al Centro de Investigaciones de la Clínica del Country, por su apoyo a nuestras investigaciones, específicamente a los doctores Tito Tulio Roa, Director de Educación Médica, Jorge Ospina, Director Médico, Alfonso Correa, Director del Centro de Investigaciones, y a las Doctoras Adriana Lizbeth Ortiz, epidemióloga, y Silvia Ortiz, Enfermera Jefe, de dicho Centro de Investigaciones.

Financiación

Producto derivado del proyecto MED-1345 financiado por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada - Vigencia 2014.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Babloyantz, A. & Destexhe, A.(1988). Is the normal heart a periodic oscillator? Biol. Cybern. 58: 203-211.
- Braun, C., Kowallik, P., Freking, A., Hadeler, D., Kniffki, K., Meesmann, M. (1998). Demonstration of nonlinear components in heart rate variability of healthy persons. Am. J. Physiol. 275: H1577-H1584.
- Chen, W.L., Chen, J.H., Huang, C.C., Kuo, C.D., Huang, C.I., Lee, L.S. (2008). Heart rate variability measures as predictors of in-hospital mortality in ED patients with sepsis. Am J Emerg Med. **26** (4): 395-401.
- Chen, W.L. & Kuo, C.D. (2007). Characteristics of Heart Rate Variability Can Predict Impending Septic Shock in Emergency Department Patients with Sepsis. Acad EmergMed. 14 (5): 392-397.
- Correa, C., Rodríguez, J., Prieto, S., Álvarez, L., Ospino, B., Munévar, A., Bernal P., Mora, J., Vitery, S. (2012). Geometric diagnosis of erythrocyte. J. Med. Med. Sci. 3 (11): 715-720.
- **Devaney, R.** (1992). A first course in chaotic dynamical systems theory and experiments. Reading Addison-Wesley Reading: Massachusetts, p. 9-15.
- Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M. (1964a). Comportamiento cuántico. En: Feynman RP, Leighton RB, Sands M (ed). *Física*. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana, S. A. p. 37-1- 37-16.
- Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M. (1964b). Leyes de la Termodinámica. Feynman RP, Leighton RB, Sands M (ed). Física. Wilmington: Addison-Wesley Iberoamericana S. A. p. 44-1-44-19.
- Geisel, T. (1982). Chaos, randomness and dimension. Nature. 298 (22): 322-323.
- Goldberger, A., Amaral, L., Hausdorff, JM., Ivanov, P., Peng, Ch., Stanley, HE. (2002). Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. PNAS. **99:** 2466- 2472.
- Gómez, M., Enciso, O., Peña, T., Segura, D., Nieto E. (2012). Estudio ECAIS: eventos cardiovasculares adversos inadvertidos en sepsis. Med Intensiva. 36 (5): 343-350.
- Huikuri, HV., Mäkikallio, T., Peng, C.K., Goldberger, A., Hintze, U., Møller, M. (2000). Fractal correlation properties of R-R interval dynamics and mortality in patients with depressed left ventricular function after an acute myocardial infarction. Circulation. 101: 47-53.
- Ivanov, P., Amaral, L., Goldberger, AL., Havlin, S., Rosenblum, M., Struzik, Z. (1999). Multifractality in human heartbeat dynamics. Nature. 399: 461-465.

- Laplace, P. (1995). Ensayo filosófico sobre las probabilidades. Barcelona: Altaya, p. 8-10, 12.
- Machta, J. (1999). Entropy, information, and computation. Am. J. Phys. 67: 1074-7.
- Mäkikallio, T.H., Huikuri, H.V., Hintze, U., Videbaek, J., Mitrani, R.D., Castellanos, A., Myerburg, R.J., Møller, M. (2001). Fractal analysis and time and frequency-domain measures of heart rate variability as predictors of mortality in patients with heart failure. Am. J. Cardiol. 87 (2):178-182.
- Malik, M. (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Circulation. 93: 1043-1065.
- Matvéev, A. (1987). Física molecular. Moscú: MIR, p.174-177.
- Mood, A., Graybill, F., Boes, D. (1974). Introduction to the theory of statistics. Singapore: Mc. Graw-Hill. p. 9-31
- Organización Mundial de la Salud. Enfermedades Cardiovasculares 2011. Disponible en: http://www.who.int/mediacentre/ factsheets/fs317/es/index.html.
- Peitgen, H., Jurgens, H., Saupe, D. (1992). Strange attractors, the locus of chaos. Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. New York: Springer-Verlag. p. 655-768.
- Pincus, S. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity. Proc. Natl Acad. Sci. USA. 88: 2297-2301.
- Richman, J., Moorman, J. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol. 278: H2039-H2049.
- Robledo, R., Escobar, FA. (2010). Las enfermedades crónicas no transmisibles en Colombia. Boletín del Observatorio de Salud del Instituto Nacional de Salud. **3** (4): 1-9.
- Rodríguez, J. (2008). Teoría de unión al HLA clase II teorías de probabilidad combinatoria y entropía aplicadas a secuencias peptídicas. Inmunología. 27 (4): 151-66.
- Rodríguez, J. (2010a). Entropía proporcional de los sistemas dinámicos cardiacos: predicciones físicas y matemáticas de la dinámica cardiaca de aplicación clínica. Rev Colomb Cardiol. 17: 115-129.
- Rodríguez, J., Prieto, S., Correa, C., Posso, H., Bernal, P., Puerta, G., Vitery S., Rojas, I. (2010b). Generalización fractal de células preneoplásicas y cancerígenas del epitelio escamoso cervical: una nueva metodología de aplicación clínica. Rev Fac Med. 18 (2): 33-41.
- Rodríguez, J., Prieto, S., Correa, C., Bernal, P., Puerta, G., Vitery, S., Soracipa, Y., Muñoz, D. (2010c). Theoretical generalization of normal and sick coronary arteries with fractal dimensions and the arterial intrinsic mathematical harmony. BMC Medical Physics. **10** (1):1-3
- Rodríguez, J. (2010d). Método para la predicción de la dinámica temporal de la malaria en los municipios de Colombia. Rev Panam Salud Pública. 27: 211-8.
- Rodríguez, J. (2011). 7th International Meeting of Intensive Cardiac Care, Israel Heart Society, European Society of Cardiology, EBAC. Tel Aviv (Israel).

- Rodríguez, J. (2011a). Mathematical law of chaotic cardiac dynamics: Predictions for clinical application. J Med Med Sci. 2 (8): 1050-1059.
- **Rodríguez, J.** (2012a). Proportional Entropy applied to the Clinic Prediction of Cardiac Dynamics. Innovations in Cardiovascular Interventions, ICI meeting, Tel-Aviv (Israel).
- Rodríguez, J., Prieto, S., Bernal, P., Pérez, C., Correa, C., Álvarez, L., Bravo, J., Perdomo, N., Faccini, A. (2012b).
 Predicción de la concentración de linfocitos T CD4 en sangre periférica con base en la teoría de la probabilidad.
 Aplicación clínica en poblaciones de leucocitos, linfocitos y CD4 de pacientes con VIH. Infectio. 16 (1): 15-22.
- Rodríguez, J., Prieto, S., Domínguez, D., Melo, M., Mendoza, F., Correa, C., Soracipa, Y., Pinilla, L., Pardo, J., Ramírez, N. (2013). Mathematical-physical prediction of cardiac dynamics using the proportional entropy of dynamic systems. J Med Med Sci. 4 (8): 370-381.
- Rodríguez, J., Correa, C., Melo, M., Domínguez, D., Prieto, S., Cardona, DM., Soracipa, Y., Mora, J. (2013a). Chaotic cardiac law: Developing predictions of clinical application. J Med Med Sci. 4 (2): 79-84.
- Rodríguez, J., Narváez, R., Prieto, S., Correa, C., Bernal, P., Aguirre, G., Soracipa, Y., Mora, J. (2013b). The mathematical law of chaotic dynamics applied to cardiac arrhythmias. J Med Med Sci. 4 (7): 291-300.
- Rodríguez, J., Prieto, S., Correa, C., Pérez, C., Mora, J., Bravo, J., Soracipa, Y., Álvarez, L. (2013c). Predictions of CD4 lymphocytes' count in HIV patients from complete blood count. BMC Medical Physics. 13 (3): 1-3.
- Rodríguez, J., Prieto, S., Correa, C., Soracipa, Y., Aguirre, G., Méndez, L. (2014). Proportional entropy applied to the clinical diagnostic of cardiac dynamic: bBlind study with 600 holter. International Conference of the Israel Heart Society in association with The Israel Society of Cardiothoracic Surgery. April 30-May 1; Tel Aviv (Israel).
- Rodríguez, J., Prieto, S., Bernal, P., Izasa, D., Salazar, G., Correa, C., Soracipa, Y. (2015). Entropía proporcional aplicada a la evolución de la dinámica cardiaca. Predicciones de aplicación clínica. La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina. Tomo I. Argentina: Comunidad del pensamiento complejo. p. 247-264.
- Schumacher, A. (2004). Linear and nonlinear approaches to the analysis of R–R interval variability. Biol Res Nurs. 5: 211-221.
- Tolman, R. (1979). Principles of statistical mechanics. New York: Dover Publications, p.565-571.
- Voss, A., Schulz, S., Schroeder, R., Baumert, M., Caminal P. (2009). Methods derived from nonlinear dynamics for analysing heart rate variability. Phil. Trans. R. Soc. A. 367 (1887): 277-296.
- Wu, G.Q., Arzeno, N.M., Shen, L.L., Tang, D.K., Zheng, D.A., Zhao, N.Q., Eckberg, D.L., Poon, C.S. (2009). Chaotic Signatures of Heart Rate Variability and Its Power Spectrum in Health, Aging and Heart Failure. PLoSOne. 4 (2): 4323.

Artículo de posesión

Ciencias biomédicas

Los diversos efectos de las helmintiasis sobre la inflamación alérgica

Luis Caraballo

Instituto de Investigaciones Inmunológicas, Universidad de Cartagena, Cartagena de Indias, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro de número a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 26 de abril de 2016

Resumen

Las helmintiasis y las alergias son muy frecuentes en países del trópico, donde establecen múltiples interacciones. Los mecanismos de defensa contra estos parásitos son bastante parecidos a la respuesta inmunológica de tipo alérgico, principalmente porque ambos procesos tienen una importante participación de los anticuerpos tipo inmunoglobulina E (IgE). Pero también hay diferencias importantes, siendo una de ellas el grado de inmunomodulación, el cual es débil en la respuesta alérgica y fuerte en la antihelmíntica. Este tema tiene repercusiones en medicina porque algunas helmintiasis como la ascariasis (producida por *Ascaris lumbricoides*), son capaces de modificar el curso de las enfermedades alérgicas, en ocasiones disminuyendo su intensidad, por lo cual se ha propuesto que una de las razones del incremento de las alergias en el mundo es la disminución progresiva de las infecciones por helmintos. En esta revisión analizaremos varios de los efectos de las helmintiasis sobre la respuesta inmunológica alérgica y especularemos sobre su influencia en las tendencias internacionales de incremento de los problemas inflamatorios de origen inmunológico. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: Helmintiasis, inmunomodulación, IgE, alergia, epidemiología, respuesta alérgica.

The various effects of helminthiases on allergic inflammation

Abstract

Helminth infections and allergies are very common in tropical countries, where they are linked by multiple interactions. Defense mechanisms against helminths are quite similar to the allergic immune response, mainly because both processes have a significant participation of antibodies such as immunoglobulin E (IgE). But there are also important differences, one being the degree of immunomodulation, which is weak in the allergic response and strong in anthelmintic immunity. This issue has implications in medicine because some helminth infections such as ascariasis (caused by *Ascaris lumbricoides*), are able to modify the course of allergic diseases, sometimes reducing their intensity and sometimes intensifying allergic symptoms. In this review we discuss some of the influence of helminthiases on the allergic immune response and speculate about its impact on the current international prevalence trends of inflammatory disorders. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Helminthiases, immunomodulation, IgE, allergy, epidemiology, allergic response.

Introducción

Tanto las helmintiasis (infestaciones por parásitos helmintos) como las alergias (procesos inflamatorios de origen inmunológico) son muy comunes en las regiones tropicales, donde establecen múltiples interacciones. Al descubrirse los mecanismos de defensa contra estos parásitos se evidenció su parecido con la respuesta inmunológica de tipo alérgico, principalmente porque ambos procesos tienen una importante participación de los anticuerpos tipo inmunoglobulina E (IgE). Pero las semejanzas son más amplias e involucran otros componentes de la respuesta inmunológica; además, también hay diferencias importantes entre los dos procesos, siendo uno de ellos el grado de inmunomodulación, el cual es débil en la respuesta alérgica y fuerte en la antihelmíntica (**Caraballo**, 2013).

El tema es científicamente interesante por sus interrogantes sobre mecanismos básicos de las interacciones hospedero/

parásito, desde las más primitivas hasta las que hoy persisten después de una larga co-evolución. Además tiene repercusiones en medicina porque algunas helmintiasis como la ascariasis (producida por *Ascaris lumbricoides*), son capaces de modificar el curso de las enfermedades alérgicas, en ocasiones disminuyendo su intensidad, lo cual ha servido de sustento teórico para proponer que una de las razones del incremento de las alergias en el mundo es la disminución progresiva de las infecciones por helmintos. En esta revisión analizaremos varios de los efectos de las helmintiasis sobre la respuesta inmunológica alérgica y especularemos sobre su influencia en las tendencias internacionales de incremento de los problemas inflamatorios de origen inmunológico (**Haahtela**, *et al.*, 2013).

Correspondencia:

Luis Caraballo, lcaraballog@unicartagena.edu.co Recibido: 25 de marzo de 2016 Aceptado: 31 de mayo de 2016

Las interacciones entre helmintiasis y alergias

Las helminthiasis más comunes son causadas por nematodos del suelo (Ascaris lumbricoides, Trichuris trichiura, Ancylostoma duodenalis, Necator americanus, Strongyloides stercoralis), filarias (Wuchereria bancrofti, Brugia malayi, Onchocerca volvulus) y trematodos (Schistosoma haematobium, Schistosoma mansoni, Schistosoma japonicum). La respuesta inmunológica durante esas infecciones varía dependiendo del tipo de parásito, su ciclo de vida, la edad del hospedero, la carga parasitaria y el poli parasitismo. Cerca de un billón de personas padecen ascariasis (Pullan, et al., 2014), un problema desatendido ("neglected") que se presenta principalmente en países pobres del trópico y cuyos graves efectos sobre la nutrición y el desarrollo de los niños son bien conocidos. La frecuencia y severidad de la ascariasis se ha reducido en los últimos 60 años, especialmente en países industrializados (Elliott and Weinstock, 2012, Feillet and Bach, 2004) y actualmente las formas más severas se concentran en algunas áreas rurales. En las zonas urbanas las condiciones higiénicas son mejores y se dan campañas regulares de desparasitación, lo que hace que la frecuencia y la intensidad sean menores. En Colombia, aunque no hay estudios destinados a comparar las frecuencias en estos dos ambientes, se observa que las helmintiasis son más comunes en zonas rurales (Agudelo-Lopez, et al., 2008, Carmona Fonseca Jaime 2009) que en las ciudades (Acevedo, et al., 2012, Londono, et al., 2009).

Por otro lado, una de cada tres personas sufre de alergias y la frecuencia de asma, rinitis y eczema atópico ha aumentado en los últimos años en la mayoría de los países donde se ha investigado (Dennis, et al., 2012, Mallol, et al., 2013, Pearce, et al., 2007). Estas enfermedades son muy frecuentes en las zonas urbanas, incluyendo aquellas de los países subdesarrollados (Endara, et al., 2015, Platts-Mills and Cooper, 2010, Rodriguez, et al., 2011), y merecen ser consideradas problemas de salud pública. Lo anterior significa que en una buena parte del planeta (la zona tórrida o tropical), donde habitan más de la mitad de los humanos, coexisten las parasitosis intestinales y las alergias, las primeras en una tendencia a disminuir y las segundas cada vez más frecuentes; reproduciendo en tiempo real lo que se supone ha sucedido en los países industrializados en las últimas 6 décadas (Figura 1). Los mecanismos por los cuales la urbanización se asocia con mayor prevalencia de alergias se desconocen, pero un factor podría ser la disminución de la carga parasitaria. Las alergias son enfermedades que resultan de la acción de múltiples factores ambientales sobre individuos genéticamente susceptibles. Las helmintiasis son apenas parte de esa influencia ambiental, la cual ocurre principalmente en el trópico. Por eso este escenario puede considerarse un experimento de la naturaleza cuyo análisis podría arrojar importante información sobre la patogénesis de problemas alérgicos (como el asma) y de las infecciones por helmintos (como la ascariasis).

Varias investigaciones en animales y humanos muestran que tanto la respuesta alérgica como la protectora contra helmintos tienen un fuerte componente Th2, con gran producción de IgE y citoquinas como IL-4, IL-5 e IL-13, la participación de células linfoides innatas (ILC), eosinófilos y células cebadas; además hiperplasia de células caliciformes con abundante producción de moco. Recientemente se ha descrito un importante papel de las células Tuft de la mucosa intestinal en la iniciación de la respuesta inmunitaria tipo 2 contra helmintos (**Gerbe**, *et al.*, 2016), aunque su participación en la respuesta alérgica está por definirse.

Durante la infección, los helmintos secretan inmunomoduladores capaces de disminuir la respuesta protectora del hospedero induciendo linfocitos T y B reguladores (Tregs y Bregs) que incrementan la producción de IL-10 y TGF β ; además promueven la síntesis de IgG/IgG4 y alteran diversas vías de señalización intracelular que cambian el fenotipo de las células dendríticas a DC2 (las cuales promueven una respuesta Th2) y el de los macrófagos a M2, activados alternativamente y con menos capacidad proinflamatoria. Como resultado, la infección helmíntica se asocia a un importante grado de inmunosupresión que limita la capacidad del hospedero para adquirir inmunidad estéril.

Se supone que esto es producto de un largo camino de adaptación, en gran medida de los helmintos, durante el proceso evolutivo, lo cual ha permitido una relación parasitaria. De hecho, hay evidencias que sugieren este



Figura 1. Representación hipotética del efecto del control de las helmintiasis sobre la prevalencia de las enfermedades alérgicas. La inmunosupresión (IS) alcanza su máximo cuando las helmintiasis son muy frecuentes y la carga de la infección es muy alta y la enfermedad severa; en este escenario, la prevalencia de síntomas alérgicos es baja. La inmunoestimulación (IE) prevalece cuando la frecuencia de las helmintiasis es más baja, lo que permite infecciones intermitentes y leves que aumentan los síntomas alérgicos. La hipótesis presupone que los cambios funcionan sobre una población genéticamente predispuesta a la alergia.

tipo de adaptación a nivel molecular, por ejemplo, las cistatinas secretadas por filarias capaces de parasitar a los humanos tienen mayor efecto inmunosupresor que la cistatina del nematodo de vida libre Caenorhabditis elegans (**Schierack**, *et al.*, 2003). Cuando ocurren infecciones severas por helmintos, lógicamente todos aquellos procesos inflamatorios derivados de una hiper respuesta inmunológica, como las enfermedades autoinmunes y las alergias, tienden a disminuir. Es importante mencionar que hasta el momento solo hay evidencias de esta influencia a nivel de los síntomas y no de la incepción de las enfermedades; esto último es un aspecto a considerar dado que en los sitios endémicos las parasitosis ocurren a edades tempranas y durante el embarazo (**Cooper**, *et al.*, 2016, **Maizels**, *et al.*, 2014, **Smits and Akdis**, 2014, **Straubinger**, *et al.*, 2014).

Las interacciones helmintiasis/alergias son mutuas ya que hay evidencia de un efecto protector de las alergias contra la ascariasis (Lynch, et al., 1998); sin embargo, aquí no trataremos ese aspecto. Los efectos más visibles de la ascariasis sobre el asma se han identificado mediante estudios epidemiológicos con resultados aparentemente contradictorios porque en unos aparece como factor de riesgo, aumentando la frecuencia y la severidad del asma, mientras que en otros tiene efecto protector, disminuyendo la intensidad de los síntomas. Además, la ascariasis influye en el diagnóstico de las alergias porque reduce la especificidad de las pruebas que evalúan la IgE específica debido a la reactividad cruzada entre antígenos de Ascaris y ácaros. Finalmente, el impacto inmunomodulador de la ascariasis podría aprovecharse como terapia antiinflamatoria empleando moléculas inmunomoduladoras derivadas del parásito. A continuación revisaremos con más detalle estos temas.

La ascariasis aumenta la intensidad de la respuesta alérgica mediada por IgE

Esta sección tratará dos aspectos generales, a saber: los síntomas de alergia inducidos por la infección parasitaria y el aumento de dichos síntomas en las personas alérgicas infectadas por helmintos. Aunque posiblemente estén estrechamente relacionados, los analizaremos por separado con el fin de describir mejor las particularidades.

Históricamente, los primeros efectos relacionados con alergias observados en ascariasis fueron los síntomas de dificultad respiratoria o urticaria en niños infectados (**Joubert**, *et al.*, 1979, **Spillmann**, 1975); sin embargo, estas y otras manifestaciones clínicas suceden también en helmintiasis como la strongyloidiasis, la hidatidosis (asociada a anafilaxis), la anisakiasis e inclusive infecciones por protozoarios, las cuales por sí mismas pueden inducir síntomas de alergia (**Caraballo and Acevedo**, 2011, **Kolkhir**, *et al.*, 2016). Es importante tener en cuenta que esto ocurre en una minoría de la población infectada, lo cual podría tener, por lo menos, una explicación: La población que presenta síntomas alérgicos está genéticamente predispuesta a reaccionar de manera exagerada a la infección parasitaria, ya sea contra componentes propios del parásito o contra diversos componentes (población atópica); en ambos casos el grado de inmunosupresión concomitante no es suficiente para suprimir las manifestaciones de alergia, especialmente si la infección es leve.

Entonces, ¿por qué a nivel poblacional la gran mayoría de los parasitados por helmintos no presentan síntomas de alergia, siendo que las helmintiasis son fuertes potenciadores de la respuesta inmunológica Th2 y especialmente la síntesis de IgE? Una razón podría ser que la mayoría de la población es susceptible a los efectos inmunosupresores de los helmintos; estos últimos habrían evolucionado de tal forma que fueron seleccionados como parásitos aquellos capaces de generar inmunosupresión en los hospederos. Esta parte la trataremos más adelante, por ahora conviene concluir que las infecciones helmínticas por sí mismas son capaces de inducir síntomas de alergia, en un amplio rango que va, en creciente severidad, desde la ascariasis y strongyloidiasis hasta la hidatidosis y la anisakiasis. Por lo tanto, no sorprende que sean capaces de incrementar los síntomas en personas previamente alérgicas.

El efecto potenciador que ejerce la ascariasis sobre las alergias se puede detectar a nivel poblacional pues se ha observado repetidamente que la sensibilización contra alergenos de Ascaris se asocia con mayor prevalencia de asma (Ahumada, et al., 2015, Buendía, 2015, Hawlader, et al., 2014, Lynch, et al., 1997, Takeuchi, et al., 2015, Takeuchi, et al., 2008) incluso con mayor severidad (Buendía, 2015, Hunninghake, et al., 2007). Esto sucede tanto en zonas urbanas como rurales que tal vez comparten la condición de presentar infecciones leves (Endara, et al., 2015). También se manifiesta a nivel celular y molecular, induciendo una movilización de los componentes de la respuesta inmunológica Th2, especialmente de IgE específica contra antígenos del parásito y de reactividad cruzada. Una de las explicaciones más obvias de porqué la ascariasis incrementa los síntomas en las personas alérgicas es la gran reactividad cruzada entre los antígenos de Ascaris y los de los ácaros del polvo de habitación (Acevedo and Caraballo, 2011). Además, la infección por áscaris parece estimular la síntesis de IgE contra alergenos específicos de ácaros (Buendía, 2015, Zakzuk, 2014). Dado que estos últimos son los principales agentes causales de asma (especialmente en el Trópico) cualquier factor que incremente la respuesta alérgica contra sus componentes se convierte en un factor de riesgo para la enfermedad, especialmente si la población está expuesta de manera permanente a ambas fuentes.

Por lo menos 7 proteínas de Ascaris tienen reactividad cruzada con homólogas de los ácaros (**Acevedo**, *et al.*, 2009b). De ellas, solo dos se han estudiado con detalle, la tropomiosina y la glutatión-transferasa/GST (**Acevedo**, *et al.*, 2011, **Acevedo**, *et al.*, 2013). También hay antígenos especie específicos; del lado del Ascaris la poli proteína ABA-1 (también conocida como Asc s 1), considerada un marcador

de resistencia a la infección (McSharry, et al., 1999); y por parte de los ácaros los alergenos Blo t 5, Blo t 12 y Blo t 21 (Carvalho Kdos, et al., 2013, Zakzuk, et al., 2009). En la medida en que se ha avanzado en la caracterización de estas moléculas, se han planteado posibles mecanismos del porqué la sensibilización IgE contra Ascaris aumenta los síntomas de alergia. La tropomiosina, un pan alergeno, es la responsable de la mayor parte de la reactividad cruzada, y parece ser que la respuesta IgE contra ella genera el incremento de los síntomas en los alérgicos infectados (Ahumada, et al., 2015). Pero además, la ascariasis también aumenta los marcadores de severidad del asma, lo que indica que en las regiones tropicales (en contraste con las regiones temperadas) la sensibilización IgE a tropomiosina no es un mero hallazgo circunstancial sin efectos clínicos sino todo lo contrario, está asociado a la sintomatología y por lo tanto debe incluirse como prueba diagnóstica en las enfermedades alérgicas como el asma.

La influencia de la ascariasis sobre la prevalencia de asma podría tener importancia en las políticas de salud pública. Es bien conocido que las enfermedades parasitarias intestinales se pueden controlar con buenas condiciones de higiene y un adecuado desarrollo socio económico, lo cual no se ha logrado en muchos países muy a pesar de que son causantes de un alto grado de morbilidad en la población infantil. Sus efectos sobre el sistema inmunológico cada vez se documentan mejor, descubriendo una carga adicional que conllevan estas enfermedades desatendidas. Profundizar en el estudio de las interacciones helmintiasis/alergias es útil no solo para los países que actualmente sufren desnutrición y enfermedades parasitarias debido a la desidia política y el peso del subdesarrollo, sino para aquellos sectores industrializados que también tienen tasas elevadas de enfermedades alérgicas. Recientemente un grupo de investigadores de Bangladesh, considerando el efecto potenciador de la ascariasis sobre los síntomas de alergia (Ahumada, et al., 2015), ha propuesto que la reducción de la prevalencia de sibilancias en niños de ese país durante los últimos años está relacionada con las campañas sistemáticas de desparasitación (Takeuchi, et al., 2016). Es posible que tengan razón dado que actualmente el efecto más generalizado de la ascariasis sobre las alergias a nivel poblacional es el de aumentar su intensidad (Caraballo and Ahumada, 2016).

La otra cara de la ascariasis: disminución de los síntomas de alergia

Como se ha dicho, la infección por Ascaris activa simultáneamente mecanismos de inmunosupresión e inmunoestimulación en el hospedero (Acevedo and Caraballo, 2011). No ha sido fácil determinar cuándo a nivel clínico se nota una más que la otra. Podría decirse que un alto nivel de exposición, como en zonas rurales con malas condiciones higiénicas, sería un factor de riesgo para inmunosupresión, pero al parecer los componentes de resistencia y predisposición genéticos juegan también un papel importante (Caraballo, 2013, Caraballo L, 2015). La inmunosupresión se ha detectado a nivel poblacional; se ha descrito que las infecciones severas por helmintos disminuyen la efectividad de las vacunas durante la infancia (Mkhize-Kwitshana and Mabaso, 2014, Salgame, et al., 2013). De igual manera varios estudios muestran baja frecuencia de alergias en zonas altamente parasitadas (Cooper, et al., 2004, Endara, et al., 2010, van den Biggelaar, et al., 2000) e hipo reactividad alérgica, especialmente en las pruebas cutáneas, en personas con helmintiasis (Rodrigues, et al., 2008, Stein, et al., 2016).

Por otro lado, las investigaciones básicas han descubierto diversas vías de inmunomodulación durante las infecciones por helmintos (Figura 2). Este aspecto es tal vez el más estudiado tanto a nivel epidemiológico como experimental, de donde proviene la mayoría de la información, algunas veces sorprendente (Osborne, et al., 2014, Reese, et al., 2014). La inmunosupresión inducida por los productos secretados por helmintos involucra diversas células y vías (Harnett, 2014), incluyendo el aumento de células T y B reguladoras (Hussaarts, et al., 2011, Metenou, et al., 2010, Zakzuk, 2016), la disminución de la activación de basófilos (Larson, et al., 2012) y en general altos niveles de IgE total y citoquinas como la IL-10 y TGF_β (Hagel, et al., 2011, Pitrez, et al., 2015). Otro aspecto importante es la producción de IgG (especialmente IgG4) contra componentes del parásito, observada en helmintiasis crónicas donde aparentemente es más fuerte la inmunomodulación (Figueiredo, et al., 2010). Este anticuerpo podría actuar como bloqueador inhibiendo la acción protectora y pro-inflamatoria de la IgE (Hagan, et al., 1991). De hecho, hemos observado que los niveles de IgG contra Ascaris fueron más altos en la población no alérgica que en un grupo de asmáticos alérgicos viviendo en el Trópico (Acevedo, et al., 2009a).

Ante el creciente aumento de las enfermedades de origen inmunológico a nivel mundial, es lógico que el efecto inmunosupresor de los helmintos despierte interés científico y comercial. Se ha evaluado la administración de helmintos no patógenos, que normalmente no infectan al humano, como tratamiento para procesos inflamatorios intestinales. Se ha llegado hasta utilizar patógenos como el *Ancylostoma duodenale* con el fin de disminuir la intensidad de rinitis alérgica. Los resultados de todas estas pruebas son contradictorios y han señalado que lo más práctico y ético es aislar las moléculas inmunomoduladoras para ser administradas a las dosis y presentaciones apropiadas.

De hecho, están en estudio varios componentes parasitarios con potencial utilidad como inmunomoduladores; aquí comentaremos más específicamente los de Ascaris. El análisis del genoma de *Ascaris suum* ha revelado que este parásito podría tener cerca de 10 componentes con actividad inmunomoduladora (**Jex**, *et al.*, 2011), lo que podría ocurrir en *Ascaris lumbricoides* por la gran similitud entre estas dos especies. En *A. lumbricoides* se ha aislado, purificado y evaluado, la molécula AICPI, una cistatina inhibidora de



Figura 2. Mecanismos de inmunomodulación por helmintos. Los helmintos secretan y/o excretan diversas substancias con efectos inmunomoduladores, algunos esquematizados en la figura. Los altos niveles de IgE total característicos de las helmintiasis podrían ocupar los receptores Fc de los basófilos, compitiendo con la IgE específica y disminuyendo la reactividad de estas células hacia los alergenos. Entre los mecanismos más reproducibles están el aumento de las células reguladoras (T y B) y la activación de los macrófagos por la vía alterna, lo cual disminuye su capacidad inflamatoria. Algunos componentes afectan la expresión de las moléculas MHC clase II y adicionalmente limitan la actividad del proteasoma, con el resultado final de una disminución de la presentación antigénica. Uno de los efectos más interesantes es la supresión de las células dendríticas, la cual, asociada a una disminución de la síntesis de IL33, afecta las fases iniciales de la respuesta inmunológica comprometiendo también a las células linfoides innatas (ILC).

proteasas (**Coronado S**, 2016) y en *A. suum* se detectado también actividad antiinflamatoria en la proteína excretada/ secretada PAS1 (**Antunes**, *et al.*, 2015).

Resumen y conclusiones

Hace algunos años parecía que los resultados contradictorios de los estudios epidemiológicos sobre la relación helmintiasis/alergia no eran más que el resultado de diferentes diseños metodológicos. Hoy vemos claramente que esas investigaciones de corte transversal detectaban lo ocurrido en condiciones climáticas, higiénicas y poblacionales precisas, que a su vez reflejaban la gran variabilidad a la exposición a los parásitos que existe en la actualidad. Como se sabe, el desarrollo económico y social de los países es desigual, con diferencias importantes aún entre los subdesarrollados, especialmente en cuanto a la dinámica y calidad del proceso de urbanización. No es de extrañar entonces que estudios que evalúan condiciones extremas de exposición a los parásitos, es decir, de baja y alta endemicidad, muestren resultados que en lugar de ser contradictorios nos están indicando que el nivel de exposición, así como el grado de severidad y cronicidad de las infecciones por helmintos, son determinantes para definir si predomina la inmunoestimulación sobre la inmunomodulación (Figura 3).

Un buen número de estudios experimentales, tanto en animales como en humanos sustentan cada vez más que las helmintiasis, incluyendo la ascariasis, inducen mecanismos inmunoreguladores (estimulación y supresión) que modifican la respuesta inmunológica de los hospederos. Esto tiene coherencia con la teoría de la evolución mediante selección natural ya que combina una fuerte respuesta protectora antiparasitaria con la suficiente tolerancia para que haya algún grado de parasitismo. Los escasos estudios de cohorte de nacimiento actualmente en curso en países tropicales (**Acevedo**, *et al.*, 2012) tienen la posibilidad de profundizar en estos aspectos. De igual manera, la disponibilidad de moléculas recombinantes, tanto alergénicas como inmunosupresoras, permitirá precisar mejor los mecanismos moleculares de la inmunomodulación.



Figura 3. Resumen esquemático de las dos posibilidades principales en la interacción de helmintiasis (por ejemplo, la ascariasis) con la respuesta alérgica y sus síntomas en una población del trópico, expuesta simultánea y perennemente tanto a los helmintos como a los alergenos de ácaros. Las infecciones leves inducen inmunoestimulación (IE) y mantienen o aumentan los síntomas de alergia, mientras que las severas inducen inmunosupresión (IS), la cual disminuye los síntomas. Nótese que ambos fenómenos suceden siempre pero con diferente intensidad, lo cual establece un gradiente que afectará los resultados de los estudios epidemiológicos. La figura no incluye los aspectos genéticos tanto del parásito como del hospedero.

Por ahora solo podemos afirmar que a pesar de tanta política adversa al desarrollo, este se ha dado en cierta medida y las condiciones higiénicas han mejorado en algunos sectores; de manera que hoy la exposición leve/ moderada a Ascaris supera en frecuencia a los niveles severos confinados a zonas rurales. De allí se deduce que actualmente el efecto inmunomodulador más frecuente de la ascariasis es la inmunoestimulación. La mayoría de los países industrializados ya pasaron por estas etapas y su prevalencia de enfermedades alérgicas es actualmente alta. Qué tanto tiene que ver esto con la ausencia de los efectos inmunosupresores de las helmintiasis está por definirse, pero el hecho de que en países menos desarrollados del trópico, donde todavía hay helmintiasis, la prevalencia de alergias sea similar o más elevada, sugiere que podría estar relacionada.

Tal vez lo que está sucediendo es que las helmintiasis ejercen su efecto estimulante en la población más susceptible, es decir la que está predispuesta genéticamente a responder de manera exagerada a ciertos estímulos ambientales: la población potencialmente alérgica. De allí que las cifras de prevalencia de alergias hayan llegado a una meseta en los últimos años, resistiendo los variados factores de riesgo existentes, entre los cuales las helmintiasis son apenas una parte. Podría decirse que en el futuro las alergias aumentarán en aquellas regiones actualmente muy expuestas a las helmintiasis en la medida en que las condiciones higiénicas mejoren. En las demás un aumento en frecuencia requeriría de cambios en la composición genética de la población.

Agradecimientos

Las investigaciones del autor que sustentan esta revisión fueron financiadas por Colciencias, contratos 406-2011 y 590-2013 y la Universidad de Cartagena (Plan de fortalecimiento de Grupo).

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Acevedo, N. & Caraballo, L. (2011). IgE cross-reactivity between Ascaris lumbricoides and mite allergens: possible influences on allergic sensitization and asthma. *Parasite Immunol* 33: 309-21.
- Acevedo, N., Erler, A., Briza, P., Puccio, F., Ferreira, F. & Caraballo, L. (2011). Allergenicity of Ascaris lumbricoides tropomyosin and IgE sensitization among asthmatic patients in a tropical environment. *Int Arch Allergy Immunol* 154: 195-206.
- Acevedo, N., Mercado, D., Vergara, C., Sánchez, J., Kennedy, M. W., Jiménez, S., Fernández, A. M., Gutiérrez, M., Puerta, L. & Caraballo, L. (2009a). Association between total immunoglobulin E and antibody responses to naturally acquired Ascaris lumbricoides infection and polymorphisms of immune system-related LIG4, TNFSF13B and IRS2 genes. *Clin Exp Immunol* 157: 282-90.
- Acevedo, N., Mohr, J., Zakzuk, J., Samonig, M., Briza, P., Erler,
 A., Pomes, A., Huber, C. G., Ferreira, F. & Caraballo, L. (2013). Proteomic and immunochemical characterization of glutathione transferase as a new allergen of the nematode Ascaris lumbricoides. *PLoS One* 8: e78353.
- Acevedo, N., Sanchez, J., Erler, A., Mercado, D., Briza, P., Kennedy, M., Fernandez, A., Gutierrez, M., Chua, K. Y., Cheong, N., Jimenez, S., Puerta, L. & Caraballo, L. (2009b). IgE cross-reactivity between Ascaris and domestic mite allergens: the role of tropomyosin and the nematode polyprotein ABA-1. *Allergy* 64: 1635-43.
- Acevedo, N., Sanchez, J., Zakzuk, J., Bornacelly, A., Quiroz, C., Alvarez, A., Puello, M., Mendoza, K., Martinez, D., Mercado, D., Jimenez, S. & Caraballo, L. (2012). Particular characteristics of allergic symptoms in tropical environments: follow up to 24 months in the FRAAT birth cohort study. *BMC Pulm Med* 12: 13.
- Agudelo-Lopez, S., Gomez-Rodriguez, L., Coronado, X., Orozco, A., Valencia-Gutierrez, C. A., Restrepo-Betancur, L. F., Galvis-Gomez, L. A. & Botero-Palacio, L. E. (2008). [Prevalence of intestinal parasitism and associated factors in a village on the Colombian Atlantic Coast]. *Rev Salud Publica (Bogota)* 10: 633-42.
- Ahumada, V., Garcia, E., Dennis, R., Rojas, M. X., Rondon, M. A., Perez, A., Penaranda, A., Barragan, A. M., Jimenez, S., Kennedy, M. W. & Caraballo, L. (2015). IgE responses to Ascaris and mite tropomyosins are risk factors for asthma. *Clin Exp Allergy* 45: 1189-1200.
- Antunes, M. F., Titz, T. O., Batista, I. F., Marques-Porto, R., Oliveira, C. F., Alves de Araujo, C. A. & Macedo-Soares, M. F. (2015). Immunosuppressive PAS-1 is an excretory/ secretory protein released by larval and adult worms of the ascarid nematode Ascaris suum. J Helminthol 89: 367-74.
- Buendía, E. (2015). The IgE response to Ascaris molecular components is associated with clinical indicators of asthma severity. WAO Journal 8: 8.

- Caraballo, L. (2013). Ascaris and Allergy. In *Ascaris: the neglected parasite* (ed. C. V. Holland), pp. 21-50. Elsevier.
- Caraballo, L. & Acevedo, N. (2011). New allergens of relevance in tropical regions: the impact of Ascaris lumbricoides infections. WAO Journal 4: 77-84.
- Caraballo, L. & Ahumada, V. (2016). Reply to 'Comments on IgE responses to Ascaris and mite tropomyosins are risk factors for asthma'. *Clin Exp Allergy* **46**: 181.
- Caraballo L, A. N., Buendía E. (2015). Human Ascariasis Increases the Allergic Response and Allergic Symptoms. *Curr Trop Med Rep* 2: 224-232.
- Carmona Fonseca Jaime, U. R., Correa Botero Adriana María (2009). Parasitosis intestinal en niños de zonas palúdicas de Antioquia (Colombia). *IATREIA* **22:** 28-46.
- Carvalho Kdos, A., de Melo-Neto, O. P., Magalhaes, F. B., Ponte, J. C., Felipe, F. A., dos Santos, M. C., dos Santos Lima, G., Cruz, A. A., Pinheiro, C. S., Pontes-de-Carvalho, L. C. & Alcantara-Neves, N. M. (2013). Blomia tropicalis Blo t 5 and Blo t 21 recombinant allergens might confer higher specificity to serodiagnostic assays than whole mite extract. *BMC Immunol* 14: 11.
- Cooper, P. J., Chico, M. E., Amorim, L. D., Sandoval, C., Vaca, M., Strina, A., Campos, A. C., Rodrigues, L. C., Barreto, M. L. & Strachan, D. P. (2016). Effects of maternal geohelminth infections on allergy in early childhood. J Allergy Clin Immunol 137: 899-906 e2.
- Cooper, P. J., Chico, M. E., Rodrigues, L. C., Strachan, D. P., Anderson, H. R., Rodriguez, E. A., Gaus, D. P. & Griffin, G. E. (2004). Risk factors for atopy among school children in a rural area of Latin America. *Clin Exp Allergy* 34: 845-52.
- Coronado S, e. a. (2016). A recombinant cystatin from Ascaris lumbricoides has immunomodulatory effects. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 137: AB228.
- Dennis, R. J., Caraballo, L., Garcia, E., Rojas, M. X., Rondon, M. A., Perez, A., Aristizabal, G., Penaranda, A., Barragan, A. M., Ahumada, V. & Jimenez, S. (2012). Prevalence of asthma and other allergic conditions in Colombia 2009-2010: a cross-sectional study. *BMC Pulm Med* 12: 17.
- Elliott, D. E. & Weinstock, J. V. (2012). Where are we on worms? *Curr Opin Gastroenterol* 28: 551-6.
- Endara, P., Vaca, M., Chico, M. E., Erazo, S., Oviedo, G., Quinzo, I., Rodriguez, A., Lovato, R., Moncayo, A. L., Barreto, M. L., Rodrigues, L. C. & Cooper, P. J. (2010). Long-term periodic anthelmintic treatments are associated with increased allergen skin reactivity. *Clin Exp Allergy* 40: 1669-77.
- Endara, P., Vaca, M., Platts-Mills, T. A., Workman, L., Chico, M. E., Barreto, M. L., Rodrigues, L. C. & Cooper, P. J. (2015). Effect of urban vs. rural residence on the association between atopy and wheeze in Latin America: findings from a case-control analysis. *Clin Exp Allergy* **45**: 438-47.
- Feillet, H. & Bach, J. F. (2004). Increased incidence of inflammatory bowel disease: the price of the decline of infectious burden? *Curr Opin Gastroenterol* 20: 560-4.

- Figueiredo, C. A., Barreto, M. L., Rodrigues, L. C., Cooper, P. J., Silva, N. B., Amorim, L. D. & Alcantara-Neves, N. M. (2010). Chronic intestinal helminth infections are associated with immune hyporesponsiveness and induction of a regulatory network. *Infect Immun* 78: 3160-7.
- Gerbe, F., Sidot, E., Smyth, D. J., Ohmoto, M., Matsumoto, I., Dardalhon, V., Cesses, P., Garnier, L., Pouzolles, M., Brulin, B., Bruschi, M., Harcus, Y., Zimmermann, V. S., Taylor, N., Maizels, R. M. & Jay, P. (2016). Intestinal epithelial tuft cells initiate type 2 mucosal immunity to helminth parasites. *Nature* 529: 226-30.
- Haahtela, T., Holgate, S., Pawankar, R., Akdis, C. A., Benjaponpitak, S., Caraballo, L., Demain, J., Portnoy, J., von Hertzen, L., Change, W. A. O. S. C. o. C. & Biodiversity (2013). The biodiversity hypothesis and allergic disease: world allergy organization position statement. World Allergy Organ J 6: 3.
- Hagan, P., Blumenthal, U. J., Dunn, D., Simpson, A. J. & Wilkins, H. A. (1991). Human IgE, IgG4 and resistance to reinfection with Schistosoma haematobium. *Nature* 349: 243-5.
- Hagel, I., Cabrera, M., Puccio, F., Santaella, C., Buvat, E., Infante, B., Zabala, M., Cordero, R. & Di Prisco, M. C. (2011). Co-infection with Ascaris lumbricoides modulates protective immune responses against Giardia duodenalis in school Venezuelan rural children. Acta Trop 117: 189-95.
- Harnett, W. (2014). Secretory products of helminth parasites as immunomodulators. *Mol Biochem Parasitol* 195: 130-6.
- Hawlader, M. D., Ma, E., Noguchi, E., Itoh, M., Arifeen, S. E., Persson, L. A., Moore, S. E., Raqib, R. & Wagatsuma, Y. (2014). Ascaris lumbricoids Infection as a Risk Factor for Asthma and Atopy in Rural Bangladeshi Children. *Trop Med Health* 42: 77-85.
- Hunninghake, G. M., Soto-Quiros, M. E., Avila, L., Ly, N. P., Liang, C., Sylvia, J. S., Klanderman, B. J., Silverman, E. K. & Celedon, J. C. (2007). Sensitization to Ascaris lumbricoides and severity of childhood asthma in Costa Rica. J Allergy Clin Immunol 119: 654-61.
- Hussaarts, L., van der Vlugt, L. E., Yazdanbakhsh, M. & Smits, H. H. (2011). Regulatory B-cell induction by helminths: implications for allergic disease. J Allergy Clin Immunol 128: 733-9.
- Jex, A. R., Liu, S., Li, B., Young, N. D., Hall, R. S., Li, Y., Yang, L., Zeng, N., Xu, X., Xiong, Z., Chen, F., Wu, X., Zhang, G., Fang, X., Kang, Y., Anderson, G. A., Harris, T. W., Campbell, B. E., Vlaminck, J., Wang, T., Cantacessi, C., Schwarz, E. M., Ranganathan, S., Geldhof, P., Nejsum, P., Sternberg, P. W., Yang, H., Wang, J., Wang, J. & Gasser, R. B. (2011). Ascaris suum draft genome. *Nature* 479: 529-33.
- Joubert, J. R., de Klerk, H. C. & Malan, C. (1979). Ascaris lumbricoides and allergic asthma: A new perspective. S Afr Med J 56: 599-602.
- Kolkhir, P., Balakirski, G., Merk, H. F., Olisova, O. & Maurer, M. (2016). Chronic spontaneous urticaria and internal parasites - a systematic review. *Allergy* 71: 308-22.

- Larson, D., Cooper, P. J., Hubner, M. P., Reyes, J., Vaca, M., Chico, M., Kong, H. H. & Mitre, E. (2012). Helminth infection is associated with decreased basophil responsiveness in human beings. *J Allergy Clin Immunol* 130: 270-2.
- Londono, A. L., Mejia, S. & Gomez-Marin, J. E. (2009). [Prevalence and risk factors associated with intestinal parasitism in preschool children from the urban area of Calarca, Colombia]. *Rev Salud Publica (Bogota)* 11: 72-81.
- Lynch, N. R., Hagel, I. A., Palenque, M. E., Di Prisco, M. C., Escudero, J. E., Corao, L. A., Sandia, J. A., Ferreira, L. J., Botto, C., Perez, M. & Le Souef, P. N. (1998). Relationship between helminthic infection and IgE response in atopic and nonatopic children in a tropical environment. *J Allergy Clin Immunol* 101: 217-21.
- Lynch, N. R., Palenque, M., Hagel, I. & DiPrisco, M. C. (1997). Clinical improvement of asthma after anthelminthic treatment in a tropical situation. *Am J Respir Crit Care Med* 156: 50-4.
- Maizels, R. M., McSorley, H. J. & Smyth, D. J. (2014). Helminths in the hygiene hypothesis: sooner or later? *Clin Exp Immunol* 177: 38-46.
- Mallol, J., Crane, J., von Mutius, E., Odhiambo, J., Keil, U., Stewart, A. & Group, I. P. T. S. (2013). The International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC) Phase Three: a global synthesis. *Allergol Immunopathol* (*Madr*) 41: 73-85.
- McSharry, C., Xia, Y., Holland, C. V. & Kennedy, M. W. (1999). Natural immunity to Ascaris lumbricoides associated with immunoglobulin E antibody to ABA-1 allergen and inflammation indicators in children. *Infect Immun* 67: 484-9.
- Metenou, S., Dembele, B., Konate, S., Dolo, H., Coulibaly, S. Y., Coulibaly, Y. I., Diallo, A. A., Soumaoro, L., Coulibaly, M. E., Sanogo, D., Doumbia, S. S., Traore, S. F., Mahanty, S., Klion, A. & Nutman, T. B. (2010). At homeostasis filarial infections have expanded adaptive T regulatory but not classical Th2 cells. J Immunol 184: 5375-82.
- Mkhize-Kwitshana, Z. L. & Mabaso, M. L. (2014). The neglected triple disease burden and interaction of helminths, HIV and tuberculosis: an opportunity for integrated action in South Africa. *S Afr Med J* **104:** 258, 259.
- Osborne, L. C., Monticelli, L. A., Nice, T. J., Sutherland, T. E., Siracusa, M. C., Hepworth, M. R., Tomov, V. T., Kobuley, D., Tran, S. V., Bittinger, K., Bailey, A. G., Laughlin, A. L., Boucher, J. L., Wherry, E. J., Bushman, F. D., Allen, J. E., Virgin, H. W. & Artis, D. (2014). Coinfection. Virushelminth coinfection reveals a microbiota-independent mechanism of immunomodulation. *Science* 345: 578-82.
- Pearce, N., Ait-Khaled, N., Beasley, R., Mallol, J., Keil, U., Mitchell, E. & Robertson, C. (2007). Worldwide trends in the prevalence of asthma symptoms: phase III of the International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC). *Thorax* 62: 758-66.

- Pitrez, P. M., Gualdi, L. P., Barbosa, G. L., Sudbrack, S., Ponzi, D., Cao, R. G., Silva, A. C., Machado, D. C., Jones, M. H., Stein, R. T. & Graeff-Teixeira, C. (2015). Effect of different helminth extracts on the development of asthma in mice: The influence of early-life exposure and the role of IL-10 response. *Exp Parasitol* 156: 95-103.
- Platts-Mills, T. A. & Cooper, P. J. (2010). Differences in asthma between rural and urban communities in South Africa and other developing countries. J Allergy Clin Immunol 125: 106-7.
- Pullan, R. L., Smith, J. L., Jasrasaria, R. & Brooker, S. J. (2014). Global numbers of infection and disease burden of soil transmitted helminth infections in 2010. *Parasit Vectors* 7: 37.
- Reese, T. A., Wakeman, B. S., Choi, H. S., Hufford, M. M., Huang, S. C., Zhang, X., Buck, M. D., Jezewski, A., Kambal, A., Liu, C. Y., Goel, G., Murray, P. J., Xavier, R. J., Kaplan, M. H., Renne, R., Speck, S. H., Artyomov, M. N., Pearce, E. J. & Virgin, H. W. (2014). Helminth infection reactivates latent gamma-herpesvirus via cytokine competition at a viral promoter. *Science* 345: 573-7.
- Rodrigues, L. C., Newcombe, P. J., Cunha, S. S., Alcantara-Neves, N. M., Genser, B., Cruz, A. A., Simoes, S. M., Fiaccone, R., Amorim, L., Cooper, P. J., Barreto, M. L., Social Change, A. & Allergy in Latin, A. (2008). Early infection with Trichuris trichiura and allergen skin test reactivity in later childhood. *Clin Exp Allergy* 38: 1769-77.
- Rodriguez, A., Vaca, M., Oviedo, G., Erazo, S., Chico, M. E., Teles, C., Barreto, M. L., Rodrigues, L. C. & Cooper, P. J. (2011). Urbanisation is associated with prevalence of childhood asthma in diverse, small rural communities in Ecuador. *Thorax* 66: 1043-50.
- Salgame, P., Yap, G. S. & Gause, W. C. (2013). Effect of helminthinduced immunity on infections with microbial pathogens. *Nat Immunol* 14: 1118-26.
- Schierack, P., Lucius, R., Sonnenburg, B., Schilling, K. & Hartmann, S. (2003). Parasite-specific immunomodulatory functions of filarial cystatin. *Infect Immun* 71: 2422-9.
- Smits, H. H. & Akdis, C. A. (2014). In utero priming by worms protects against respiratory allergies. *J Allergy Clin Immunol* 134: 1280-1.
- Spillmann, R. K. (1975). Pulmonary ascariasis in tropical communities. *Am J Trop Med Hyg* **24**: 791-800.
- Stein, M., Greenberg, Z., Boaz, M., Handzel, Z. T., Meshesha, M. K. & Bentwich, Z. (2016). The Role of Helminth Infection and Environment in the Development of Allergy: A Prospective Study of Newly-Arrived Ethiopian Immigrants in Israel. *PLoS Negl Trop Dis* 10: e0004208.
- Straubinger, K., Paul, S., Prazeres da Costa, O., Ritter, M., Buch, T., Busch, D. H., Layland, L. E. & Prazeres da Costa, C. U. (2014). Maternal immune response to helminth infection during pregnancy determines offspring susceptibility to allergic airway inflammation. J Allergy Clin Immunol 134; 1271-1279 e10.

- Takeuchi, H., Khan, A. F., Hasan, M. I., Hawlader, M. D., Yunus, M., Zaman, K., Chowdhury, H. R., Takanashi, S., Wagatsuma, Y. & Iwata, T. (2016). Comment on IgE responses to Ascaris and mite tropomyosins are risk factors for asthma. *Clin Exp Allergy* 46; 178-80.
- Takeuchi, H., Khan, A. F., Yunus, M., Hasan, M. I., Hawlader, M. D., Takanashi, S., Kano, H., Zaman, K., Chowdhury, H. R., Wagatsuma, Y., Nakahara, S. & Iwata, T. (2015). Anti-Ascaris immunoglobulin E associated with bronchial hyper-reactivity in 9-year-old rural Bangladeshi children. *Allergol Int.*
- Takeuchi, H., Zaman, K., Takahashi, J., Yunus, M., Chowdhury, H. R., Arifeen, S. E., Baqui, A., Wakai, S. & Iwata, T. (2008). High titre of anti-Ascaris immunoglobulin E associated with bronchial asthma symptoms in 5-year-old rural Bangladeshi children. *Clin Exp Allergy* **38**: 276-82.

- van den Biggelaar, A. H., van Ree, R., Rodrigues, L. C., Lell, B., Deelder, A. M., Kremsner, P. G. & Yazdanbakhsh, M. (2000). Decreased atopy in children infected with Schistosoma haematobium: a role for parasite-induced interleukin-10. *Lancet* 356: 1723-7.
- Zakzuk, J. (2016). Inmunorregulación inducida por helmintos: una actualización. . *Iatreia* 29: 182-193.
- Zakzuk, J., Bornacelly, A., Mercado, D., Sánchez, J., Acevedo, N., Caraballo, L. (2014). The evolution of IgE sensitization to Ascaris allergenic components in early infancy. In *Allergic diseases: from mechanisms to cure* (ed. S. J. Galli, You-Young Kim), pp. 29-31. Pacini Editore: Italy.
- Zakzuk, J., Jimenez, S., Cheong, N., Puerta, L., Lee, B. W., Chua, K. Y. & Caraballo, L. (2009). Immunological characterization of a Blo t 12 isoallergen: identification of immunoglobulin E epitopes. *Clin Exp Allergy* **39**: 608-16.

Distribution functions for a family of axially symmetric galaxy models

Guillermo A. González^{1,*}, Juan F. Pedraza², Javier Ramos-Caro³

¹ Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
² Institute for Theoretical Physics, University of Amsterdam, Amsterdam, Netherlands
³ Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

Abstract

We present the derivation of distribution functions for the first four members of a family of disks, previously obtained in **González and Reina** (2006), which represent a family of axially symmetric galaxy models with finite radius and well-behaved surface mass density. In order to do this, we employ several approaches that have been developed starting from the potential-density pair and, essentially using the method introduced by **Kalnajs** (1976), we obtain some distribution functions that depend on the Jacobi integral. Now, as this method demands that the mass density can be properly expressed as a function of the gravitational potential, we can do this only for the first four disks of the family. We also find another kind of distribution functions by starting with the even part of the previous distribution functions and using the maximum entropy principle in order to find the odd part and so a new distribution function, as it was pointed out by **Dejonghe** (1986). The result is a wide variety of equilibrium states corresponding to several self-consistent finite flat galaxy models. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Stellar dynamics, Galaxies: kinemtics and dynamics.

Funciones de distribución para una familia de modelos de galaxias axialmente simétricas

Resumen

Se presenta la derivación de funciones de distribución para los primeros cuatro miembros de una familia de discos, obtenida previamente en **González and Reina** (2006), la cual representa a una familia de modelos de galaxias axialmente simétricas de radio finito y con densidad superficial de masa bien comportada. Para ello, se emplean varios enfoques desarrollados a partir del par potencial-densidad y, utilizando esencialmente el método introducido por **Kalnajs** (1976), se obtienen algunas funciones de distribución que dependen de la integral de Jacobi. Ahora, ya que este método exige que la densidad de masa se pueda expresar adecuadamente como una función del potencial gravitacional, sólo es posible hacer esto para los primeros cuatro discos de la familia. También encontramos otro tipo de funciones de distribución, comenzando con la parte par de las funciones de distribución anteriores y utilizando el principio de máxima entropía con el fin de encontrar la parte impar y por lo tanto una nueva función de distribución, como fue señalado por **Dejonghe** (1986). El resultado es una amplia variedad de estados de equilibrio correspondiente a varios modelos auto-consistentes de galaxias planas finitas. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: Dinámica estelar, Galaxias: cinemática y dinámica.

Introduction

The problem of finding self-consistent stellar models for galaxies is of wide interest in astrophysics. Usually, once the potential-density pair (PDP) is formulated as a model for a galaxy, the next step is to find the corresponding distribution function (DF). This is one of the fundamental quantities in galactic dynamics specifying the distribution of the stars in the phase-space of positions and velocities. Although the DF can generally not be measured directly, there are some observationally accessible quantities that are closed related to the DF: the projected density and the line-of-sight velocity, provided by photometric and kinematic observations, are examples of DF moments. Thus, the formulation of a PDP with its corresponding equilibrium DFs establish a self-consistent stellar model that can be corroborated by astronomical observations. On the other hand, a fact that is usually assumed in astrophysics, see **Binney and Tremaine** (2008), is that the main part of the mass of a typical spiral galaxy is concentrated in a thin disk. Accordingly, the study of the gravitational potential generated by an idealized thin disk is a problem of great astrophysical relevance and so, through the years, different approaches has been used to obtain the PDP for such kind of thin disk models (see **Kuzmin** (1956) and **Toomre** (1963, 1964), as examples).

*Corresponding author:

Guillermo A. González, guillermo.gonzalez@saber.uis.edu.co Received: February 3, 2016 Accepted: May 2, 2016 Now, a simple method to obtain the PDP of thin disks of finite radius was developed by **Hunter** (1963), the simplest example of disk obtained by this method being the **Kalnajs** (1972) disk. In **González and Reina** (2006), we use the Hunter method in order to obtain an infinite family of axially symmetric finite thin disks, characterized by a well-behaved surface density, whose first member is precisely the well-known Kalnajs disk. Also, the motion of test particles in the gravitational fields generated by the first four members of this family was studied in **Ramos-Caro, López-Suspez and González** (2008), and a new infinite family of self-consistent models was obtained in **Pedraza, Ramos-Caro and González** (2008) as a superposition of members belonging to the family.

We will consider at the present paper the derivation of some two-integral DFs for the first four members of the family obtained in **González and Reina** (2006). Now, as is stated by the Jeans theorem, an equilibrium DF is a function of the isolating integrals of motion that are conserved in each orbit and, as it has been shown, it is possible to find such kind of DFs for PDPs such that there is a certain relationship between the mass density and the gravitational potential. The simplest case of physical interest corresponds to spherically symmetric PDPs, which are described by isotropic DFs that depends on the total energy E. Indeed, as was be shown in **Eddington** (1916), it is possible to obtain this kind of isotropic DFs by first expressing the density as a function of the potential and then solving an Abel integral equation.

Jiang and Ossipkov (2007) found that a similar procedure can be performed in the axially symmetric case, where the equilibrium DF depends on the energy E and the angular momentum about the axis of symmetry L_z , i.e. the two classical integrals of motion. They developed a formalism that essentially combines both the Eddington formulae and the **Fricke** (1952) expansion in order to obtain the DF even part, starting from a density that can be expressed as a function of the radial coordinate and the gravitational potential. Once such even part is determined, the DF odd part can be obtained by introducing some reasonable assumptions about the mean circular velocity or using the maximum entropy principle.

On the other hand, another method appropriated to find DFs depending only of the Jacobi integral, $E_r = E - \Omega L_z$, for axially symmetric flat galaxy models was introduced by **Kalnajs** (1976) for the case of disk-like systems and basically consists in to express the DF as a derivative of the surface mass density with respect to the gravitational potential. Such method does not demands solving an integral equation, but instead is necessary properly to express the mass density as a function of the gravitational potential, a procedure that is only possible in some cases.

In this paper we will use both of the mentioned approaches in order to obtain equilibrium DFs for some generalized Kalnajs disks. Accordingly, the paper is organized as follows. First, we present the fundamental aspects of the two methods that we will use in order to obtain the equilibrium DFs. Then, we present a summary of the main aspects of the generalized Kalnajs disks, and then we derive the DFs for the first four members of the family. Finally, we summarize our main results.

Formulation of the Methods

We assume that Φ and E are, respectively, the gravitational potential and the energy of a star in a stellar system. One can choose a constant Φ_0 such that the system has only stars of energy $E < \Phi_0$, and then define a relative potential $\Psi = -\Phi + \Phi_0$ and a relative energy $\varepsilon = -E + \Phi_0$, see **Binney and Tremaine** (2008), such that $\varepsilon = 0$ is the energy of escape from the system. Both the mass density $\rho(\mathbf{r})$ and the DF $f(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ are related to $\Psi(\mathbf{r})$ through the Poisson equation

$$\nabla^2 \Psi = -4\pi G \rho = -4\pi G \int f d^3 \mathbf{v},\tag{1}$$

where G is the gravitational constant.

ε

For the case of an axially symmetric system, it is customary to use cylindrical polar coordinates (R, φ, z) , where **v** is denoted by $\mathbf{v} = (v_R, v_{\varphi}, v_z)$. As it is well known, such system admits two isolating integrals for any orbit: the component of the angular momentum about thez-axis, $L_z = Rv_{\varphi}$, and the relative energy ε . Hence, by the Jeans theorem, the DF of a steadystate stellar system in an axially symmetric potential can be expressed as a non-negative function of ε and L_z , denoted by $f(\varepsilon, L_z)$. Such DF, that vanishes for $\varepsilon < 0$, is related to the mass density through eq. (1).

In this subject, $f(\varepsilon, L_z)$ is usually separated into even and odd parts, $f_+(\varepsilon, L_z)$ and $f_-(\varepsilon, L_z)$ respectively, with respect to the angular momentum L_z , where

$$f_{+}(\varepsilon, L_{z}) = \frac{1}{2} [f(\varepsilon, L_{z}) + f(\varepsilon, -L_{z})], \qquad (2)$$

and

$$f_{-}(\varepsilon, L_{z}) = \frac{1}{2} [f(\varepsilon, L_{z}) - f(\varepsilon, -L_{z})].$$
(3)
So, by using

$$=\Psi - \frac{1}{2}(v_R^2 + v_{\varphi}^2 + v_z^2), \qquad (4)$$

the integral given by (1) can be expressed, see **Binney and Tremaine** (2008), as

$$\rho = \frac{4\pi}{R} \int_0^{\Psi} \int_0^{R\sqrt{2(\Psi-\varepsilon)}} f_+(\varepsilon, L_z) dL_z d\varepsilon.$$
 (5)

For a given mass density, this relation can be considered as the integral equation determining $f_+(\varepsilon, L_z)$, while the odd part satisfies the relation

$$\rho R \langle v_{\varphi} \rangle = \frac{4\pi}{R} \int_0^{\Psi} \int_0^{R\sqrt{2(\Psi-\varepsilon)}} L_z f_-(\varepsilon, L_z) dL_z d\varepsilon.$$
 (6)

This integral equation was first found by **Lynden-Bell** (1962) and then applied by **Evans** (1993) into calculating the odd DF for the Binney model, under the assumption of $\langle v_{\varphi} \rangle$ having some realistic rotational laws.

As $\langle v_{\varphi} \rangle$ is not known, we cannot compute $f_{-}(\varepsilon, L_{z})$ directly by eq. (6) but what we can do is to obtain the most probable distribution functions under some suitable assumptions. Once $f_{+}(\varepsilon, L_{z})$ is known, $f_{-}(\varepsilon, L_{z})$, and therefore $f(\varepsilon, L_{z})$, can be obtained by means of the maximum entropy principle, see **Dejonghe** (1986), and we obtain

$$f_{-}(\varepsilon, L_{z}) = f_{+}(\varepsilon, L_{z}) \frac{e^{\alpha L_{z}} - 1}{e^{\alpha L_{z}} + 1},$$
(7)

$$f(\varepsilon, L_z) = \frac{2f_+(\varepsilon, L_z)}{1 + e^{-\alpha L_z}},$$
(8)

where α is the parameter depending on the total angular momentum. Obviously, $|f_{-}(\varepsilon, L_z)| \leq f_{+}(\varepsilon, L_z)$. Also, the system is non-rotating when $\alpha = 0$ and maximally rotating as $\alpha \to \infty$, i.e., for $\alpha \to +\infty$, it is anticlockwise and $f(\varepsilon, L_z) = [1 + \operatorname{sign}(L_z)]f_{+}(\varepsilon, L_z)$, for $\alpha \to -\infty$, the rotation is clockwise and $f(\varepsilon, L_z) = [1 - \operatorname{sign}(L_z)]f_{+}(\varepsilon, L_z)$. The parameter α reflects the rotational characteristics of the system.

As it was pointed out by **Fricke** (1952) and recently by **Jiang** and **Ossipkov** (2007), the implementation of integral equations (5) and (6) demands that one can express ρ as a function of R and Ψ . This holds indeed for the case of disk-like systems, which surface mass density Σ is related to f through

$$\Sigma = 4 \int_0^{\Psi} \int_0^{R\sqrt{2(\Psi-\varepsilon)}} \frac{f_+(\varepsilon, L_z)dL_z}{\sqrt{2R^2(\Psi-\varepsilon) - L_z^2}} d\varepsilon.$$
(9)

In order to incorporate the formalisms developed for the 3dimensional case to deal with disk-like systems, we have to generate a pseudo-volume density $\hat{\rho}$, see **Hunter and Quian** (1993), according to

$$\hat{\rho} = \sqrt{2} \int_0^{\Psi} \frac{\Sigma(R^2, \Psi') d\Psi'}{\sqrt{\Psi - \Psi'}},\tag{10}$$

which must take the place of ρ in (5) and (6). In particular, when $\hat{\rho}(\Psi, R) = \sum_{n=0}^{m} R^{2n} \varrho_n(\Psi)$, see **Jiang and Ossipkov** (2007), the corresponding even DF is

$$f_{+}(\varepsilon, L_{z}) = \sum_{n=0}^{m} \frac{2^{-n-3/2} L_{z}^{2n}}{\pi^{3/2} \Gamma(n+\frac{1}{2})} \\ \times \left[\int_{0}^{\varepsilon} \frac{d^{n+2} \varrho_{n}(\Psi)}{d\Psi^{n+2}} \frac{d\Psi}{\sqrt{\varepsilon - \Psi}} \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left(\frac{d^{n+1} \varrho_{n}(\Psi)}{d\Psi^{n+1}} \right)_{\Psi=0} \right].$$
(11)

Another simpler method to find equilibrium DFs corresponding to axially symmetric disk-like systems, was introduced by **Kalnajs** (1976). Such formalism deal with DFs that depend on the Jacobi's integral $E_r = E - \Omega L_z$, i.e. the energy measured in a frame rotating with constant angular velocity Ω . It is convenient to define an effective potential $\Phi_r = \Phi - \frac{1}{2}\Omega^2 R^2$ in such way that, if we choose a frame in which the velocity distribution is isotropic, the DF will be L_z -independent and, from (9), the relation between the surface mass density and the DF is reduced to

$$\Sigma = 2\pi \int_0^{\Psi_r} f(\varepsilon_r) d\varepsilon_r.$$
 (12)

Here, $\Psi_r = -\Phi + \frac{1}{2}\Omega^2 R^2 + \Phi_{0r}$ and $\varepsilon_r = \varepsilon + \Omega L_z + \Phi_{0r} - \Phi_0$, i.e. the relative potential and the relative energy measured in the rotating frame. Moreover, if one can express Σ as a function of Ψ_r , differentiating both sides of (12) with respect to Ψ_r , we obtain

$$f(\varepsilon_r) = \left. \frac{1}{2\pi} \frac{d\Sigma}{d\Psi_r} \right|_{\Psi_r = \varepsilon_r}.$$
(13)

Note that in this formalism it is also necessary to express the mass density as a function of the relative potential.

Distribution functions for a family of galaxy models

DFs for the family of disks

The family of disk models. In González and Reina (2006), we obtain an infinite family of axially symmetric finite thin disks such that the mass surface density of each model (labeled with the positive integer $m \ge 1$) is given by

$$\Sigma_m(R) = \Sigma_c^{(m)} \left[1 - \frac{R^2}{a^2} \right]^{m-1/2},$$
 (14)

with the constants $\Sigma_c^{(m)}$ given by

$$\Sigma_c^{(m)} = \frac{(2m+1)M}{2\pi a^2},\tag{15}$$

where M is the total mass and a is the disk radius. Such mass distribution generates an axially symmetric gravitational potential, that can be written as

$$\Phi_m(\xi,\eta) = -\sum_{n=0}^m C_{2n} q_{2n}(\xi) P_{2n}(\eta)$$
(16)

where $P_{2n}(\eta)$ and $q_{2n}(\xi) = i^{2n+1}Q_{2n}(i\xi)$ are the usual Legendre polynomials and the Legendre functions of the second kind respectively, and C_{2n} are constants given by

$$C_{2n} = \frac{MG\pi^{1/2}(4n+1)(2m+1)!}{a2^{2m+1}(2n+1)(m-n)!\Gamma(m+n+\frac{3}{2})q_{2n+1}(0)},$$

where G is the gravitational constant. Here, $-1 \leq \eta \leq 1$ and $0 \leq \xi < \infty$ are spheroidal oblate coordinates, related to the usual cylindrical coordinates (R, z) through the relations

$$R^{2} = a^{2}(1+\xi^{2})(1-\eta^{2}), \qquad z = a\eta\xi.$$
(17)

In particular, we are interested in the gravitational potential at the disk, where z = 0 and $0 \le R \le a$, so $\xi = 0$ and $\eta = \sqrt{1 - R^2/a^2}$.

If we choose Φ_{0m} in such a way that $\Psi_m \ge 0$, the corresponding relative potential for the first four members will be

$$\Psi_1(R) = \frac{3\pi MG}{8a^3} (a^2 - R^2), \qquad (18a)$$

$$\Psi_2(R) = \frac{15\pi MG}{128a^5} (5a^4 - 8R^2a^2 + 3R^4), \tag{18b}$$

$$\Psi_3(R) = \frac{35\pi MG}{512a^7} (11a^6 - 24R^2a^4 + 18R^4a^2 - 5R^6), \quad (18c)$$

$$\Psi_4(R) = \frac{315\pi MG}{32768a^9} (93a^8 - 256R^2a^6 + 288R^4a^4 - 160R^6a^2 + 35R^8),$$
(18d)

We shall restrict our attention to these four members. The formulae showed above defines the relative potentials that will be used to calculate the DFs by the implementation of the methods sketched in previous section.

DFs for the m = 1 **disk.** Given the mass surface distribution (14) and the relative potential (18a), we can easily obtain the following relation:

$$\Sigma_1(\Psi_1) = \frac{\sqrt{2}\Sigma_c^{(1)}}{\Omega_0 a} \Psi_1^{1/2},$$
(19)

where $\Omega_0 = [3\pi GM/(4a^3)]^{1/2}$. As we are dealing with disk-like systems, it is necessary to compute the pseudo-volume density $\hat{\rho}$ by eq. (10) in order to perform the integral (5),

$$\hat{\rho}_1(\Psi_1) = \frac{\pi \Sigma_c^{(1)}}{\Omega_0 a} \Psi_1.$$
(20)

By using the right part of eq. (11) with n = 0, which is equivalent to calculate the Fricke component of (20), we obtain the even part of a DF which depends only on the relative energy

$$f_{1+}^{(A)}(\varepsilon) = \frac{\Sigma_c^{(1)}}{2\pi\Omega_0 a\sqrt{2\varepsilon}}.$$
(21)

At this point, we may notice that this $f_{1+}(\varepsilon)$ corresponds to the DF formulated by **Binney and Tremaine** (2008) when $\Omega = 0$. (Note that there is a difference of constants as a result of a different definition of the relative potential and relative energy.)

To obtain a full DF, we use the maximum entropy principle by means of eq. (8) and the result is

To obtain a full DF, we use the maximum entropy principle by means of eq. (8) and the result is

$$f_1^{(A)}(\varepsilon, L_z) = \frac{\Sigma_c^{(1)}}{\pi \Omega_0 a \sqrt{2\varepsilon} (1 + e^{-\alpha L_z})}.$$
 (22)

In figure 1 we shown the contours of $f_1^{(A)}$ for different values of α : we take $\alpha = 10$ in figure 1(a), $\alpha = 1$ in figure 1(b), $\alpha = 0.1$ in figure 1(c) and $\alpha = 0$ in figure 1(d). As it is shown in the figures, α determines a particular rotational state in the stellar system (from here on we set G = a = M = 1 in order to generate the graphics, without loss of generality). As α increases, the probability to find a star with positive L_z increases as well. A similar result can be obtained for $\alpha < 0$, when the probability to find a star with negative L_z decreases as α decreases, and the corresponding plots would be analogous to figure 1, after a reflection about $L_z = 0$.

We can generalize this result if we perform the analysis in a rotating frame. At first instance, it is necessary to deal with the effective potential in order to take into account the fictitious



FIGURE 1. Contours of $f_1^{(A)}$, given by (22), for (a) $\alpha = 10$, (b) $\alpha = 1$, (c) $\alpha = 0.1$ and (d) $\alpha = 0$. Larger values of the DF corresponds to lighter zones.

forces. Choosing conveniently Φ_{0r} , the relative potential in the rotating frame takes the form

$$\Psi_{1r}(R) = \frac{(\Omega_0^2 - \Omega^2)}{2} (a^2 - R^2), \qquad (23)$$

so the corresponding mass surface density and the pseudovolume density can be expressed as

$$\Sigma_1(\Psi_{1r}) = \frac{\sqrt{2\Sigma_c^{(1)}}}{a\sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2}} \Psi_{1r}^{1/2}$$
(24)

and

$$\hat{\rho}(\Psi_{1r}) = \frac{\pi \Sigma_c^{(1)}}{a \sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2}} \Psi_{1r}.$$
(25)

The resulting even part of the DF in the rotating frame is

$$f_{1+}^{(B)}(\varepsilon_r) = \frac{\Sigma_c^{(1)}}{2\pi a \sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2} \sqrt{2\varepsilon_r}},$$
(26)

and it can be derived following the same procedure used to find $f_{1+}^{(A)}(\varepsilon)$ or by the direct application of eq. (13).

Finally, one can come back to the original frame through the relation between ε_r , ε and L_z to obtain

$$f_1^{(B)}(\varepsilon, L_z) = \frac{\sum_c^{(1)} \left[2(\varepsilon + \Omega L_z) - \Omega^2 a^2 \right]^{-1/2}}{2\pi a \sqrt{\Omega_0^2 - \Omega^2}}, \qquad (27)$$

which is totally equivalent to the **Binney and Tremaine** (2008) DF for the Kalnajs disk. Its contours, showed in figure 2 for different values of Ω , reveals that the probability to find stars with $\varepsilon < \Omega^2 a^2/2 - \Omega L_z$ is zero, while it has a maximum when $\varepsilon \gtrsim \Omega^2 a^2/2 - \Omega L_z$ (this defines the white strip shown in the figure) and decreases as ε increases. We take $\Omega = -\pi/4$ in figure 2(a), $\Omega = -\pi/16$ in figure 2(b), $\Omega = \pi/4$ in figure 2(c) and $\Omega = \pi/16$ in figure 2(d). Nevertheless, this $f_1^{(B)}(\varepsilon, L_z)$ is



FIGURE 2. Contours of $f_1^{(B)}$, given by (27), for (a) $\Omega = -\pi/4$, (b) $\Omega = -\pi/16$, (c) $\Omega = \pi/4$ an (d) $\Omega = \pi/16$. Larger values of the DF corresponds to lighter zones.

quiet unrealistic as it represent a state with $\langle v_{\varphi} \rangle = \Omega R$ and it means that the behavior of the system, in disagreement with the observations, behaves like a rigid solid.

However, we can generate a better DF if we took only the even part of (27) and using the maximum entropy principle to obtain

$$\tilde{f}_{1}^{(B)}(\varepsilon, L_{z}) = \frac{2f_{1+}^{(B)}(\varepsilon, L_{z})}{1 + e^{-\alpha L_{z}}}.$$
(28)

As it is shown in figure 3, where we plot the contours of $\tilde{f}_1^{(B)}$ for $\Omega = \pi/4$ with $\alpha = 1$ in figure 3(a) and $\alpha = 10$ in figure 3(b), and for $\Omega = \pi/16$ with $\alpha = 1$ in figure 3(c), and $\alpha = 10$ in figure 3(d), there is a zone of zero probability, just in the intersection of black zones produced by $\tilde{f}_1^{(B)}(\varepsilon, \pm L_z)$, and there are also two maximum probability stripes. The variation of the Ω parameter leads to the change of inclination of the maximum probability stripes and it is easy to see that the DF would be

invariant under the sign of Ω , by the definition of the even part. Furthermore, α plays a similar role than in figure 1, increasing the probability of finding stars with high L_z as α increases and vice versa.

DFs for the m = 2 **disk.** Working in a rotating frame we found that the relative potential is given by

$$\Psi_{2r}(R) = \frac{(a^2 - R^2)}{128a^5} \left[45GM\pi(a^2 - R^2) + 30GM\pi a^2 - 64a^5\Omega^2 \right],$$
(29)

while the surface mass density is given by (14) when m = 2. This case is a little more complicated than the usual Kalnajs disk, because the analytical solution of the pseudo-volume density cannot be performed with total freedom. We will need to operate in a rotating frame conveniently chosen in such a way that the relation between the mass surface density and the relative potential becomes simpler.



FIGURE 3. Contours of $\tilde{f}_1^{(B)}$, given by (28), for $\Omega = \pi/4$ with (a) $\alpha = 1$, and (b) $\alpha = 10$. For $\Omega = \pi/16$ we have (c) $\alpha = 1$, and (d) $\alpha = 10$. Larger values of the DF corresponds to lighter zones.

Distribution functions for a family of galaxy models

From eq. (29) it is possible to see that if we choose the angular velocity as

$$\Omega = \pm \sqrt{\frac{15GM\pi}{32a^3}},$$

(30)

the relative potential is reduced to

$$\Psi_{2r}(R) = \frac{45GM\pi}{128a^5} \left(a^2 - R^2\right)^2.$$
(31)

Now, we can express the surface mass density easily in terms of the relative potential by the relation

$$\Sigma_2(\Psi_{2r}) = \Sigma_c^{(2)} \left(\frac{128a}{45GM\pi}\Psi_{2r}\right)^{3/4},$$
(32)

and the integral for the pseudo-volume density can be performed and we obtain

$$\hat{\rho}(\Psi_{2r}) = \frac{\sqrt{2\pi\Sigma_c^{(2)}\Gamma(7/4)}}{\Gamma(9/4)} \left(\frac{128a}{45GM\pi}\right)^{3/4} \Psi_{2r}^{5/4}.$$
 (33)

Using then eq. (11), the resulting even part of the DF in the rotating frame and the full DF in the original frame are

$$f_{2+}^{(A)}(\varepsilon_r) = \kappa \varepsilon_r^{-1/4}, \qquad (34)$$

and

$$f_2^{(A)}(\varepsilon, L_z) = \kappa \left(\varepsilon + \Omega L_z - \frac{1}{2}\Omega^2 a^2\right)^{-1/4}, \qquad (35)$$

respectively, where Ω could take the values according to (30) and κ is the constant given by

$$\kappa = \frac{3\Sigma_c^{(2)}}{8\pi} \left(\frac{128a}{45GM\pi}\right)^{3/4}.$$
 (36)

Moreover, using the same arguments given in section (), it's convenient to take the even part of (35) and obtain a new DF using eq. (8), which is given by

$$\tilde{f}_{2}^{(A)}(\varepsilon, L_{z}) = \frac{2f_{2+}^{(A)}(\varepsilon, L_{z})}{1 + e^{-\alpha L_{z}}}.$$
(37)

A more general case can be derived without the assumption (30) if we use the Kalnajs method in order to avoid the pseudovolume density integral. Here we work in terms of the spheroidal oblate coordinates to obtain more easier the relation between the mass surface density and the relative potential, which can be expressed as

$$\Psi_{2r}(\eta) = \frac{45GM\pi}{128a}\eta^4 + \frac{15GM\pi - 32a^3\Omega^2}{64a}\eta^2.$$
 (38)

Now, it is possible to rewrite this expression as

$$\Psi_{2r}(\eta) = (\kappa_1 \eta^2 + \kappa_2)^2 + \kappa_3, \qquad (39)$$

with

$$\kappa_1 = \sqrt{\frac{45GM\pi}{128a}},\tag{40}$$

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{128a}{45GM\pi}} \frac{15GM\pi - 32a^3\Omega^2}{128a}$$
(41)

$$\kappa_3 = -\frac{128a}{45GM\pi} \left(\frac{15GM\pi - 32a^3\Omega^2}{128a}\right)^2.$$
 (42)

Then, as Σ can be expressed in terms of η in the form

$$\Sigma_m(\eta) = \Sigma_c^{(m)} \eta^{2m-1}, \qquad (43)$$

the relation between Σ_2 and Ψ_{2r} is

Ŋ

$$\Sigma_{2} = \Sigma_{c}^{(2)} \left(\frac{\sqrt{\Psi_{2r} - \kappa_{3}} - \kappa_{2}}{\kappa_{1}} \right)^{3/2}.$$
 (44)

Now, by using eq. (13), we obtain

$$f_2^{(B)}(\varepsilon_r) = \frac{3\Sigma_c}{8\pi k_1^{3/2}} \left[\frac{\sqrt{\varepsilon_r - k_3} - k_2}{\varepsilon_r - k_3} \right]^{1/2},\tag{45}$$

and the result in the original frame is

$$f_2^{(B)}(\varepsilon, L_z) = \frac{3\Sigma_c}{8\pi k_1^{\frac{3}{2}}} \left[\frac{(\varepsilon + \Omega L_z - \frac{\Omega^2 a^2}{2} - k_3)^{\frac{1}{2}} - k_2}{\varepsilon + \Omega L_z - \frac{\Omega^2 a^2}{2} - k_3} \right]^{\frac{1}{2}}.$$
 (46)

Obviously, this DF is the same as (35) when the condition (30) is satisfied. Finally, by eq. (8), the resulting DF with maximum entropy is given by

$$\tilde{f}_{2}^{(B)}(\varepsilon, L_{z}) = \frac{2f_{2+}^{(B)}(\varepsilon, L_{z})}{1 + e^{-\alpha L_{z}}}.$$
(47)

We can see the behavior of these DFs in figures 4 and 5. In figures 4(a) and 4(b) we show the contours of $f_2^{(A)}$ for the two rotational states given by eq. (30). Such DF is maximum over a narrow diagonal strep, near to the zero probability region, and the probability decreases as ε increases, similarly to the case showed in figure 3. The corresponding contours of $\tilde{f}_2^{(A)}$, given by eq. (37), are plotted in 4(c), for $\alpha = 1$, and 4(d), for $\alpha = 10$.

The DFs for stellar systems characterized by different Ω are shown in figures 5(a) and 5(b), where we plot the contours of $f_2^{(B)}$ for the two rotational states given by (30). Note that $f_2^{(B)}$ equals to $f_2^{(A)}$ when Ω is given by (30). In this case the DF varies more rapidly as Ω decreases, originating narrower bands. The corresponding contours of $\tilde{f}_2^{(A)}$ and $\tilde{f}_2^{(B)}$ for different values of the parameter α are shown in figures 5(c) and 5(d), showing a similar behavior than $\tilde{f}_1^{(B)}$. We take $\alpha = 1$ for 5(c) and $\alpha = 10$ for 5(d).

DFs for the m = 3 **disk.** Once again, if we want to use the Kalnajs method, it is necessary to derive the relation $\Sigma_3(\Psi_{3r})$ and, according to (43), it is possible if we can invert the equation of the relative potencial, which in this case is given by

$$\Psi_{3r}(\eta) = \frac{175GM\pi}{512a} \eta^6 + \frac{105GM\pi}{512a} \eta^4 + \frac{105GM\pi - 256a^3\Omega^2}{512a} \eta^2,$$
(48)

in order to obtain $\eta(\Psi_{3r})$. To solve it, we must deal with a cubic equation and with its non-trivial solutions; fortunately, we still have Ω as a free parameter.



FIGURE 4. In (a) and (b) we show the contours of $f_2^{(A)}$, given by (35), for $\Omega = \sqrt{15\pi/32}$ and $\Omega = -\sqrt{15\pi/32}$, respectively. The corresponding contours of $\tilde{f}_2^{(A)}$, given by (37), are plotted in (c) for $\alpha = 1$, and (d) for $\alpha = 10$. Larger values of the DF corresponds to lighter zones.

One can easily note that it is possible to write (48) as

Now, by replacing (43) into (49), we obtain

$$\Psi_{3r}(\eta) = (\kappa_1 \eta^2 + \kappa_2)^3 + \kappa_3, \tag{49}$$

with

$$\kappa_1 = \left(\frac{175GM\pi}{512a}\right)^{1/3},\tag{50}$$

$$\kappa_2 = \left(\frac{7\pi GM}{2560a}\right)^{1/3},\tag{51}$$

$$\kappa_3 = -\frac{7GM\pi}{2560a},\tag{52}$$

and Ω has be chosen as

$$\Omega = \pm \sqrt{\frac{21GM\pi}{64a^3}}.$$
(53)

$$\Sigma_3 = \Sigma_c^{(3)} \left(\frac{(\Psi_{3e} - \kappa_3)^{1/3} - \kappa_2}{\kappa_1} \right)^{5/2}, \tag{54}$$

and, by using eq. (13),

$$f_3(\varepsilon_r) = \frac{5\Sigma_c^{(3)} \left((\varepsilon_r - \kappa_3)^{1/3} - \kappa_2 \right)^{3/2}}{12\pi\kappa_1^{5/2} (\varepsilon_r - \kappa_3)^{2/3}}.$$
 (55)

Coming back to the original frame, the result is

$$f_3(\varepsilon, L_z) = \frac{5\Sigma_c^{(3)} \left(\left(\varepsilon + \Omega L_z - \frac{\Omega^2 a^2}{2} - \kappa_3\right)^{\frac{1}{3}} - \kappa_2 \right)^{\frac{3}{2}}}{12\pi\kappa_1^{5/2} \left(\varepsilon + \Omega L_z - \frac{\Omega^2 a^2}{2} - \kappa_3 \right)^{\frac{2}{3}}}, \quad (56)$$

while the respective DF with maximum entropy is

$$\tilde{f}_3(\varepsilon, L_z) = \frac{2f_{3+}(\varepsilon, L_z)}{1 + e^{-\alpha L_z}}.$$
(57)



FIGURE 5. In (a) and (b) we show the contours of $f_2^{(B)}$, given by (46), for $\Omega = \pi/10$ and $\Omega = \pi/5$, respectively. The remaining figures exhibit the corresponding contours of $\tilde{f}_2^{(B)}$, given by (47), for $\Omega = \pi/10$ with (c) $\alpha = 0.1$ and (d) $\alpha = 5$. Larger values of the DF corresponds to lighter zones.

In figure 6(a) we show the contour of f_3 , while in figures 6(b), 6(c) and 6(d) are plotted the contours of \tilde{f}_3 for different values of α . We can see that the behavior of these DFs is opposite to the previous cases. As the Jacobi's integral icreases, the DF also increases.

Now, although we have to deal with a quartic equation, it is possible to rewrite (58) as

$$\Psi_{4r} = [(\kappa_1 \eta^2 + \kappa_2)^2 + \kappa_3]^2 + \kappa_4, \tag{59}$$

where

$$\kappa_1 = \left(\frac{11025\pi GM}{32768a}\right)^{1/4},\tag{60}$$

$$\kappa_2 = \left(\frac{225\pi GM}{1605632a}\right)^{1/4},\tag{61}$$

$$\kappa_3 = \left(\frac{81\pi GM}{6272a}\right)^{1/2},\tag{62}$$

$$\kappa_4 = -\frac{25281\pi GM}{1605632a},\tag{63}$$

DFs for the m = 4 **disk.** As we saw in section , in order to find a DF using the Kalnajs method, we must find η as a function of the relative potential in order to obtain $\Sigma(\Psi_r)$. For the m = 4 disk, the relative potential can be expressed as

$$\Psi_{4r} = \frac{11025GM\pi}{32768a} \eta^8 + \frac{1575GM\pi}{8192a} \eta^6 + \frac{2835GM\pi}{16384a} \eta^4 + \frac{1575GM\pi - 4096a^3\Omega^2}{8192a} \eta^2.$$
(58)



FIGURE 6. In (a) we show the contours of f_3 given by (56) and taking the positive value of Ω . The remaining figures exhibit the contours of \tilde{f}_3 , given by (57), for (b) $\alpha = 10$, (c) $\alpha = 1$, and (d) $\alpha = 0.1$. Larger values of the DF corresponds to lighter zones.

and Ω must to be chosen as

$$\Omega = \pm \sqrt{\frac{135GM\pi}{448a^3}}.$$
(64)

Finally, by using (43) and (49), we find the expression

$$\Sigma_4 = \Sigma_c^{(4)} \left[\frac{\sqrt{\sqrt{\Psi_{4r} - \kappa_4} - \kappa_3} - \kappa_2}{\kappa_1} \right]^{7/2}, \qquad (65)$$

which, by means of eq. (13), can be used to derive the even part of the DF in the rotating frame,

$$f_4(\varepsilon_r) = \frac{7\Sigma_c^{(4)} \left[\sqrt{\sqrt{\varepsilon_r - \kappa_4} - \kappa_3} - \kappa_2\right]^{5/2}}{16\pi\kappa_1^{7/2}\sqrt{(\sqrt{\varepsilon_r - \kappa_4} - \kappa_3)(\varepsilon_r - \kappa_4)}}.$$
 (66)

Therefore, the corresponding DF in the original frame is given by

$$f_4(\varepsilon, L_z) = \frac{7\Sigma_c^{(4)} [g(\varepsilon, L_z) - \kappa_2]^{5/2}}{16\pi \kappa_1^{7/2} g(\varepsilon, L_z) [g^2(\varepsilon, L_z) + \kappa_3]}, \qquad (67)$$

where

$$g(\varepsilon, L_z) = \sqrt{\sqrt{\varepsilon + \Omega L_z - \Omega^2 a^2/2 - \kappa_4} - \kappa_3}, \qquad (68)$$

and the respective DF with maximum entropy is given by

$$\tilde{f}_4(\varepsilon, L_z) = \frac{2f_{4+}(\varepsilon, L_z)}{1 + e^{-\alpha L_z}}.$$
(69)

In figure 7(a) we show the contour of f_4 , while in figures 7(b), 7(c) and 7(d) are plotted the contours of \tilde{f}_4 for different values of α . As we can see, the behavior is analogous to the showed at figure 6.



FIGURE 7. In (a) we show the contours of f_4 given by (67) and taking the positive value of Ω . The remaining figures exhibit the contours of \tilde{f}_4 , given by (69), for (b) $\alpha = 10$ (c) $\alpha = 1$ and (d) $\alpha = 0.1$. Larger values of the DF corresponds to lighter zones.

Concluding Remarks

We presented the derivation of two-integral equilibrium DFs for some members of the family of disks previously obtained by González and Reina (2006). Such two-integral DFs were obtained, esentially, by expresing them as functionals of the Jacobi integral, as it was sketched in the formalism developed by Kalnajs (1976). Now, since such formalism demands that the surface mass density can be written as a potential-dependent function, the above procedure can only be implemented for the first four members of the family, the disks with m = 1, 2, 3, 4. Indeed, the procedure requires that the expression given the relative potential Ψ_r as a function of the spheroidal variable η can be analytically inverted in order to express the surface mass density Σ as a function of the relative potential. So, we can do this in a simple way for the disks with m = 1 to 4. However, when m > 4 we must to solve an equation of grade larger than four, whose analytical solution do not exists.

For the first two members of the family, the disks with m = 1, 2, we also use the method introduced by Jiang and Ossipkov (2007) in order to find the even part of the DF and then, by introducing the maximum entropy principle, we can determines the full DF. This procedure was also used for the other three disks, starting from the Kalnajs (1976) method, so defining another class of two-integral DFs. Such kind of DFs describes stellar systems with a preferred rotational state, characterized by the parameter α . This paper can be considered as a natural complement of the work previously presented by González and Reina (2006) and Ramos-Caro, López-Suspez and González (2008), where the PDP formulation and the kinematics, respectively, of the disks were analyzed. Now, by the construction of the corresponding two-integral DFs, the first four members of this family can be considered as a set of selfconsistent stellar models for axially symmetric galaxies.

Acknowledgments. GAG was supported in part by VIE-UIS, under grants number 1347 and 1838, and COLCIENCIAS, Colombia, under grant number 8840.
Conflict of interest. The authors declare that they have no conflict of interest.

Bibliografía

- Binney, J. and Tremaine, S. (2008). Galactic Dynamics. 2nd ed. Princeton University Press.
- **Dejonghe, H.** (1986). Stellar dynamics and the description of stellar systems. Phys. Rep., 133, 217.
- Eddington, A. S. (1916). The distribution of stars in globular clusters. MNRAS, 76, 572.
- Evans, N. W. (1993). Simple galaxy models with massive haloes. MNRAS, 260, 191.
- Fricke, W. (1952). Dynamic justification of the speed distribution in the star system. Astron. Nachr., 280, 193.
- González, G. A. and Reina, J. I. (2006). An infinite family of generalized Kalnajs disks. MNRAS, 371, 1873.
- Hunter, C. (1963). The structure and stability of selfgravitating disks. MNRAS, 126, 299.
- Hunter, C. and Quian, E. (1993). Two-integral distribution functions for axisymmetric galaxies. MNRAS, 262, 401.

- Jiang, Z. and Ossipkov, L. (2007). Two-integral distribution functions for axisymmetric systems. MNRAS, 379, 1133.
- Kalnajs, A. J. (1972). The equilibria and oscillations of a family of uniformly rotating stellar disks. Astrophys. J., 175, 63.
- Kalnajs, A. J. (1976). Dynamics of flat galaxies. III. Equilibrium models. Astrophys. J., 205, 751.
- Kuzmin, G. (1956). A stationary galaxy model admitting triaxial velocity distribution. Astron. Zh., 33, 27.
- Lynden-Bell, D. (1962). Stellar dynamics: Exact solution of the self-gravitation equation. MNRAS, 123, 447-458.
- Pedraza J. F., Ramos-Caro J. and González G. A. (2008). An infinite family of self-consistent models for axisymmetric flat galaxies. MNRAS, 390, 1587.
- Ramos-Caro J., López-Suspez F. and González G. A. (2008). Chaotic and Regular Motion Around Generalized Kalnajs disks. MNRAS, 386, 440.
- **Toomre, A.** (1963). On the Distribution of Matter Within Highly Flattened Galaxies. Astrophys. J., 138, 385.
- **Toomre, A.** (1964). On the gravitational stability of a disk of stars. Astrophys. J., 139, 1217.

Imanes permanentes: características, aplicaciones y futuro

Germán Antonio Pérez-Alcázar

Departamento de Física, Universidad del Valle, Cali, Colombia

Resumen

Actualmente uno de los materiales magnéticos más utilizados en aplicaciones tecnológicas, son los imanes permanentes (IP) o materiales magnéticamente duros. En vista de su importancia, presento en este trabajo una revisión del estado del arte sobre estos materiales, partiendo de una revisión teórica de los conceptos y características más importantes que deben tenerse en cuenta para entender cómo funcionan; pasando por exponer y discutir los diferentes tipos de materiales que se utilizan en su fabricación y sus aplicaciones industriales relevantes; y finalmente discutir las rutas investigativas actuales y futuras en estos materiales, con el fin de obtener materiales para IP con mejores rendimientos y con menores costos. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: imanes permanentes, sistemas nano-estructurados, anisotropía, coercitividad.

Permanent magnets: features, applications and future

Abstract

Actually, one of the most used magnetic materials in technological applications are the permanent magnets (PM) or hard magnetic materials. Due their importance, in this work I present a review of the state of the art about these materials; starting with a theoretical revision of the principal concepts and most important characteristics that are necessary to understand how they work; passing by the exposition and discussion of the different types of materials which are used for their production, and their relevant industrial applications; and finally to discuss the actual and future research pathways about these materials. This in order to obtain PM materials with better performance and low costs. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Permanent magnets, nanostructured systems, anisotropy, coercivity.

Introducción

Los imanes permanentes (IPs) son materiales que, después de ser magnetizados por un campo magnético alto, mantienen su alta magnetización aun con cambios de temperatura o con la presencia de campos magnéticos externos (**B. D. Cullity** & C. D. Graham (2009). A lo largo de la historia IPs han sido encontrados en forma natural, tal como la magnetita (Oxido de Fe), o han sido producidos por el hombre, tales como los alnico (IPs producidos principalmente con base a Fe, Al, Ni y Co), o las ferritas (ferrita de Ba y la de Sr) (**B**. D. Cullity & C. D. Graham (2009) y R. C. O'Handley (2000)). A partir de la década de los 60 aparecieron los IPs con tierras raras, tales como sistemas con base a SmCo o YCo, y Nd₂Fe₁₄B, La₂Fe₁₄B o Pr₂Fe₁₄B (**R. C. O'Handley**). Más recientemente se han obtenido IPs libres de tierras raras obtenidos por aleación de diferentes elementos de transición tales como FePt, CoPt, MnAl y MnBi las cuales tienen estructura tetragonal (Felix Jimenez-Villacorta & Laura H. Lewis (2014)).

El desarrollo de los IPs se da en vista de la necesidad de obtener gran cantidad de energía magnética almacenada en pequeños volúmenes, para ser incorporados en una enorme variedad de aplicaciones, que incluyen computadores y productos de consumo en oficinas, en la industria automotriz y de transporte, la electrónica, productos electrónicos caseros, productos para la automatización en fábricas, industria médica, industrias alternativas, y aplicaciones militares [USGS Mineral resources program, http://minerals.usgs.gov/. y Laura H. Lewis & Félix Jiménez-Villacorta (2011)).

En este artículo de revisión se abordaran primero las ideas físicas importantes para entender el funcionamiento de un IP, se hará un recorrido histórico de los diferentes materiales y tipos de IPs, se detallaran las principales aplicaciones, y finalmente se hablará de las principales tendencias actuales y futuras en la obtención de IPs con mejores rendimientos.

Conceptos básicos y terminología

a. Ciclo de histéresis

Una manera de caracterizar los materiales magnéticos, es realizar un ciclo de histéresis, o sea una curva de

Correspondencia:

Germán Antonio Pérez Alcázar, gpgeperez@gmail.com Recibido: 4 de mayo de 2016 Aceptado: 7 de junio de 2016

magnetización (M) o inducción magnética (B) en función de un campo magnético aplicado (H). Estas variables se relacionan mediante la expresión

$$4\pi M = B - H (\text{cgs}) \circ \mu_0 M = B - \mu_0 H (\text{SI})$$
(1)

Una curva típica para un material magnético se ilustra en la Figura 1, los números se utilizan para ilustrar la estructura de los dominios magnéticos en el ciclo de histéresis.

La notación cgs indica que las unidades utilizadas son centímetros, gramos y segundos, y la SI indica que se trabaja en el Sistema Internacional en metros, kilogramos y segundos. En la Figura 1 se muestra el ciclo obtenido de B vs. H o M vs. H y también se representa el comportamiento de la estructura de dominios. En la curva de magnetización inicial (a trazos) la estructura de dominios inicial (1) muestra como ellos están orientados en diferentes direcciones (o direcciones de fácil magnetización), esta estructura de dominios cambia con el aumento del campo. Los dominios con orientación cercana al campo crecen, y aquellos con orientación contraria al campo decrecen (2). Para un cierto campo se alcanza la magnetización de saturación M, donde todos los dominios se orientan en la dirección del campo y se tiene un monodominio (3). Para este campo aplicado la inducción magnética tiene un valor B_{c} dado por B_{c} $= 4\pi M_s + H$ (cgs) o $B_s = \mu_o(M_s + H)$ (SI). Después de la saturación, se lleva H a 0, y este punto se conoce como B_{μ} o inducción magnética remanente (4), al cual le corresponde una magnetización remanente, $M_{..}$ Si el campo H aumenta en dirección contraria se llega al campo coercitivo, $-H_{,v}$ o coercitividad, que es el campo para el cual B y M son cero



Figura 1. Ciclo de histéresis, *B* vs. *H* o *M* vs. *H* y algunas estructuras de dominios (https://www.google.com.co/search?ciclos +de+histéresis).

(5). En este punto los dominios se orientan de tal manera que la magnetización total es cero. Si el campo sigue aumentando se llegará a la saturación negativa con valores $-B_s$ o $-M_s$ (6). Si el módulo del campo se reduce se recorrerá una curva simétrica a la anterior, pasando por $-B_r$ o $-M_r$ cuando H = 0, por H_s y finalmente de nuevo a la saturación positiva.

Sin embargo los ciclos de *B* vs. *H* y de *M* vs. *H* no son idénticos, como lo muestra la Figura 1S, http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1515, en el sistema cgs.

En cgs la curva de *B* vs. *H* se describe por la relación $B = 4\pi M + H$, luego cuando *M* satura la inducción tiene un valor $B_s = 4\pi M_s + H$. Cuando *H* es cero se llega a la remanencia donde $B_r = 4\pi M_r$. Por este motivo la curva *M* vs. *H* se cambia por la de $4\pi M$ vs. *H*, y de esta manera *B*, $4\pi M$ y *H* tienen las mismas unidades. Las unidades de *B* son gauss, las de *H* son Oersted y las de *M* son erg/Oe.cm³ o emu/cm³, luego $4\pi M$ debe estar dado en Oe o G. Cuando el campo aplicado *H* se invierte hasta cuando B = 0 se llega a un valor $-H_c$, pero *M* es aún positivo y toma el valor $|H_c/4\pi|$. Para que M llegue a cero se necesita un campo llamado coercitividad intrínseca H_{ci} . La diferencia entre H_c y H_{ci} se nota claramente en la Figura 1S.

En el SI la curva de *B* vs. *H* se describe por la relación *B* = $\mu_0(M + H)$, luego cuando *M* satura la inducción tiene un valor $B_s = \mu_0(M_s + H)$. Cuando *H* es cero se llega a la remanencia donde $B_r = \mu_0M_r$. Por este motivo en el SI la curva *M* vs. *H* se cambia por la de μ_0M vs. *H*, y de esta manera *B*, μ_0M y μ_0H tienen las mismas unidades. Las unidades de *B* son tesla, las de *H* y *M* son A/m, luego μ_0M y μ_0H deben estar dados en tesla. Cuando el campo aplicado *H* se invierte hasta cuando *B* = 0 se llega a un valor $-H_c$, pero *M* no es cero y toma el valor H_c . Para que M llegue a cero se necesita un campo llamado coercitividad intrínseca H_{ci} .

Dependiendo del valor del campo coercitivo los materiales magnéticos se clasifican en materiales magnéticamente blandos y magnéticamente duros. En la Figura 2 se ilustran los ciclos de histéresis para el caso de un material magnético blando (Izq.) y duro (Der.). Se nota que para el primero, el ciclo es estrecho con bajos valores de H_c (hasta 30 Oe o



Figura 2. Ciclos de histéresis de materiales blandos (Izq.) y duros (Der.).

2400 A/m) y grandes valores de B_s (> 4000 gauss o > 0.4 T), mientras que en el segundo, el ciclo es ancho con grandes valores de H_c (> 12.6 kOe o >10⁶ A/m) y altos valores de B_r y B_s (> 4000 gauss o > 0.4 T). Materiales magnéticos con valores intermedios de H_c son llamados semiduros o semiblandos. Los materiales blandos son ampliamente utilizados en la fabricación de transformadores (Ej. aleaciones Fe-Si o Fe-Ni), los duros en imanes permanentes (Ej. SmCo₅ y Nd₂Fe₁₄B), y los semiduros, con ciclos rectangulares, en memorias magnéticas (Ej. aleaciones Nd-Fe).

b. Campo desmagnetizante

La Figura 2S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1516, (Izq.) ilustra una barra de material ferromagnético, con un eje mucho mayor que los otros dos. La Figura 2S (Der.) ilustra el efecto de aplicar un campo paralelo, H₁, y perpendicular, H₂, al eje mayor.

Se puede notar que se requiere un campo menor para magnetizar la muestra a lo largo del eje mayor. La apariencia de la curva de magnetización de un material no depende solo de las propiedades magnéticas del material, también depende de la forma de la muestra, lo mismo sucede con su susceptibilidad.

Para entender el porqué de este comportamiento, se utiliza una barra inicialmente no imantada (Figura 3S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/361/1517) a la cual se le aplica un campo externo H de izquierda a derecha, produciendo una magnetización M y una inducción magnética B.

Cuando H se retira, el material queda magnetizado en la dirección del campo que fue aplicado, dando lugar al imán o dipolo magnético, pero ahora aparece un campo al interior, entre los polos norte y sur inducidos, contrario al campo que fue aplicado y a la magnetización. Este campo es llamado campo desmagnetizante, H_d . El campo desmagnetizante es proporcional a la magnetización y ellos se relacionan como

$$H_d = -N_d M \tag{2}$$

donde N_d es el factor desmagnetizante, que depende de la geometría del material. Cálculos de N_d para diferentes geometrías y direcciones pueden ser encontrados en las referencias [8, 9]. Este campo hay que tenerlo en cuenta en la ecuación (1), la cual en ausencia de *H* queda de la forma

$$4\pi M = B + H_d (\text{cgs}) \circ \mu_0 M = B + \mu_0 H_d (\text{SI})$$
(3)

Con el concepto de H_d se puede ahora explicar el comportamiento mostrado en la Figura 2S. Cuando el campo se aplica a lo largo del eje mayor de la barra, los polos inducidos están más separados y el campo desmagnetizante es menor que el producido cuando el mismo campo externo se aplica a lo largo del eje menor, porque en este caso los polos estarán más cercanos y el campo desmagnetizante será mayor.

c. Punto de trabajo de un imán permanente

En la Figura 3 se ilustra el comportamiento de un imán permanente en los ciclos de magnetización y desmagnetización hasta alcanzar el campo coercitivo, $-H_c$, pasando por la inducción magnética remanente, B_r . Cuando el campo H se apaga, la inducción del imán no se queda en B_r (y la magnetización en M_r) ya que cuando el campo H se aplicó, el imán se magnetizó y apareció un campo desmagnetizante $-H_d$, contrario a H. Por lo tanto la curva de desmagnetización va hasta el punto P, donde el campo es $-H_d$ y la inducción magnética es B_d . P es conocido como el punto de trabajo.

El punto P y la línea OC o línea de carga, serán diferentes para diferentes materiales, y también para diferentes geometrías del mismo material. Para un mismo material y diferentes formas se pueden obtener diferentes energías almacenadas en el imán. La pendiente de la línea de carga es dada por

$$-\frac{4\pi - N_d}{N_d} [cgs] o - \frac{\mu_0 - N_d}{N_d} [SI]$$
(4)

La Figura 4S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/361/1518, ilustra las curvas hipotéticas de desmagnetización de imanes diferentes 1 y 2, junto con curvas del producto *BH* constantes, cuyos valores se ilustran en el eje horizontal superior. Para el imán 1 su curva de desmagnetización podría tocar una de *BH*, si su valor fuese ~3 MGOe. Para el imán 2 este corte se da aproximadamente en 2 MGOe. En estos puntos de corte se tendrá para cada imán su valor $(BH)_{max}$. El diseñador del IP debe variar la geometría del imán con el fin de que el punto de trabajo, P, de lugar a un $(BH)_{max}$. Las unidades del producto *BH* están dadas en GOe o MGOe [cgs] y en kJ/m³ [SI] y su relación es MGOe/kJ/m³ = 7.96. El valor de *BH* corresponde al área



Figura 3. Curva de magnetización inicial y de desmagnetización de un imán permanente. B_r es la inducción remanente y P es el punto de trabajo.

del rectángulo de base H_d y altura B_d de la Figura 3, o al rectángulo de base H_m y altura B_m de la Figura 1S. Algunos operadores trabajan con el valor de la pendiente de la línea de carga o $B_d/H_d = B_m/H_m$, que es la permeabilidad magnética del material. Estas pendientes y sus valores se ilustran en el eje vertical izquierdo y el horizontal superior. Encontrar sus valores no depende del conocimiento de los valores de N_d .

d. Anisotropía cristalina

En la Figura 5S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1519, se muestran las curvas de magnetización inicial para un cristal simple de Fe (Izq.) y otro de Ni (Der.), para diferentes direcciones dentro del cristal. Se puede notar que para el Fe se alcanza la saturación aplicando menor campo a lo largo de la dirección <100> y con mayor campo a lo largo de la dirección <100> y con mayor campo a lo largo de la <111>. Por esta razón la dirección <100> es llamada dirección fácil y la <111> es la dirección difícil o dura. Para el Ni el eje fácil es el <111> y el duro el <100>. Las seis direcciones equivalentes [100], [010], [001], [T00], [0T0] y [00T], se representan por la notación <100>. Esta propiedad de los materiales es conocida como anisotropía magnética cristalina.

En la Figura 6S, http://www.raccefyn.co/index.php/ raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1520, se muestra una vista esquemática del plano {001} del Fe, inicialmente desmagnetizado, donde los dominios se orientan en las dos direcciones fáciles que se encuentran en este plano, o sea las direcciones [100] y [010] (ver Fig. 6Sa), con un valor de magnetización M_s . Cuando se aplica un campo H en la dirección [110], que forma ángulos de 45° con las direcciones [100] y [010], los dominios con ángulos de 45° con H crecen y los de 135º decrecen (ver Fig. 6Sb). Si el campo aumenta, los dominios de menor ángulo con el campo aumentan de tamaño y los de mayor ángulo disminuyen. Esta tendencia continúa hasta cuando el campo es tal que solamente se tendrán dominios formando ángulos de 45° con el campo (ver Fig. 6Sc). Si el campo H sigue aumentando, se llegará a la situación en la cual todos los dominios apuntan a lo largo del campo y se tendrá un solo dominio o monodominio (ver Fig. 6Sd). En esta situación el Fe alcanzará la magnetización de saturación.

La mayor o menor dificultad para magnetizar un material en una determinada dirección implica una mayor o menor energía para conseguirlo. **Akulov** (1936) en 1936 postuló una expresión para la energía de anisotropía, por unidad de volumen, para cristales cúbicos, cuando la magnetización de saturación M_s forma ángulos α , β y γ con los ejes cristalinos, de la forma

$$E = K_0 + K_1 \left(\alpha_1^2 \alpha_2^2 + \alpha_2^2 \alpha_3^2 + \alpha_3^2 \alpha_1^2 \right) + K_2 \left(\alpha_1^2 \alpha_2^2 \alpha_3^2 \right) + \dots (5)$$

donde $\alpha_1 = \cos \alpha$, $\alpha_2 = \cos \beta$ y $\alpha_3 = \cos \gamma$, son los cosenos directores. K_0 , K_1 , K_2 ,... son constantes que dependen del material y de la temperatura. Están expresadas en erg/cm³ o J/m³. En la Tabla 1, se ilustran los valores de la energía de

anisotropía para diferentes direcciones de la magnetización en un cristal cúbico. Si K_1 y K_2 son positivos (caso del Fe) se nota que la menor energía se obtiene cuando M_s es paralelo a la dirección fácil [100] y mayor en la dirección dura [111]. Para el Ni K_1 y K_2 son negativos y la menor energía se obtiene cuando M_s es paralela a la dirección [111], que será la dirección fácil. La mayor energía se obtiene en la dirección [100] y esta será la dirección dura del Ni.

Medidas experimentales muestran que para el Fe, $K_1 = 4.8 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3 = 480 \text{ kJ/m}^3 \text{ y}$ $K_2 = 0.5 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3 = 50 \text{ kJ/m}^3$. Para el Ni se reportan $K_1 = -0.5 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3 = -50 \text{ kJ/m}^3 \text{ y}$ $K_2 = -0.2 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3 = -20 \text{ kJ/m}^3$.

Para el caso de cristales hexagonales las curvas de magnetización en diferentes direcciones son mostradas en la Figura 7S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1521.

Se puede notar que a lo largo del eje mayor, o eje c, con poco campo se consigue la magnetización de saturación M_s (eje de fácil magnetización), mientras que en un eje basal se necesita mucho más campo para conseguir la saturación (eje de difícil magnetización o eje duro).

Para este tipo de cristales la densidad de energía magnetocristalina propuesta es dada por

$$E = K_0 + K_1 \operatorname{sen}^2 \theta + K_2 \operatorname{sen}^4 \theta + \cdots$$
(6)

Donde θ es el ángulo que la magnetización M_s forma con el eje fácil. Este tipo de cristal se conoce como uniaxial (ver Figura 8S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1522), mientras que el del Fe es triaxial.

Los valores experimentales de las constantes de anisotropía encontrados para el caso del Co son $K_1 = 4.8 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3$ = 480 kJ/m³ y $K_2 = 1.5 \times 10^6 \text{ erg/cm}^3 = 150 \text{ kJ/m}^3$.

e. Anisotropía de forma

La Figura 9S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1523, muestra un material magnético en forma de elipsoide prolata, con eje mayor c y menor a, se sabe que es más fácil magnetizarlo a lo largo del eje c (eje fácil), que a lo largo del eje a (eje duro). Esto se debe a que el campo desmagnetizante es menor a lo largo de c que a lo largo de a. Si la magnetización M forma un

Tabla 1. Valores de energía de anisotropía para un cristal cúbico en diferentes direcciones cristalográficas.

[klm]	α	β	γ	α_1	α2	α,	E
[100]	0	90°	90°	1	0	0	$K_{_{O}}$
[110]	45°	45°	90°	$\sqrt{2/2}$	$\sqrt{2/2}$	0	$K_0 + K_1/4$
[111]	54.74°	54.74°	54.74°	1/√3	$1/\sqrt{3}$	1/√3	$K_0 + K_1/3 + K_2/27$

ángulo θ con el eje mayor *c*, se puede mostrar (**B. D. Cullity** & **C. D. Graham**) que la energía potencial por unidad de volumen es dada por

$$E = \frac{1}{2}M^2 N_c + \frac{1}{2}(N_a - N_c)M^2 sen^2\theta$$
(7)

Donde N_a y N_c son las constantes desmagnetizantes a lo largo de *a* y *c*, respectivamente. La forma de esta expresión es similar a la de la energía de anisotropía propuesta para sistemas uniaxiales, con $K_0 = M^2 N_c/2$ siendo la energía a lo largo del eje fácil y el segundo término, $K_1 = (N_a - N_c)$ $M^{2/2}$, es la energía que hay que darle al sistema para que *M* cambie su orientación desde *c*, hasta formar un ángulo θ con este eje.

Existen otras formas de anisotropía magnética que pueden ser encontradas, tales como la anisotropía por tensión, inducida, de intercambio, etc., pero las principales son las ya mostradas. Para imanes nanoestructurados la tercera también es importante

Materiales para imanes permanentes (B. D. Cullity & C. D. Graham y O'Hanley)

a. Aceros magnéticos

El primer material utilizado como imán permanente fue la piedra imán o la conocida magnetita, originalmente encontrada en Magnesia, Grecia. Presenta H_c de algunas decenas de Oe y B_s entre 0.3 y 0.4 T. Fue usado por los chinos en agujas de brújula, pero hoy en día no tiene aplicaciones como material en bulto, pero si en forma de nanopartículas. Posteriormente fueron utilizados los imanes de aceros de alto carbón, endurecidos por temple, que se usaron durante muchos siglos como agujas de las brújulas. La presencia del C en el Fe lo endurece mecánica y magnéticamente, ya que genera cementita, Fe₃C, que impide el transporte de dislocaciones y de paredes de dominio. El campo coercitivo es de 50 Oe (4 kA/m). Se usó hasta mediados del siglo 19.

A finales del siglo 19 los aceros con W fueron usados para herramientas de corte y aplicaciones estructurales, y en 1885 un acero con 5 % W se usó como imán. Este fue reemplazado, durante la 1ª Guerra Mundial por un acero al Cr más barato, presentando $H_c = 100$ Oe (8 kA/m). En 1917 Honda y Takagi mostraron que un acero con 30-40 % Co, más W y Cr, mostraba $H_c = 230$ Oe, $B_s = 2.4$ T y (HB)_{max} = 1 MGOe. Este continúa siendo el mejor imán hecho de acero en bulto. En 1961 Luborky preparó un imán mediante la sinterización de nanopartículas monodominio alargadas de FeCo, con tamaños entre 10 y 15 nm. Obtuvo coercitividades del orden 2kOe (140 kA/m).

b. Alnico

Es el nombre genérico de una familia de aleaciones con base a Fe, Co, Ni más pequeñas cantidades de Al, Cu y otros elementos. Fe es el elemento mayoritario. En cierta época fueron los imanes más utilizados, pero hoy en día son las ferritas duras y los imanes de tierras raras los que dominan el mercado. Mishima en 1932 encontró que una aleación con 58% Fe, 30% Ni y 12 % Al mostraba un campo coercitivo de 400 Oe (5.7 A/m). Posteriormente se mostró que agregar Co y Cu mejoraba sus propiedades. La numeración del alnico depende de la composición.

Los alnico son duros y frágiles y de granos gruesos cuando se fabrican por colada o sinterización. Si un tratamiento térmico se le hace con las siguientes tres etapas, sus propiedades mejoran:

i) Tratamiento a 1500 °C hasta su homogenización.

ii) Enfriamiento a una rata de 1 °C/s hasta ~500 °C.

iii) Recalentada durante varias horas a 600 °C (Envejecido).

Algunos alnico son enfriados en presencia de campo, aumentando así la coercitividad del material en la dirección del campo. Este tratamiento hace que se precipite una fase ferromagnética, bcc rica en Fe (α), en una matriz débilmente magnéticamente, bcc NiAl (α'), (descomposición espinoidal, ver Figura 10S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1524). Ellas se precipitan como barras alternadas de 300 Å de diámetro. Si se aplica un campo en la etapa de precipitación ellas se orientan a lo largo de la dirección [100] y no en las tres direcciones <100>.

La Figura 11S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1525, muestra una micrografía electrónica del alnico 5 a la cual se le aplicó un campo en la dirección horizontal. Se observa en esta figura que los granos son alargados en la dirección del campo y se tienen granos alternados de la fase ferromagnética y la débilmente magnética. La morfología de los granos da lugar a una anisotropía de forma, responsable del carácter duro de estos imanes.

Una manera de mejorar el carácter duro de estas aleaciones se consigue produciendo una textura cristalográfica con los granos a lo largo de [100]. Esto se obtiene por solidificación direccional con los granos creciendo en la dirección del flujo de calor (ver Figura 12S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1526). Si además se aplica campo en esta dirección, se puede mejorar aún más el carácter duro de la aleación.

La Figura 13S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1527, ilustra curvas de desmagnetización de algunos alnicos. Se puede notar que existe una mejora en el producto $(BH)_{max}$ del alnico 5 cuando se incrementa su anisotropía de forma, pasando de 60 a 80 kJ/m³.

La investigación de los alnicos básicamente terminó cuando fueron descubiertos los imanes de tierras raras.

c. Ferritas de bario y estroncio

Las ferritas duras constituyen el mayor mercado de los IPs y se usan en aplicaciones donde la energía por unidad de peso y costo sea importante. Las ferritas de Ba, BaO.6[Fe₂O₃], de Sr, SrO.6[Fe₂O₃] y de Pb, PbO.6[Fe₂O₃], presentan la estructura magnetoplumbita. Se denotan como BaM, SrM y PbM. Estas ferritas hexagonales o hexaferritas presentan una alta anisotropía cristalina a lo largo del eje fácil *c*, del orden de 3.3×10^6 erg/cm³ o 330 kJ/m³. La magnetización de saturación es baja, pero su alta anisotropía da lugar a altos valores de (*BH*)_{max}, del orden de kJ/m³.

La primera ferrita de Ba comercial se produjo en 1952 por la Philips. Normalmente se produce por mezcla de BaCO₃ (o SrCO₃ o PbCO₃) y Fe₂O₃, seguida de homogenización a 1200 °C (calcinación), hasta obtener la ferrita. Este material se lleva a un molino de bolas para obtener tamaños de partícula del orden de µm, estas partículas presentan formas de placas hexagonales. También se obtienen por solución de Fe₂O₃ y BaO dando lugar a precipitación de placas hexagonales, tal como se observa en la Figura 14S, http://www.raccefyn.co/ index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1528.

La anisotropía de este material es principalmente cristalina, con eje fácil perpendicular al plano hexagonal. A lo largo de este eje se obtiene $H_c \sim 17$ kOe (cgs) 0 1.7 T (SI) para una partícula. Sin embargo la morfología que se obtiene en su fabricación, da lugar a una anisotropía de forma paralela al plano hexagonal, que es perpendicular al eje fácil. Esto reduce el valor de H_c por partícula hasta 12 kOe. Este material es luego prensado en medio húmedo aplicando un campo a lo largo del eje de presión. La microestructura que se obtiene es mostrada en la figura 15S, http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1529. En la Figura 15S (Izq.) se tiene una vista paralela al eje fácil y en la 15S (Der.) perpendicular al eje fácil.

Para mejorar sus características se refina el tamaño de partícula. El valor máximo obtenido para $(BH)_{\rm max}$ es del orden de 3.5MGOe o 28 kJ/m³, y no ha sido mejorado en muchos años.

d. Imanes de tierras raras

Los elementos de tierras raras (TR, número atómico entre 59 y 70) son ferromagnéticos con temperaturas de Curie (T_c) abajo de la temperatura ambiente (T_a) y con gran anisotropía magnética. Cuando se alean con elementos de transición (ET) como Fe, Co o Ni dan compuestos con alta anisotropía, debido a la tierra rara, ya que esta no se modifica apreciablemente con otros elementos (anisotropía de átomo simple).

El primer IP de este tipo fue el YCo₅ descubierto por Strnat and Goffer en 1966, que presentó una constante de anisotropía de 5.5×10^7 erg/cm³ o 5.5×10^3 kJ/m³, por mucho la mayor encontrada en esa época. A partir de allí mucho trabajo se ha realizado en sistemas de TR/ET buscando mejores propiedades (una mayor anisotropía cristalina uniaxial, alta T_c, alto valor de B_s, bajo costo, buenas propiedades mecánicas y baja densidad. Tres familias de IPs tipo TR/ET han sido investigadas: SmCo₅ (mayor K), Sm₂Co₁₇ (mayores flujo magnético y T_c) y Nd₂Fe₁₄B (mayor (BH)_{max}), todas ellas con producto $(BH)_{max}$ muy superior a los mejores alnico y hexaferritas.

d.1 Imanes de Co/TR

Los más importantes IPs con base al sistema SmCo contienen grandes cantidades de Co. En la figura 16S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/361/1530, se muestra el diagrama de fases de equilibrio del sistema SmCo en la región rica en Co. Varias fases estables se pueden encontrar, por eso, dependiendo de la composición y de los tratamientos térmicos y mecánicos, se pueden obtener IPs con una sola fase o con varias de las fases.

Una de las fases que aparece en el diagrama es la del SmCo_5 , o fase1-5, que tiene una estructura hexagonal con eje fácil a lo largo de *c*, y una constante de anisotropía de $7.7 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3 = 7.7 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$. Se obtiene por fusión y colada, luego trituración y molienda hasta obtener tamaños de partícula del orden de 10 µm, cada partícula siendo un monocristal de SmCo_5 . El polvo es alineado en un campo para alinear los cristales con *c* paralelo al campo y luego prensado en seco. Finalmente es sinterizado a más de 1000 °C para producir el IP final.

Para obtener un material con mayor densidad se agrega al polvo antes de sinterizar un compuesto rico en Sm, de tal manera que este se licúe durante la sinterización, llenando los espacios entre partículas. Este proceso es conocido como sinterización en fase líquida (SFL). El tamaño de grano obtenido es el mismo de las partículas antes del proceso de SFL, y como este tamaño es del orden de 10 veces el tamaño de dominio, los granos serán multidominio. Para este tipo de IP se obtiene una curva de magnetización y desmagnetización como la de la Figura 17S, http://www.raccefyn.co/index. php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1531.

Se puede notar que el campo para saturar es mucho menor que H_c , contrario al de la mayoría de los IPs, donde el campo necesario para saturar es mayor que H_c . Esto se debe a que los granos son multidominio y sus paredes de dominio se pueden mover fácilmente en la dirección del campo hasta ser expulsadas y obtener un grano monodominio. Para generar un dominio en dirección contraria se necesita un gran campo.

Los imanes tipo SmCo_5 fueron los primeros en llegar a un producto de energía de 20 MGOe ~ 160 kJ/m³.

Otra de las fases que aparece en el diagrama SmCo es la Sm_2Co_{17} , o fase 2-17, cuya estructura es romboédrica. Se trabajan también compuestos donde el Co es sustituido por Fe, Cu y Zr, lo cual los hace más baratos. Se producen de manera similar a la tipo 1-5, pero con tratamientos adicionales que hacen que la microestructura sea muy fina con camadas de fase 1-5 separando las 2-17. Esta estructura

fina produce un anclaje de las paredes de dominio haciendo que H_c sea alto. La anisotropía magneto cristalina de las fases 2-17 (3-4x10³ kJ/m³) es menor que la de la fase 1-5 (11-20x10³ kJ/m³), pero los valores de M_c y T_c son mayores.

La estructura romboédrica de los compuestos 2-17 permite que se agregue más Fe que en las 1-5. Coercitividades del orden de 800 kA/m (10 kOe) y productos de energía de 340 kJ/m³ (30MGOe) se alcanzan para el compuesto $Sm_2(Co,Fe)_{17}$.

d.2 Imanes intermetálicos con base a Nd₂Fe₁₄B

Como el Fe y el Nd son más baratos que el Co y el Sm, respectivamente, esfuerzos independientes, para producir mejores y más baratos imanes, llevaron a Das & Koon (1981), a Croat (1981) y a Hadjipanayis, Hazelton & Lawless (1983-4), a producir, por diferentes métodos, IPs tipo Nd₂Fe₁₄B o tipo 2-14-1. Comercialmente se produjeron simultáneamente imanes tipo Nd₂Fe₁₄B por Sagawa, Fujimura, Togawa & Matsura (1984) (Sumimoto Special Metals Co.) y Croat, Herbst, Lee & Pinlterton (1984) (General Motors Corp.). Estos imanes presentan una estructura tetraédrica con una gran anisotropía magnetocristalina ($5x10^3$ kJ/m³). El Fe presenta 6 sitios diferentes en esta estructura, el Nd 2 y el B 1. Si se coloca Co en los sitios del Fe se aumenta T_{i} y la estabilidad térmica; y si se reemplaza la TR liviana Nd por la pesada Dy aumenta la coercitividad. Estas combinaciones dan lugar a productos de energía de hasta 50 MGOe (398 kJ/m³) y B_{1} del orden de 1.6 T, debido al gran acople ferromagnético entre el Fe y el Nd. Sus principales desventajas son su baja T_c , del orden de 300 °C y su baja resistencia a la corrosión.

Estas aleaciones pueden producirse por diferentes métodos tales como fundición y tratamientos térmicos para inducir la nanoestructura deseada; enfriamiento rápido para producir

cintas amorfas que luego son tratadas térmicamente para inducir la cristalización de la(s) fase(s) deseada(s), para luego ser pulverizadas y sinterizadas en la forma final del IP; y por aleamiento mecánico. Diferentes tipos de piezas que se pueden producir y que están disponibles en el mercado se ilustran en la Figura 18S, http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1532.

En la producción de algunos IP tipo Nd₂Fe₁₄B actualmente se coloca un exceso de Fe y B y la microestructura que se obtiene, después de los tratamientos térmicos, es compuesta de granos nanométricos de la fase dura 2-14-1 separados por granos nanométricos de fase blanda tipo α -Fe o FeB. Cuando el exceso es de Nd y/o B la nueva fase es no magnética rica en B o Nd. Para el primer caso la fase dura da la alta anisotropía o alto H_c y la blanda una gran M_r .

En la Figura 4, Hadjipanayis (2008), se ilustra cómo ha evolucionado el valor $(BH)_{max}$ (arriba) y la nanoestructura (abajo) de los IPs con base a Nd-Fe-B. Se supone que el imán está en el punto de trabajo con el H_d hacia abajo y $M_{i}(B_{i})$ hacia arriba. En el primer esquema de la izquierda (abajo) se muestra un IP constituido de granos de fase dura Nd₂Fe₁₄B (azul) con orientación cristalina aleatoria (isotrópica) separados por una fase no magnética (rica en Nd y/o B). En este caso $(BH)_{max}$ es del orden de 12 MGOe. En la segunda no existe exceso de elementos no magnéticos y no aparece la fase paramagnética rodeando los granos de la fase dura y estos presentan orientación cristalina al azar pero ahora existe un acople de intercambio ferromagnético entre ellos. Este acople aumenta la magnetización y por ende el producto $(BH)_{max}$ que ahora es del orden de 20 MGOe. La tercera nanoestructura se debe al exceso de Fe o/y B en la composición inicial, dando lugar al aparecimiento de granos blandos de α-Fe y/o Fe₂B (amarillo). Se obtiene entonces un nanocompuesto. Existe acople ferromagnético entre granos



Figura 4. Desarrollo histórico de los IPs nanoestructurados de Nd-Fe-B (Hadjipanayis (2008)).

duros y blandos dando lugar a mayor magnetización, además los granos blandos dan lugar a mayor magnetización que los granos duros. De esta manera se alcanza un $(BH)_{max}$ mayor a 20 MGOe. Finalmente lo que se busca es lo mostrado en el esquema de la derecha donde los granos blandos y duros estén con sus ejes fáciles en la misma dirección (anisotropía) y acoplados ferromagnéticamente para obtener valores de $(BH)_{max}$ del orden de 100 MGOe.

En la Figura 19S, http://www.raccefyn.co/index.php/ raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1533, se muestran las características magnéticas de los imanes nanocompuestos tipo Nd-Fe-B.

El método como se han alcanzado altos valores de $(BH)_{max}$, con el cual se espera obtener un IP nanocompuesto isotrópico con mayores valores de $(BH)_{max}$, es utilizando el método de deformación plástica en caliente (DPC o Die-upseting), el cual se ilustra en la Figura 5 (Izq.).

En la Figura 5 (Der.) se comparan las curvas de desmagnetización obtenidas para imanes de Nd-Fe-B en bulto. Estos imanes se produjeron por melt-spun, cristalización por tratamiento térmico, pulverización y luego sinterización con epoxi (abajo), compresión isotrópica en caliente (medio), y por DPC caliente. Se puede notar que el método DPC da lugar a una mejora del orden de un 50% en las propiedades magnéticas.



Figura 5. Ilustración del proceso de deformación plástica en caliente (Izq.) (**Hadjipanayis** (2008)) y efecto de los proceso de sinterización en la curva de desmagnetización de imanes de Nd-Fe-B (Der.) (**Herbst** (1991)).

En la Tabla 2 se comparan propiedades magnéticas de varios IPs.

En la Figura 6 (Izq.) se ilustra cómo ha evolucionado en los últimos 100 años el valor alcanzado de $(BH)_{max}$. Se puede notar que en este periodo el valor de $(BH)_{max}$ ha aumentado en aproximadamente 100 veces. En la Figura 6 (Der.) se compara la manera como el volumen, para producir un campo de 1000 G a 5 mm de la cara de un polo, ha disminuido en aproximadamente 65 veces, desde el alnico 5-7 al NdFeB.

e. Otros IPs

e.1 Imanes CoPt

Este material presenta valores B_{1} entre 0.2-0.4 T, H_{2} ~340 kA/m (4.3 kOe) y $T_c = 550$ °C. Presenta una red fcc ferromagnética arriba de 820 °C y abajo de esta T, para contenidos de Co entre 35 y 65%, presenta una estructura fcc ordenada con átomos de Pt en la base y la tapa, y átomos de Co en el plano central. Este ordenamiento resulta en una distorsión tetragonal que da lugar a K uniaxial de 5×10^6 J/ m^3 y H de 6 kOe en la dirección [001]. Este valor de Hc no es de la estructura ordenada y si de una mezcla fina de las estructuras ordenada y desordenada. Se cree que la dureza magnética viene del anclaje de las paredes de dominio en las fronteras de grano, esto implica que los granos son monodominios. Este sistema presenta un (BH)_{max} entre 70-95 kJ/m³ (8.5-12 MGOe) y presenta una resistencia a la corrosión mayor que cualquier otro IP metálico. Él juega un rol importante en las películas delgadas de los medios de grabación usados en discos duros.

Los sistemas FePt y FePd también presentan la fase ordenada anisotrópica. Las propiedades magnéticas se mejoran por envejecimiento en campo o por deformación plástica a lo largo del eje [001].

e.2 Imanes MnAl

La Figura 20S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1534, (Izq.) ilustra el diagrama de fases de equilibrio del sistema MnAl. En este diagrama de fase aparece, en la región cercana a la equiatómica, entre

Imán	$\mu_0 M_s(\mathbf{T})$	T_{c} (°C)	$K (MJ/m^3)$	H_c (MA/m)	H_c (MA/m)	(BH) _{max} (MGOe)
				Isotrópico	Anisotrópico	
Ferrita	0.47	723-733	0.34		0.36	4
Alnico 5	1.25	750	0.38		0.07	5.5
Alnico 9	1.12	750	0.41		0.14	10.5
SmCo ₅	1.0	685-700	10	0.8-1	2.9	18-24
Sm ₂ Co ₁₇	1.2-1.4	810-970	3.3	1-1.3	2.4	24-30
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1.6	312	5		1.2-1.6	34-45

Tabla 2. Propiedades magnéticas de algunos IPs (Cullity & Graham (2009)).



Figura 6. Evolución temporal del valor de $(BH)_{max}$ (Izq.), y evolución temporal del volumen del imán para producir un campo de 1000 G a 5 mm de la superficie de un polo (**Jiménez-Villacorta & Lewis** (2014)).

52 y 57% Mn, la fase metastable τ. Esta fase presenta una estructura tetragonal centrada en las caras fct ordenada, Figura 20S (Der.) con átomos de Mn en posiciones (000) y (½ ½ 0) y átomos de Al en posiciones (½ 0 ½) y (0 ½ ½). Esta estructura se denomina en la literatura como tipo L1o y para este caso se obtiene a partir de una transformación martensítica, enfriando rápidamente la aleación desde la fase ε de alta temperatura, que presenta una estructura hexagonal. La fase τ presenta una anisotropía uniaxial a lo largo del eje [001] con $K = 10^6$ J/m³. Al agregar C o B esta fase se estabiliza y aumenta la habilidad de inducir el orden direccional a lo largo del eje fácil. Coercitividades de 2 a 3 kOe y productos (*BH*)_{max} de 64 kJ/m³ (8 MGOe) se han alcanzado para este imán de fase única.

Aplicaciones de los IPs (USGS Mineral resources program, http://minerals.usgs.gov/.)

Algunas aplicaciones donde se utilizan IPs, principalmente del tipo 2-14-1 son:

Categoría	Ejemplos de aplicación
Computadores y automatización de oficina	Discos duros, motores de rotación de CD-ROM* Motores de bobina de voz y pick-up Motores de impresoras y fax
Electrónica de consumo	Videocámaras, reproductores DVD* Altavoces, micrófonos y auriculares Celulares
Accesorios	Motores de accesorios domésticos y aires acondicionados Bombas de agua Sistemas de seguridad
Automatización en fábricas	Acoplamientos magnéticos y cojinetes Zapatillas Motores, servomotores y generadores
Industria médica	Imágenes por resonancia magnética Instrumentos quirúrgicos e implantes médicos
Automoción y transporte	Motores de encendido y motores dc sin escobillas Ciclas eléctricas y vehículos híbridos y eléctricos* Bombas de combustible eléctricas

Energías alternativas	Sistemas de potencia de viento*, olas y mareas Sistemas de generación de potencia Sistemas de almacenamiento de energía
Militar	Armas, proyectiles de precisión guiados Vehículos, motos acuáticas, aviones Sistemas de comunicación, radares, satélites

*Presentarán gran crecimiento en la próxima década

Los IPs se pueden clasificar, de acuerdo a la función principal que desempeñen en una determinada aplicación, como:

- Transformar energía eléctrica en mecánica (motores, relés, altoparlantes, actuadores, sistemas micro electromecánicos (MEMS), etc.)
- Transformar energía mecánica en eléctrica (micrófonos, generadores, alternadores)
- Atracción o repulsión magnética para realizar trabajo (separadores, dispositivos de acoplamiento de rodamientos, unidades de torsión)
- Guía y control de carga eléctrica, plasmas y haces de electrones o iones)
- Almacenamiento de información.

Futuro

Al final de la década de los 90 la diferencia entre los precios de las materias primas (TRs) y de venta de IPs se hizo estrecha, y muchas de las empresas productoras fueron vendidas o se trasladaron a China (donde se produce ~ 95% de las TRs para IPs). Hoy en día para escoger los materiales para elaborar IPs se hace un balance entre precio y rendimiento. Las hexaferritas son más baratas v livianas que los imanes tipo NdFeB v por eso abarcan el 85% en peso del mercado global, sin embargo para pequeñas aplicaciones los NdFeB constituyen el 50% de este mercado. La proyección es que el mercado de los de NdFeB crecerá. Sin embargo desde el 2010 los precios del Nd han aumentado y presentaron un máximo del 800% en el 2012, y se cree que la demanda aumentará en un 200%. Además a partir del 2009 China ha restringido la exportación de TRs, dejando la mayoría de la producción para el consumo interno. Esta situación ha creado la llamada crisis de las TRs.

En este contexto existe la necesidad de producir imanes con alto producto de energía, libres de TRs. Por eso actualmente se investigan 6 nuevos tipos de materiales magnéticos agrupados en dos categorías:

Categoría I: Desarrollar IPs nanocompuestos con: *i*) anisotropía de intercambio ferromagnético (Exchange spring magnets) y *ii*) anisotropía de intercambio anti-ferromagnético (Exchange biased magnets).

Categoría II: Desarrollar materiales magnéticos con estructura cristalina que posea alta anisotropía: *iii*) α'' -Fe₁₆N₂; *iv*) FeNi tipo L10; *v*) MnAl(C,B) tipo L10; *y vi*) nanofases Co₃C/Co₂C.

Categoría I

La Figura 7 muestra los ciclos de histéresis que se obtienen para sistemas nanocompuestos del tipo i (Izq.) con granos ferromagnéticos de fase dura y blanda directamente acoplados, y de tipo *ii* (Der.) con granos ferromagnético y antiferromagnético directamente acoplados. En la parte superior de cada figura se muestra el comportamiento de las estructuras de espín en el cuadrante de desmagnetización de cada sistema. El ejemplo típico de sistemas *i* es el de los imanes de Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe o Fe₂B y de sistemas *ii* es el de Co/CoO. Se buscan sistemas magnéticos que puedan formar imanes permanentes nano-compuestos de estos dos tipos, libres de TRs. En los imanes del tipo i la fase dura aporta la anisotropía y la alta H y la blanda (y en menor grado la dura) aportan el alto $B_{1}(M)$, mientras que en los imanes de tipo ii el acople de intercambio hace que el ciclo se desplace a la izquierda, aumentando el H_{c} , y la fase ferromagnética aporta el $B_{\mu}(M_{\mu})$. En este tipo de material la fase antiferomagnética no aporta a la magnetización.

Categoría II

Tipo *iii*) Martensita ordenada y nitrogenada α''-Fe₁₆N₂

A mediados de los 90 se desató gran actividad para tratar de explicar y comprobar el alto valor del momento magnético del Fe en el compuesto α'' -Fe₁₆N₂ (del orden de 3.2 μ_B , cerca del 50% más que el del Fe puro que es 2.2 $\mu_{\rm p}$). Este fue reportado originalmente en forma de película por Kim & Takahashi (1972). Fue comprobado por Takahashi, Mitsuoka, Komuro & Sugita (1993) cuando se obtuvieron martensita ordenada. El material se obtuvo en bulto por templado de la fase austenita nitrogenada y-FeN, dando lugar a una martensita nitrogenada desordenada α' -FeN. Posteriormente fue tratada a baja temperatura, entre 127 y 202 °C, para así obtener la fase martensita nitrogenada ordenada α'' -Fe₁₆N₂ Ha sido difícil obtener esta fase en forma pura, pero en el 2011 http://energy.gov/sites/prod/ files/DOE CMS2011 FINAL Full.pdf se reportó esta fase, altamente orientada, reproducible, con un 91% de pureza, y con magnetización mayor que la del Fe. Su estructura es tetragonal, pero aún no se consigue una anisotropía suficiente para considerarse lo suficientemente dura.

Tipo L10 iv) FeNi y v) MnAl

La mayoría de las aleaciones binarias de metales de transición presentan normalmente estructuras cúbicas magnéticas con baja anisotropía. Algunas pocas presentan la estructura tipo L1o, que es tetragonal ordenada con anisotropía uniaxial. Entre ellas están las aleaciones FePt y FePd que presentan alta magnetización y constante de anisotropía cristalina, con valores reportados de $(BH)_{\rm max}$ del orden de 20 MGOe (157 kJ/m³), cuando se producen nanocompuestos con base en ellas. Debido a los altos costos del Pt y el Pd, solamente se utilizan en producir películas delgadas para grabado magnético y no para aplicaciones en bulto.



Figura 7. Comportamiento de la desmagnetización (2º cuadrante) de sistemas de fases dura-blanda (Izq.) y de fases ferro-antiferro (Der.) y sus correspondientes ciclos de histéresis (Lewis & Jiménez-Villacorta).

Como se dijo anteriormente la fase L1o se obtiene también para el caso del sistema MnAl, por templado desde la fase hexagonal ε , de alta temperatura. Se reportan en la literatura (McCurrie, Rickman, Dunk & Hawkridge (1978) y Fazakas, Varga & Mazaleyrat (2007)) aleaciones FeMn y FeMn(C) producidas por melt-spinning y luego de tratamientos térmicos adecuados con valores de H_c entre 1500 y 2000 Oe y productos (BH)_{max} entre 4 y 7 MGOe (37 y 56 kJ/m³) (Hoydick, Palmiere & Soffa (1997) y Zeng, Baker, Cui & Yan (2007). Por molienda mecánica se ha logrado reducir el tamaño de partícula de aleaciones FeMn(C) para obtener valores de H_c de hasta 4000 Oe (Zeng, Baker & Yan (2006). Este sistema es promisorio pero no alcanza todavía las características de las hexaferritas o los IPs de TRs.

Para caso del sistema FeNi la fase L1o se ha obtenido por bombardeo neutrónico de la fase equiatómica FeNi con estructura fcc desordenada, también llamada A1, donde los átomos tienen la misma probabilidad de encontrase en cualquier sitio. Para el sistema FeNi esta fase recibe el nombre de taenita y naturalmente se encuentra en meteoritos metálicos. En este tema todavía no se ha avanzado mucho por las grandes dificultades de obtener la fase L1o. Para el caso de meteoritos esta fase se ha encontrado pero se sabe que la tasa de enfriamiento esta entre 0.2 a 2000 K/año.

Tipo vi) Nanofases Co₃C/Co₂C

Recientemente se reportó que carburos de Co, sintetizados por el método químico de reducción de poliol, presentan H_c mayores que 3.4 kOe y $(BH)_{max}$ mayores de 20 kJ/m³ (2.5 MGOe) (Harris, Chen, Yang, Yoon, Chen, Geiler, Gao, Chinnasamy, Lewis, Vittoria, Carpenter, Carroll, Goswami, Willard, Kurihara, Gjoka & Kalogirou (2010). Este material es compuesto de las nanofases Co₂C

y Co₂C con morfología acicular y con T_c de 237 °C. Los altos valores de H_c pueden deberse a la interacción dipolar, la anisotropía de forma y posiblemente a la anisotropía de intercambio. El mejoramiento de estas propiedades y el entendimiento de los resultados es todavía un reto.

Finalmente vale la pena mencionar que el Grupo de Metalurgia Física y Teoría de Transiciones de Fase (GMTF) de la Universidad del Valle ha venido trabajando en aleaciones magnéticas blandas tipo FeAl (Pérez Alcázar & Galvão da Silva (1987)), FeCo (Jiménez, Vélez, Zamora & Pérez (2012)), FeNi (Restrepo, Pérez Alcázar & Bohórquez (1997)), FeSi (Piamba & Pérez Alcázar (2015)) y FeMnAl (Zamora, Pérez Alcázar, Bohórquez, Marco & González (1997) y González, Pérez Alcázar, Zamora, Tabares & Greneche (2002)). En el sistema ternario se han publicado diagramas de fase magnéticos experimentales que han sido comparados con los calculados teóricamente, obtenidos utilizando modelos de Ising y Heisemberg, usando técnicas estadísticas como el de la desigualdad de Bogoliuvob, los Grupos de Renormalización Campo Medio y el Método Monte Carlo. A partir de 1988 el GMTF incursionó en el estudio de IPs tipo Nd-Fe-B, estudiando el efecto del Nb, el Co y el Ni en sus propiedades magnéticas y estructurales. Con la aprobación a finales de 2015, del proyecto INAPEM (International Network on Applications of PErmanent Magnets) por parte de la Comunidad Económica Europea, el GMTF se encuentra ahora trabajando junto con colegas de España, Alemania, Grecia y Estados Unidos, en IPs tipo MnAl y tipo TRFe₁₂ (1-12).

Conclusión

En el estudio de IPs se buscan materiales magnéticos que presenten una nanoestructura compuesta de dos fases con acople ferromagnético: una fase dura con alta coercitividad, cuyo origen sea por la alta anisotropía magnética de su estructura cristalina o a la anisotropía de forma de sus granos; y otra fase blanda, con alta magnetización de saturación. Se busca además que los materiales que den lugar a estas dos fases sean de bajo costo, o sea que no contengan TRs o que la cantidad de estas sean muy bajas.

Información suplementaria

Figura 1S. Esquema representativo de los semiciclos de histéresis *B* vs. *H* (roja) y *M* vs. *H* (verde) (**G. Hadjipanayis** (2008)). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1515

Figura 2S. Barra magnética sometida a campos paralelo y perpendicular al eje mayor (Izq.) y sus curvas de magnetización vs. campo aplicado (Der.). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1516

Figura 3S. Campos de una barra magnetizada sin campo aplicado, (a) líneas de *H*, y (b) líneas de *B*. Los vectores de la mitad muestran las direcciones de *B*, H_d y *M* en el centro del imán. http://www. raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 361/1517

Figura 4S. Curvas de desmagnetización de los imanes 1 y 2, junto con diferentes curvas de *BH* constante y pendientes o permeabilidades. http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/361/1518

Figura 5S. Curvas de magnetización para (Izq.) hierro y (Der.) níquel. http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/361/1519

Figura 6S. Estructura de dominios del Fe en el plano {100}. Se aplica un campo H en la dirección [110]. http://www.raccefyn.co/ index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1520

Figura 7S. Curvas de magnetización para el cobalto. http:// www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 361/1521

Figura 8S. Estructura de dominios de un sistema uniaxial. http:// www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 361/1522 **Figura 9S.** Material en forma de elipsoide prolata. http://www. raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 361/1523

Figura 10S. Diagrama de fase seudobinario Fe-NiAl (**De Vos** (1969)). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/361/1524

Figura 11S. Micrografía electrónica de un alnico enfriado en un campo horizontal (50.000X) (**McCurrie** (1982)). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 361/1525

Figura 12S. Solidificación direccional de alnico a lo largo de [100]. http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/361/1526

Figura 13S. Curvas de B-H para algunos alnico anisotrópicos seleccionados; los productos (BH)_{max} se determinan de las hipérbolas a trazos, cada una con BH constante (**McCurrie** (1982)). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 361/1527

Figura 14S. Láminas hexagonales de hexaferrita de Ba obtenidas por precipitación (**O'Handley**). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1528

Figura 15S. Micrografias de hexaferrita de Ba sinterizada, (Izq.) vista a lo largo del eje fácil, y (Der.) vista perpendicular al eje fácil (**Smith y Wijn** (1959)). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1529

Figura 16S. Diagrama de fase de equilibrio del sistema SmCo en la región rica en Co (**Den Broder & Buschow** (1977)). http:// www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 361/1530 **Figura 17S.** Curva esquemática de magnetización y desmagnetización del SmCo₅. http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1531

Figura 18S. Diferentes tipos de IPs para pequeñas aplicaciones: imanes de hexaferritas (Izq.), imanes de Nd₂Fe₁₄B (Cent.), e imanes de alnico y cerámicos. http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/361/1532

Figura 19S. Esquema de las características de los imanes nanocompuestos: acople entre fases duras y blandas cuando se invierte

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Cullity B.D. & Graham C.D. 2009. "Introduction to magnetic materials", Second Edition, a John Wiley & Sons Publishing.
- **O'Handley R.C.**, 2000. "Modern magnetic materials: Principles and Applications", John Wiley & Sons Publishing.
- Jimenez-Villacorta F. & Lewis L.H. 2014. "Advanced Permanent Magnetic Materials" en Nanomagnetism, Edition: http:// www.onecentralpress.com/ nanomagnetism/, Chapter: 7, Publisher: OCP Publishing Group. USGS Mineral resources program, http://minerals.usgs.gov/.
- Lewis L.H. & Jiménez-Villacorta F. 2011. "Perspectives on Permanent Magnetic Materials for Energy Conversion and Power Generation", Metal. Mat. Trans. A, 44A, S1-S20. (https://www.google.com.co/search?ciclos+de+histéresis).
- Hadjipanayis G. 2008. "Novel Materials for High Energy and Power Density", University of Delaware, Energy Institute Symposium, March 17, Newark, DE.
- Stoner E.C. 1945. "The demagnetizing factor for ellipsoids", Phil. Mag., 36: 803-821.
- **Osborn, J. A.** 1945. "Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid", Phys. Rev., **67:** 351-357.
- Akulov, N. 1936. "Zur Quantentheorie der Temperaturabhangigkeit der Magnetisie-rungskurve", Z. Phys. **100**: 197-202.
- **De Vos K.J.**, 1969. "Magnetism and Metallurgy", Vol. 2, Academic Press.
- McCurrie R.A. 1982. "Ferromagnetic Materials", Vol. 3, E. P. Wohlfarth, ed., North Holland, Amsterdam, p.107.
- Smith J. & Wijn H.P.J. 1959. "Ferrites", Wiley, New York.
- den Broder F.J.A. & Buschow K.H.J. 1977, "Coercive force and stability of SmCo₅ and GdCo₅", J. Less-Common Met. 29: 65-71.
- **Das B.N. & Koon N.C.** 1983, "Correlation between microstructure and coercivity of amorphous (Fe_{0.82}B_{0.18})_{0.90}Tb_{0.05}La_{0.05} alloy ribbons", Met. Trans. **14A:** 953-961.
- **Croat J.J.** 1981, "Observation of large room-temperature coercivity in melt-spun Nd_{0.4}Fe_{0.6}", Appl. Phys. Lett. **39**:

el campo (Izq.), ciclos de histéresis de las fases blanda y dura (Cent.), y ciclo de histéresis del material (Der.) (**Hadjipanayis** (2008)). http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/361/1533

Figura 20S. Diagrama de fases de equilibrio del sistema MnAl (Izq.) y estructura ordenada fct de la fase τ (estructura tipo L1₀) (**Lewis & Jiménez-Villacorta**). http://www.raccefyn.co/index. php/raccefyn/article/downloadSuppFile/361/1534

357-358; 1981, "Crystallization and magnetic properties of melt-spun neodymium-iron alloys", J. Magn. Magn. Mater. **24:** 125-131.

- Hadjipanayis G., Hazelton R.C., & Lawless K.R. 1983, "New iron-rare-earth based permanent magnet materials", Appl. Phys. Lett. 43: 797-798; 1984, "Cobalt-free permanent magnet materials based on iron-rare-earth alloys (invited)", J. Appl. Phys. 55: 2073-2077.
- Sagawa M., Fujimura S., Togawa M., & Matsura Y., 1984 "New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe (invited)", J. Appl. Phys. 55: 2083-2087.
- Croat J.J., Herbst J.F., Lee R.W., & Pinlterton F.E. 1984, "Pr-Fe and Nd-Fe-based materials: A new class of highperformance permanent magnets (invited)", J. Appl. Phys. 55: 2078-2082.
- **Herbst J.F.**, 1991. "R₂Fe₁₄B materials: Intrinsic properties and technological aspects", Rev. Mod. Phys. **63**: 819-898.
- Kim T.K. & Takahashi M. 1972. "New Magnetic Material Having Ultrahigh Magnetic Moment", Appl. Phys. Lett., 20: 492-494.
- **Takahashi H., Mitsuoka K., Komuro M., & Sugita Y.** 1993. J. Appl. Phys., **73:** 6060-6062.
- Conference on Critical Materials for a Clean Energy Future, October 4-5, 2011, Workshops hosted by the U.S. Department of Energy, Washington, DC, http://energy.gov/ sites/prod/files/DOE CMS2011 FINAL Full.pdf.
- McCurrie R.A., Rickman J., Dunk P., & Hawkridge D.G. 1978. "Dependence of the permanent magnet properties of Mn₅₅Al₄₅ on particle size", IEEE Trans. Magn. **14:** 682-684.
- Fazakas E., Varga L.K., & Mazaleyrat F. 2007. "Preparation of nanocrystalline Mn–Al–C magnets by melt spinning and subsequent heat treatments", J. Alloy. Compd. 434-435: 611-613.
- Hoydick D.P., Palmiere E.J., & Soffa W.A. 1997. "Microstructural development in MnAl-base permanent magnet materials: New perspectives", J. Appl. Phys. 81: 5624-5626.
- Zeng Q., Baker I., Cui J.B., & Yan Z.C. 2007. "Structural and magnetic properties of nanostructured Mn–Al–C magnetic materials", J. Magn. Magn. Mater. 308: 214-216.
- Zeng Q., Baker I., & Yan Z. 2006. "Nanostructured Mn–Al permanent magnets produced by mechanical milling", J. Appl. Phys. 99: 08E902.

- Harris V.G., Chen Y., Yang A., Yoon S., Chen Z., Geiler A.L., Gao J., Chinnasamy C.N., Lewis L.H., Vittoria C., Carpenter E.E., Carroll K.J., Goswami R., Willard M.A., Kurihara L., Gjoka M., & Kalogirou O. 2010. "High coercivity cobalt carbide nanoparticles processed via polyol reaction: a new permanent magnet material", J. Phys. D: Appl. Phys. 43: 165003.
- **Pérez Alcázar G.A. & Galvão da Silva E.**, 1987. "Mossbauer effect study of magnetic properties of $Fe_{1-q}Al_q$, 0 < q < 0.5, alloys in the disordered phase", J. Phys. F: Met. Phys. **17**: 2323-2335.
- Piamba J. & Pérez Alcázar G.A. 2015. "Effect of disorder on the structural and magnetic properties of the Fe₅₀Si₅₀ nanostructured system", J. Alloys Comps. 643: S297-S301.
- Jiménez Juana M., Vélez Germán Y., Zamora Ligia E., & Pérez Germán A. 2012. "Estudio de las propiedades magnéticas

y estructurales de aleaciones $Nd_{16}Fe_{76-x}Ni_{x}B_{8}$ con bajos contenidos de Ni", Momento Rev. Fís. UNal. **44:** 11-20.

- Restrepo J., Pérez Alcázar G.A., & Bohórquez A. 1997.
 "Description in a local model of the magnetic field distributions of Fe_{12-x}Ni_x disordered alloys", J. Appl. Phys. 81 (8): 4101-4103.
- Zamora L.E., Pérez Alcázar G.A., Bohórquez A., Marco J.F., & González J.M. 1997. "Magnetic properties of the Fe_xMn_{0.70-x}Al_{0.30} (0.40<x<0.58) alloy series", J. Appl. Phys. 82 (12): 6165-6169.
- González Claudia, Pérez Alcázar Germán A., Zamora Ligia E., Tabares Jesús A., & Greneche Jean-Marc, 2002. "Magnetic properties of the $Fe_xMn_{0.600-x}Al_{0.400}$, $0.200 \le x \le 0.600$, disordered alloy series", J. Phys.: Condens. Matter 14: 6531-6542.

Artículo de posesión

Ciencias químicas

Las chalconas y su uso como precursores en la síntesis de compuestos heterocíclicos nitrogenados

Braulio Insuasty-Obando

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 2 de diciembre de 2015

Resumen

La síntesis de nuevos compuestos con posible actividad biológica es un gran reto de la investigación en química orgánica y medicinal y es de gran impacto debido a las posibilidades de desarrollo de nuevas alternativas terapéuticas para el tratamiento de diversos tipos de enfermedades. En este documento se presenta un resumen del trabajo investigativo realizado por el profesor Braulio Insuasty Obando y sus colaboradores en los últimos años en la línea de investigación de síntesis de compuestos heterocíclicos nitrogenados de 5, 6 y 7 miembros (pirazolinas, piridinas y diazepinas) con posible actividad biológica a partir de 1,3-difenil-2-propen-1-onas (chalconas) y sus análogos. La preparación y caracterización de los nuevos compuestos se realizó en el Grupo de Investigación de Compuestos Heterocíclicos de la Universidad del Valle. Para llevar a cabo las reacciones de síntesis, además de las fuentes de energía convencionales (calentamiento a reflujo) se utilizaron fuentes no convencionales como la radiación de microondas, ultrasonido. Algunas reacciones se llevaron a cabo utilizando metodologías amigables con el medio ambiente como: reacciones libres de disolvente y reacciones multicomponentes. El uso de estas metodologías sintéticas nos permite realizar reacciones más limpias, en menor tiempo y con mejores rendimientos. Los compuestos sintetizados se caracterizaron usando técnicas espectroscópicas como FT-IR, RMN-1D y 2D, espectrometría de masas, análisis elemental y difracción de rayos X en algunos casos. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: orto-diaminas, chalconas, pirazolinas, piridinas, diazepinas, actividad biológica.

Chalcones and their use as precursors in the synthesis of nitrogen-containing heterocyclic compounds

Abstract

The synthesis of new compounds with potential biological activity is a major challenge for research in organic and medicinal and is of great impact due to the potential development of new therapies for the treatment of various types of diseases. This document is a summary of the research conducted by Professor Braulio Insuasty Obando and his group in recent years in the topic of synthesis of 5, 6 and 7 members nitrogen-containing heterocyclic compounds (pyrazolines, pyridines and diazepines) with potential biological activity starting from 1,3-diphenyl-2-propen-1-ones (chalcones) and its analogues. The preparation and characterization of the new compounds was conducted in the Grupo de Investigación de Compuestos Heterocíclicos of the Universidad del Valle. To carry out the synthesis reactions, besides conventional energy sources (refluxing) unconventional sources were used such as microwave irradiation and ultrasound. Some reactions were carried out using environmental friendly methods as solvent-free reactions and multicomponent reactions. Use of these synthetic methodologies allows making cleaner reactions, in less time and with better yields. The synthesized compounds were characterized using spectroscopic techniques such as FT-IR, 1D and 2D NMR, mass spectrometry, elemental analysis and X-ray diffraction in some cases. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Ortho-diamines, chalcones, pyrazolines, pyridines, diazepines, biological activity.

Introducción

Las chalconas **1** son cetonas aromáticas α , β -insaturadas de origen natural o sintético (Figura 1), denominadas también como bencilidenacetofenonas, estiril-fenil-cetonas,

benzalacetofenonas, diarilpropenonas o 1,3-difenil-2-propen-1-onas según la IUPAC.

Las *orto*-hidroxichalconas **2** (Figura 1S, http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1471),

son precursores para la síntesis de flavonas **3**, pigmentos naturales ampliamente difundidos. (**Awad, El-Neweihy y Selim, 1960**).

Algunas chalconas presentan actividad antimalárica, antileishmaniasis, antituberculosa, antifúngica, antibacterial y antitumoral. (**Parvesh, Amit y Vipan**, 2014).

Las chalconas son compuestos de una gran reactividad debido a la presencia de dos centros electrofílicos, los cuales pueden actuar como una sola unidad o de manera independiente lo que permite para estos sistemas el ataque de nucleófilos y la posibilidad de sufrir una adición 1,2-(adición directa) (**A**) o 1,4- (adición conjugada) (**B**), (Figura 2S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1472).

El comportamiento químico de las chalconas es similar al de los compuestos 1,3-dicarbonílicos, RCOCH₂COR', los cuales se caracterizan por presentar dos centros electrofílicos. La diferencia entre estos últimos y las chalconas se considera en la diferencia de reactividad de los dos centros. En el caso de los compuestos 1,3-dicarbonílicos debido a la poca diferencia de sus centros reactivos, en la reacción de ciclocondensación con dinucleófilos, se pueden obtener mezclas de productos, en muchos casos difíciles de separar por su similitud en propiedades. Una de las ventajas de utilizar las chalconas en este tipo de reacciones es la formación en la mayoría de casos de un solo producto y otra ventaja adicional es que su uso nos permite obtener sistemas parcialmente hidrogenados a diferencia del caso de los compuestos 1,3-dicarbonílicos.

La propiedad anteriormente mencionada, es muy útil para la construcción de sistemas heterocíclicos de 5, 6 y 7 miembros, por ejemplo, pirazolinas, isoxazoles, piridinas, pirimidinas y diazepinas (Figura 2).

Estos compuestos heterocíclicos presentan un gran espectro de actividad biológica como: antibacterial, antifúngica, antitumoral, antimalárica, antiviral, antiinflamatoria, antitubercular, analgésica, antioxidante y antipsicótica. (Mohamed, Abdelrahman, y Ahmad, 2012) (Anand y Singh, 2014) (Wenglowsky, 2013) (Ramajayam, Girdhar, y Yadav, 2007).

Síntesis de chalconas y análogos

Aunque existen varios métodos para la síntesis de chalconas, tal vez el método más simple y versátil es mediante la condensación de Claisen-Schmidt entre derivados de la acetofenona y benzaldehídos, bien puede ser en medio básico o ácido. (**Kostanecki y Tambor**, 1899). Este método permite introducir una gran variedad de sustituyentes en los anillos

Correspondencia:



Figura 1. Estructura general de las chalconas.



Figura 2. Obtención de sistemas heterocíclicos de 5 (4), 6 (5) y 7 miembros (6) a partir de sistemas carbonílicos α , β -insaturados.

de las chalconas y conlleva a la formación del producto de configuración *E* (Figura 3S, http://www.raccefyn.co/index. php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1473).

Insuasty et al. (2015) reportaron la síntesis de una nueva serie de chalconas **9a-f** a partir del aldehído derivado de la cafeína **7** y acetofenonas sustituidas **8a-f**. Los compuestos **9b** y **9e** mostraron remarcable actividad antiprotozoaria contra *Leishmania panamensis* con inhibición del crecimiento de 88.3 ± 1.5 y $82.6 \pm 2.2\%$ respectivamente, a 20 µg/mL. Los ensayos *in vitro* contra *Trypanozoma cruzi* mostraron que la chalcona **9f** fue considerada especialmente activa con una inhibición del crecimiento de $9.7 \pm 1.5\%$, para una muy baja concentración de 1,0 µg/mL (Figura 3).

Con el objetivo de obtener los compuestos carbonílicos α , β insaturados (chalconas **13/14**) como materiales de partida para la síntesis de 2-pirazolinas, se llevó a cabo una condensación de Claisen-Schmidt entre las cetonas **10/11** con diferentes aldehídos aromáticos **12**, lo cual condujo a la obtención de las chalconas **13/14** con buenos rendimientos (Figura 4S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1474). (**Insuasty,** *et al.*, 2013a).

Nuevas (*E*)-1-aril-3-(3-aril-1-fenil-1*H*-pirazol-4-il)-2-propen-1-onas **17/18** fueron sintetizadas por medio de una reacción de Claisen-Schmidt entre 3-aril-1-fenilpirazol-

Braulio Insuasty-Obando, braulio.insuasty@correounivalle.edu.co Recibido: 12 de noviembre de 2015 Aceptado: 23 de mayo de 2016



Figura 3. Síntesis de una nueva serie de chalconas 9a-f a partir del aldehído derivado de la cafeína 7 y acetofenonas sustituidas 8a-f.

4-carboxaldehídos **15/16** con diversos derivados de acetofenona **8a-h** (Figura 5S, http://www.raccefyn.co/index.php/ raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1475). El compuesto **17c** mostró una remarcable actividad contra las líneas celulares de leucemia (K-562 y SR), cáncer renal (UO-31) y cáncer de pulmón de células no pequeñas (HOP-92), con los valores más importantes de GI_{50} (GI_{50} es la concentración en la cual se logra una inhibición del 50% de la proliferación de células tumorales) en un rango entre 0.04 a 11.4 µM, para los ensayos *in vitro*. (**Insuasty, et al.,** 2010a).

Los derivados de tipo bis-chalconas **21** fueron obtenidos por medio de una reacción de Claisen-Schmidt tratando las dicetonas **19/20** con aldehídos aromáticos **12** en etanol con cantidades catalíticas de hidróxido de sodio. Todas las bis-chalconas fueron obtenidas con buenos rendimientos (Figura 6S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/309/1476). (**Insuasty, et al.,** 2008a).

De modo similar, se logró la obtención de metilen-bischalconas **23a-e** partiendo de acetofenonas sustituidas **8** y 5,5'-metilen-bis-salicilaldehído **22** (Figura 7S, http://www. raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 309/1477). (**Insuasty**, *et al.*, 2011).

Nuevos derivados hetaril- y alquilidenrodaninas 26a-d, **26e**, y **27a-d**, compuestos carbonílicos α,β -insaturados, fueron preparados a partir de aldehídos heterocíclicos 24ad o acetaldehído 24e (Figura 8S, http://www.raccefyn.co/ index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1478). El tratamiento de los derivados 26a-d y 26e con piperidina o morfolina en THF a reflujo, produjo (Z)-5-(hetarilmetiliden)-2-(piperidin-1-il)tiazol-4-(5H)-onas y 2-morfolinotiazol-4-(5H)-onas 28a-d, 29a-d, y (Z)-5-etiliden-2-morfolinotiazol-4-(5H)-ona (28e), respectivamente, con buenos rendimientos. Varios de esos compuestos fueron evaluados en 60 líneas celulares tumorales humanas diferentes. El compuesto 26c mostró alta actividad antitumoral contra HOP-92 (Cáncer de pulmón de células no pequeñas), la cual fue la línea más sensible, con GI_{50} = 0,62 µM y LC₅₀ > 100 µM (LC₅₀ es la concentración en la cual ocurre la muerte del 50% de células normales) de los ensayos *in vitro*. La actividad antifúngica *in vitro* de los compuestos fue determinada usando 10 cepas fúngicas (*Candida albicans*; *Saccharomyces cerevisiae*; *Cryptococcus neoformans*; *Aspergillus niger*; *Aspergillus fumigatus*; *Aspergillus flavus*; *Microsporum gypseum*; *Trichophyton rubrum*; *Trychophyton mentagrophyte*). El compuesto **26e** mostró actividad contra todas las cepas probadas, pero mostró alta actividad contra la levadura de cerveza *Saccharomyces cerevisiae* (MIC (concentración mínima inhibitoria) 3,9 µg/mL). (**Insuasty,** *et al.*, 2013b).

La síntesis asistida por microondas de nuevas (*Z*)-5arilidenrodaninas **30a-i** (Figura 9S, http://www.raccefyn.co/ index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1479), bajo condiciones libres de disolvente se llevó a cabo y su actividad antifúngica *in vitro* fue evaluada siguiendo el estándar CLSI (anteriormente NCCLS) contra un panel de hongos estandarizado y otro patogénico clínicamente oportunista. Un análisis de la relación estructura-actividad (SAR) junto con estudios computacionales mostraron que los compuestos más activos (rodaninas sustituidas con F y CF₃) poseen altos valores de log P y baja polarizabilidad. Ensayos basados en el mecanismo sugieren que los compuestos activos no se unirían al ergosterol ni producirían un daño a la membrana fúngica. (**Sortino** *et al.*, 2007).

Síntesis de pirazolinas a partir de chalconas

Los compuestos derivados del anillo de pirazol, parcialmente saturados con un doble enlace en el anillo se conocen como pirazolinas, y existen tres formas diferentes, dependiendo de la posición del doble enlace (Figura 10S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1480).

Para la síntesis de las 2-pirazolinas, se han reportado varios métodos en la literatura. Sin embargo, la condensación de chalconas sustituidas con derivados de hidrazina es uno de los métodos más populares para la preparación de estos compuestos (Figura 4).

El tratamiento de los compuestos **9a-f** con hidrato de hidrazina condujo a las pirazolinas **33a-f** y su posterior reacción con anhídrido acético o ácido fórmico produjo las correspondientes pirazolinas *N*-sustituidas **34a-f** y **35a-f** respectivamente. En el estudio de actividad *in vitro* contra *Plasmodium falciparum*, la pirazolina **33a** mostró un porcentaje destacable de inhibición de crecimiento de 85.2 \pm 5.4%. Los compuestos **34c** y **34f** mostraron remarcable actividad contra *Leishmania panamensis* con inhibición del crecimiento de 82.8 \pm 1.7 y 87.6 \pm 0.5% respectivamente, a 20 µg/mL. Los ensayos *in vitro* contra *Trypanozoma cruzi* para la pirazolina **33d** mostraron una inhibición del crecimiento de 61.9 \pm 7.8% a 20 µg/mL (Figura 5). (**Insuasty, et al.,** 2015).

Una nueva serie de *NH*-pirazolinas **37** (Figura 11S, http:// www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1481), fue preparada mediante la reacción de ciclocondensación de las nuevas [(7-cloroquinolin-4-il)oxi] chalconas **36** con hidrato de hidrazina. El tratamiento de las pirazolinas **37** con anhídrido acético o ácido fórmico condujo a los derivados *N*-acetil- o *N*-formilpirazolinas **38/39**, respectivamente. Los nuevos derivados 2-pirazolínicos **37-39** fueron evaluados por el U.S. National Cancer Institute (NCI). Los compuestos **38b,d,f** y **39c,f** mostraron interesante actividad antitumoral contra 58 líneas celulares tumorales, con los valores de GI₅₀ más importantes de ensayos *in vitro* en un rango entre 0.48 a 1.66 μM. (**Montoya,** *et al.*, 2014).

El tratamiento de los compuestos **40a-f** con hidrato de hidrazina empleando condiciones suaves de reacción condujo a la formación de 4,5-dihidro-1*H*-pirazoles **41a-f** (Figura 12S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1482). Luego, el tratamiento con anhídrido acético o ácido fórmico produjo los 4,5-dihidro-1*H*-pirazoles **42a-f** y **43a-f** esperados. La actividad antifúngica de cada serie de compuestos sintetizados fue determinada contra los hongos clínicamente importantes *Candida albicans* y *Cryptococcus neoformans*. Adicionalmente, los compuestos más activos **42e** y **42f** fueron probados en combinación con los agentes antifúngicos comerciales: fluconazol, itraconazol y amfotericina B. El compuesto **42e** mostró un efecto



Figura 4. Condensación de las chalconas con hidrazinas para la preparación de 2-pirazolinas.

sinérgico con fluconazol contra *C. albicans* mientras que **42f** mostró actividad sinérgica con todos los fármacos antifúngicas probadas contra la misma cepa. (**Ramírez**, *et al.*, 2014).

Nuevas series de *N*-acetil- **44** y *N*-formil-pirazolinas **45/46** (Figura 13S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/309/1483) fueron sintetizadas por reacción de ciclocondensación entre [(7-cloroquinolin-4-il)amino]chalconas **13/14** con hidrato de hidrazina en ácido acético y con hidrato de hidrazina en ácido fórmico respectivamente. Los compuestos fueron evaluados *in vitro* como agentes antitumorales y antimaláricos. Los compuestos **45b** y **46b-e** mostraron remarcable actividad antitumoral contra líneas celulares tumorales, con los valores más importantes de GI_{50} en un rango entre 0.13 a 0.99 µM. La mejor respuesta antimalárica fue observada para el compuesto **45a** con un porcentaje de inhibición de 50.8% para *Plasmodium falciparum*, una capacidad hemolítica de 3.2% y un IC₅₀ de 14.1 µg/mL. (**Insuasty, et al.,** 2013a).

Se sintetizaron tres series de nuevas 2-pirazolinas 1,3,5-trisustituidas conteniendo el residuo de benzodioxol como potencial agente antitumoral (Figura 14S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1484). La actividad antitumoral *in vitro* de los compuestos obtenidos fue determinada en el National Cancer Institute (NCI). La 5-(benzo[d][1,3]dioxol-5-il)-3-(4-metoxifenil)-4,5-dihidro-1*H*-pirazol-1-carbotioamida (**54a**) es el más prominente de los compuestos debido a su remarcable actividad hacia las líneas celulares de leucemia (RPMI-8226), cáncer renal (UO-31) y cáncer de próstata (DU-145) con valores de GI₅₀ de 1.88, 1.91 y 1.94 μ M, respectivamente. (**Insuasty,** *et al.***,** 2012a).

La reacción de ciclocondensación asistida por microondas de las chalconas **17/18** con hidrazina produjo los nuevos 3-aril-4-(3-aril-4,5-dihidro-1*H*-pirazol-5-il)-1-fenil-1*H*-pirazoles racémicos **55** o sus *N*-acetil derivados **56** y **57** cuando las reacciones se llevaron a cabo en DMF o ácido acético, respectivamente (Figura 15S, http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1485). El compuesto **57g** mostró una remarcable actividad contra las líneas celulares de leucemia (K-562 y SR), cáncer renal (UO-31) y cáncer de pulmón de células no pequeñas (HOP-92), con los valores más importantes de GI₅₀ en un rango entre 0.04 a 11.4 μ M, para los ensayos *in vitro*. (**Insuasty,** *et al.*, 2010a).

Nuevos derivados bis-3,5-difenilpirazolínicos **58a-f** (Figura 16S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/309/1486), han sido sintetizados de acuerdo a las metodologías de Elway y Sangwan. La mayoría de ellos fueron obtenidos con buenos rendimientos, a partir de la reacción entre bis-chalconas enlazadas por un grupo alquilo **21a-f** e hidrazina en ácido acético. La actividad de algunas bis-pirazolinas fue evaluada contra la bacteria *Helicobacter pylori*. (**Insuasty**, *et al.*, 2008a).



Figura 5. Síntesis de las pirazolinas 33a-f y su posterior reacción con anhídrido acético o ácido fórmico para la obtención de las correspondientes pirazolinas *N*-sustituidas 34a-f y 35a-f.

Dos nuevas series de 4,4'-metilenbis[2-(3-aril-4,5-dihidro-1*H*-pirazol-5-il)fenoles] **59** y metilenbis-2-(3-aril-4,5-dihidro-1*H*-pirazol-5-il)-4,1-fenilen diacetatos **60** han sido eficientemente preparados empezando por el salicilaldehído comercialmente disponible y dónde el paso clave corresponde a la reacción asistida por microondas de intermediarios 3,3'-[metilenbis(6-hidroxi-3,1-fenilen)]bis(1-arilprop-2-en-1-onas) **23** con hidrato de hidrazina o ácido acético/hidrato de hidrazina respectivamente. Tres compuestos no acetilados tipo **59** presentaron interesante actividad antitumoral contra un amplio rango de líneas celulares tumorales (Figura 17S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1487). (**Insuasty, et al.,** 2011).

Síntesis de piridinas fusionadas a partir de chalconas

De modo similar, se pueden formar anillos de seis miembros con un átomo de nitrógeno a partir de chalconas. La reacción de ciclocondensación de chalconas con 1,3-binucleófilos, por ejemplo monoaminas de la serie heterocíclica, se presenta como un método simple y versátil para fusionar el anillo piridínico a un heterociclo. El uso de las chalconas en estas reacciones permite obtener los productos parcialmente hidrogenados, o sea derivados dihidropiridínicos fusionados de gran importancia por su actividad biológica (Figura 18S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1488).

Por ejemplo, la condensación de aminopirazoles *N*Hsustituidos **61** con chalconas **1** conlleva a la formación de dihidropirazolo[3,4-b]piridinas **63**. En el caso de aminopirazoles *N*H- no sustituidos **62**, la introducción de un tercer centro nucleofílico conlleva bien sea a la formación de dihidropirazolo[3,4-b]piridinas **63** o dihidropirazolo [1,5-a]pirimidinas **64**, ambas familias de compuestos con importante actividad biológica. Es importante resaltar nuevamente que una de las ventajas de usar las chalconas en lugar de compuestos 1,3-dicarbonílicos, además de la alta regioselectividad que muestran estas reacciones de ciclocondensación con participación de chalconas, se centra en el hecho de poder obtener los dihidroderivados, los cuales muestran una marcada estabilidad y se pueden aromatizar mediante su tratamiento con agentes oxidantes o a través de una halogenación-deshidrohalogenación con *N*-bromosuccinimida (Figura 19S, http://www.raccefyn.co/ index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1489). (**Quiroga**, *et al.*, 1994).

Las 6,7,8,9-tetrahidropirimido[4,5-*b*][1,6]naftiridin-4(3*H*, 5*H*,10*H*)-onas **70a-g**, **71a-g** y sus formas oxidadas **72a-g**, **73a-g** fueron obtenidas de la reacción libre de catalizador entre 6-amino-2-metiltiopirimidin-4(3*H*)-ona **69** y (*E*)-3,5-bis(benciliden)-1-alquil-4-piperidonas **67a-g**, **68a-g** bajo radiación de microondas y su posterior oxidación con *p*-cloroanilo. Dieciocho de los nuevos compuestos fueron evaluados en el National Cancer Institute de Estados Unidos, donde el compuesto **70g** presentó una remarcable actividad contra 57 líneas celulares tumorales, con los valores más importantes de GI₅₀ entre 1.48 a 9.92 µM en ensayos *in vitro* (Figura 6). (**Insuasty, et al.,** 2013c).

Síntesis de diazepinas fusionadas a partir de chalconas

Las diazepinas, son compuestos heterocíclicos que contienen en su estructura un anillo de siete miembros con dos átomos de nitrógeno en posiciones [1,2], [1,3] y [1,4] (Figura 20S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/309/1490).

Debido a que este tipo de compuestos se puede obtener por diferentes rutas y el espectro de actividad biológica es muy amplio, se considera el esqueleto diazepínico como base estructural privilegiada y líder para la obtención de nuevas moléculas que exhiban actividad biológica. Muestra de ello, son algunos compuestos de tipo diazepínico como el diazepam y el midazolam que son empleados comercialmente para el tratamiento de la ansiedad y desordenes relacionados con el sistema nervioso central (SNC).

Las chalconas reaccionan con 1,4-dinucleófilos, como *orto*-diaminas, conllevando a la formación del sistema diazepínico. Es así como la *orto*-fenilendiamina (Figura 21S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1491), reacciona con chalconas para formar benzodiazepinas. (**Insuasty, Abonia y Quiroga,** 1992). La reacción transcurre a través de la formación del aducto tipo Michael y posterior condensación.

En el caso de *orto*-diaminas que contienen dos grupos amino no equivalentes es posible la formación de mezclas de regioisómeros (Figura 22S, http://www.raccefyn.co/ index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1492), la posibilidad de formación de un solo regioisómero depende de la diferencia de nucleofilicidad entre los dos grupos amino. (**Vianna-Rodrigues**, *et al.*, 1994).

La condensación de chalconas con *orto*-diaminas de la serie heterocíclica se presenta como un método efectivo para la obtención de dihidrodiazepinas fusionadas. De esta manera se puede anelar el sistema diazepínico a otro heterociclo (Figura 23S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1493).

La ciclocondensación regioselectiva de las chalconas **9a-f** con el 4,5-diaminopirazol **79** produjo los derivados diazepínicos **80a-f**. En el estudio de actividad *in vitro* contra *Plasmodium falciparum*, las diazepinas **80a-f** mostraron remarcables porcentajes de inhibición de crecimiento en el rango de 80.3 \pm 13.5 a 94.2 \pm 0.2% cuando fueron probadas a 20 µg/mL (Figura 7). (**Insuasty**, *et al.*, 2015).



Figura 6. Síntesis de 6,7,8,9-tetrahidropirimido[4,5-b][1,6]naftiridin-4(3H,5H,10H)-onas 70a-g, 71a-g y sus formas oxidadas 72a-g, 73a-g.

Ramírez, et al. (2015) reportaron la obtención de nuevas series de 8,9-dihidro-7*H*-pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepinas 84a-g y 85a-g (Figura 24S, http://www.raccefyn.co/index. php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1494), con alta regioselectividad a partir de la reacción entre triamino- o tetraaminopirimidinas 82 y 83 con compuestos carbonílicos α,β -insaturados **81a-g**. Doce de los compuestos sintetizados fueron seleccionados y probados por el US National Cancer Institute (NCI) para su actividad antitumoral contra 60 líneas celulares tumorales humanas diferentes. Los compuestos 85d y 85g mostraron importantes rangos de GI₅₀ de 1.28-2.98 µM y 0.35-2.78 µM respectivamente bajo ensayos in vitro. Adicionalmente, las propiedades antifúngicas de 84ag y 85a-g fueron probadas contra los hongos clínicamente importantes Candida albicans y Cryptococcus neoformans. Aunque esos compuestos mostraron moderadas actividades contra C. albicans, los 2-amino derivados 85a-g y principalmente 85a y 85b, mostraron alta actividad contra C. *neoformans* con MIC₅₀ = 7.8-31.2 μ g/mL, MIC₈₀ = 15.6-31.2 μ g/mL y MIC₁₀₀ = 15.6-62.5 μ g/mL.

Nuevas 2-alquilamino-6-aril-8,9-dihidropirimido[4,5-*b*][1,4] diazepin-4(7*H*)-onas **88a-o** fueron preparadas regioselectivamente por la reacción entre 2-alquilamino-5,6diaminopirimidin-4(3*H*)-onas **86a-c** y dimetilaminopropio fenonas (bases de Mannich) **87a-f** (Figura 25S, http://www. raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/ 309/1495). (**Insuasty**, *et al.*, 2014).

Tres series de nuevas 8,9-dihidro-7*H*-pirimido[5,4-*b*] [1,4]diazepinas, **90a-d**, **91a-d**, y **92a-d** (Figura 26S, http:// www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1496), fueron obtenidas eficientemente con buenos rendimientos usando metodologías de reacción simples. Estas pirimidodiazepinas fueron evaluadas contra 15 cepas de *Mycobacterium spp*. Se observó actividad moderada en la inhibición de 13 microorganismos para los compuestos **90a**, **91a**, **91c**, y **91d**. (**Insuasty**, *et al.*, 2012b). Una nueva serie de 6,6a,7,8-tetrahidro-5*H*-nafto[1,2-*e*] pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepinas **94a-f** y **95a-f** fueron sintetizadas con buenos rendimientos a partir de la reacción entre *E*-2-ariliden-1-tetralonas **93** y la respectiva tri- o tetraaminopirimidinas **82** o **83** bajo radiación de microondas usando DMF como disolvente y cantidades catalíticas de BF₃·OEt₂ (Figura 27S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1497). Seis de los compuestos obtenidos fueron selecciones y probados en 60 líneas celulares tumorales diferentes. En particular, los compuestos **95a**, **95c** y **95e** presentaron remarcable actividad antitumoral contra cáncer de melanoma en la línea celular SK-MEL-5 con GI₅₀ = 0.50µM, GI₅₀ = 0.609µM, GI₅₀ = 0.473µM respectivamente. (**Insuasty, et al.,** 2010b).

Nuevas 11-amino-6-aril-6,7-dihidroindeno[1,2-e]pirimido [4,5-b][1,4]diazepin-5(5aH)-onas **97a-f** (Figura 28S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/309/1498), fueron preparadas regio-selectivamente por la reacción tricomponente de 4,5,6-triaminopirimidina **82**, 1,3-indandiona **96** y aldehídos aromáticos **12a-f**. La aproximación bicomponente, usando 2,4,5,6-tetraaminopirimidina **83** y 2-arilidenindandionas **98a-f** como reactivos, produjo 9,11-diamino-6-aril-6,7-dihidroindeno[1,2-e]pirimido[4,5-b]-[1,4]diazepin-5(5aH)-onas **99a-f** con buenos rendimientos y los derivados regioisoméricos 8,10-diamino **100a-c** con bajos rendimientos. Ambas aproximaciones fueron llevadas a cabo con radiación de microondas. (**Insuasty, et al.,** 2008b).

Nuevas indeno[1,2-*e*]pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepin-5,11dionas racémicas **101-127** fueron obtenidas regioselectivamente de la reacción entre 5,6-diamino-3,4-dihidropirimidin-4-onas **86** y 2-arilidenindandionas **98** como reactivos (Figura 29S, http://www.raccefyn.co/index. php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1499). Estos compuestos fueron solicitados por el US National Cancer Institute (NCI) para evaluar su capacidad de inhibir



Figura 7. Síntesis de los derivados diazepínicos 80a-f a partir de la ciclocondensación regioselectiva de las chalconas 9a-f con el 4,5-diaminopirazol 79.

aproximadamente 60 líneas celulares tumorales humanas diferentes, donde **103** y **104** presentaron importante actividad contra 57 y 48 líneas celulares tumorales, respectivamente, con los valores más importantes de GI_{50} en un rango desde 0.49 a 1.46 µM, en ensayos *in vitro*. (**Insuasty, et al.,** 2008c).

Series de nuevas 4-amino-6-aril-8-(1,3-benzodioxol-5-il)-8,9-dihidro-7*H*-pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepinas **128a-f** y 4-amino-8-aril-6-(1,3-benzodioxol-5-il)-8,9-dihidro-7*H*pirimido [4,5-*b*][1,4]diazepinas racémicas **129a-f** fueron obtenidas regioselectivamente de la reacción entre 4,5,6triaminopirimidina **82** con 1 equivalente de metilendioxichalconas **47a-f** y **51a-f**, bajo radiación de microondas (Figura 30S, http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/309/1500). La capacidad de inhibición de cerca de 60 líneas celulares tumorales humanas diferentes ha sido evaluada en el US National Cancer Institute (NCI), donde **128e**, **129a** y **129b** presentaron remarcable actividad contra 47, 11 y 37 líneas celulares tumorales, respectivamente, con los valores más importantes de GI_{50} en un rango de 0.068 a 0.35 μ M, en ensayos *in vitro*. (**Insuasty**, *et al.*, 2008d).

Conclusiones

En este mini-review se reportan las contribuciones, más recientes, del autor y sus colaboradores en el área de la síntesis de chalconas y análogos mediante la condensación de Claisen-Schmidt y a partir de éstas la obtención de compuestos heterocíclicos de cinco (5) miembros (pirazolinas), de seis (6) miembros (piridinas) y de siete (7) miembros (diazepinas) mediante la reacción de Michael y posterior ciclocondensación. Algunos de los compuestos sintetizados presentan interesante actividad biológica, lo que conlleva a seguir investigando en el fascinante campo de la síntesis de nuevos compuestos con posible actividad biológica.

Información suplementaria

Figura 1S. Sintesis de flavonas 3 a partir de *orto*-hidroxichalconas 2. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1471

Figura 2S. Adición directa (**A**) y conjugada (**B**) de un nucleófilo sobre un sistema carbonílico α,β -insaturado. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1472

Figura 3S. Formación de chalconas en medio ácido o básico. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1473

Figura 4S. Obtención de las chalconas **13/14** derivadas de la 7-cloroquinolina. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1474

Figura 5S. Nuevas (*E*)-1-aril-3-(3-aril-1-fenil-1*H*-pirazol-4il)-2-propen-1-onas **17/18** a partir de 3-aril-1-fenilpirazol-4carboxaldehídos **15/16**. Ver figura suplementaria en: http://www. raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1475

Figura 6S. Síntesis de derivados de tipo bis-chalconas 21 tratando las dicetonas 19/20 con aldehídos aromáticos 12a-c. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/309/1476

Figura 7S. Obtención de metilen-bis-chalconas **23a-e** partiendo de acetofenonas sustituidas **8** y 5,5'-metilen-bis-salicilaldehído **22**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1477

Figura 8S. Nuevos derivados hetaril- y alquilidenrodaninas 26a-d, 26e, 27a-d, 28a-d, 28e, y 29a-d preparados a partir de aldehídos heterocíclicos 24a-d o acetaldehído 24e. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1478

Figura 9S. Síntesis asistida por microondas de nuevas (*Z*)-5arilidenrodaninas **30a-i**. Ver figura suplementaria en: http://www. raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1479 **Figura 10S.** Estructura y nomenclatura IUPAC de isómeros de las pirazolinas. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1480

Figura 11S. Síntesis y funcionalización de una nueva serie de *NH*-pirazolinas 37 mediante la reacción entre [(7-cloroquinolin-4-il)oxi]chalconas 36 con hidrato de hidrazina. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1481

Figura 12S. Obtención de los compuestos 41a-f y posterior tratamiento con anhídrido acético o ácido fórmico. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1482

Figura 13S. Nuevas series de *N*-acetil- **44** y *N*-formil-pirazolinas **45/46** sintetizadas por reacción entre [(7-cloroquinolin-4-il) amino]chalconas **13/14** con hidrato de hidrazina en ácido acético y ácido fórmico. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1483

Figura 14S. Síntesis de nuevas 2-pirazolinas 1,3,5-trisustituidas conteniendo el residuo de benzodioxol. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1484

Figura 15S. Síntesis asistida por microondas de los 3-aril-4-(3-aril-4,5-dihidro-1*H*-pirazol-5-il)-1-fenil-1*H*-pirazoles racémicos **55** o sus *N*-acetil derivados **56/57**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1485

Figura 16S. Nuevos derivados bis-3,5-difenilpirazolínicos **58a-f** sintetizados a partir de la reacción entre bis-chalconas enlazadas por un grupo alquilo **21a-f** e hidrazina en ácido acético. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/309/1486

Figura 17S. Síntesis de nuevas series de 4,4'-metilenbis [2-(3-aril-4,5-dihidro-1*H*-pirazol-5-il) fenoles] **59** y metilenbis-2-(3-aril-4,5-dihidro-1*H*-pirazol-5-il)-4,1-fenilen diacetatos **60**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1487

Figura 18S. Formación de derivados dihidropiridínicos fusionados a partir de chalconas. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1488

Figura 19S. Condensación de aminopirazoles *N*H-sustituidos **61** y *N*H-no sustituidos **62** con chalconas **1** y posterior aromatización de los productos con NBS. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1489

Figura 20S. Estructuras de los isómeros de diazepinas. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1490

Figura 21S. Formación de benzodiazepinas por medio de la reacción entre *orto*-fenilendiamina y chalconas. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1491

Figura 22S. Formación de regioisómeros por la reacción entre *orto*-diaminas con dos grupos amino no equivalentes y chalconas. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1492

Figura 23S. Formación de dihidrodiazepinas fusionadas a partir de chalconas. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1493

Figura 24S. Obtención de nuevas series de 8,9-dihidro-7*H*pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepinas **84a-g** y **85a-g**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/309/1494 **Figura 25S.** Síntesis de nuevas 2-alquilamino-6-aril-8,9dihidropirimido[4,5-*b*][1,4]diazepin-4(7*H*)-onas **88a-o** usando dimetilaminopropiofenonas (bases de Mannich) **87a-f**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/ article/downloadSuppFile/309/1495

Figura 26S. Obtención de tres series de nuevas 8,9-dihidro-7*H*pirimido[5,4-*b*][1,4]diazepinas, **90a-d**, **91a-d**, y **92a-d**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/309/1496

Figura 27S. Síntesis de las 6,6a,7,8-tetrahidro-5*H*-nafto[1,2-*e*] pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepinas **94a-f** y **95a-f** usando radiación de microondas y cantidades catalíticas de BF₃·OEt₂. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/ downloadSuppFile/309/1497

Figura 28S. Formación de nuevas diazepinas fusionadas derivadas de la indandiona. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn. co/index.php/raccefyn/article/downloadSuppFile/309/1498

Figura 29S. Nuevas indeno[1,2-*e*]pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepin-5,11-dionas racémicas **101-127** obtenidas regioselectivamente a partir de 2-arilidenindandionas **98**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/ 309/1499

Figura 30S. Síntesis de nuevas 4-amino-6-aril-8-(1,3-benzodioxol-5-il)-8,9-dihidro-7*H*-pirimido[4,5-*b*][1,4]diazepinas **128a-f** y 4amino-8-aril-6-(1,3-benzodioxol-5-il)-8,9-dihidro-7*H*-pirimido [4,5-*b*][1,4]diazepinas racémicas **129a-f**. Ver figura suplementaria en: http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/download SuppFile/309/1500

Agradecimientos

B.I.O. agradece a todos los integrantes del Grupo de Investigación de Compuestos Heterocíclicos (GICH) de la Universidad del Valle. B.I.O. igualmente agradece a sus 59 estudiantes, quienes han realizado o están realizando sus tesis de doctorado (12), sus trabajos de investigación de maestría (12) o sus trabajos de grado (35), en especial a Jonathan Ramírez Prada y Viviana Cuartas Granada por su colaboración. A la Dra. Susana Zacchino, al Dr. Iván Darío Vélez, a la Dra Sara Robledo, a los Drs. Manuel Nogueras y Justo Cobo de la Universidad de Jaén, España y al Instituto Nacional de Cancerología (NCI) de los Estados Unidos.

Adicionalmente, agradece a COLCIENCIAS, Banco de la República y Universidad del Valle por el soporte financiero a su investigación.

Gracias a la colaboración del National Cancer Institute (NCI) de los Estados Unidos, a la Universidad Nacional de Rosario en Argentina y a la Universidad de Antioquia en Colombia se han estudiado la actividad antitumoral, antifúngica y antiparasitaria de algunos de los nuevos compuestos sintetizados.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Anand, P., Singh, B. (2014). Pyrrolo-isoxazole: A Key Molecule with Diverse Biological Actions. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 14 (7): 623-627.
- Awad, W., El-Neweihy, M., Selim, F. (1960). Studies on 3-Acylcatechols. II. A New Synthesis of 8-Hydroxyflavone. *The Journal of Organic Chemistry*, 25 (8): 1333-1336.
- Insuasty, B., Ramírez, J., Becerra, D., Echeverry, C., Quiroga, J., Abonia, R., Robledo, S. M., Vélez, I. D., Upegui, Y., Muñoz, J. A., Ospina, V., Nogueras, M., Cobo, J. (2015). An efficient synthesis of new caffeine-based chalcones, pyrazolines and pyrazolo[3,4-b][1,4]diazepines as potential antimalarial, antitrypanosomal and antileishmanial agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 93: 401-413.
- Insuasty, B., Orozco, F., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J. (2014). Synthesis and Structure Elucidation of New Regioisomeric 2-Alkylamino-6-aryl-8,9-dihydropyrimido [4,5-b][1,4]diazepin-4(7*H*)-ones. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, **51** (1): 196-202.

- Insuasty, B., Montoya, A., Becerra, D., Quiroga, J., Abonia, R., Robledo, S., Vélez, I. D., Upegui, Y., Nogueras, M., Cobo, J. (2013a). Synthesis of novel analogs of 2-pyrazoline obtained from [(7-chloroquinolin-4-yl)amino]chalcones and hydrazine as potential antitumor and antimalarial agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 67: 252-262.
- Insuasty, A., Ramírez, J., Raimondi, M., Echeverry, C., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J., Rodríguez, M. V., Zacchino, S. A., Insuasty, B. (2013b). Synthesis, Antifungal and Antitumor Activity of Novel (*Z*)-5-Hetarylmethylidene-1,3-thiazol-4-ones and (*Z*)-5-Ethylidene-1,3-thiazol-4-ones. *Molecules*, 18 (5): 5482-5497.
- Insuasty, B., Becerra, D., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J. (2013c). Microwave-assisted synthesis of pyrimido[4,5-b][1,6]naphthyridin-4(3H)-ones with potential antitumor activity. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 60: 1-9.
- Insuasty, B., Chamizo, L., Muñoz, J., Tigreros, A., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J. (2012a). Synthesis of 1-Substituted 3-Aryl-5-aryl(hetaryl)-2-pyrazolines and Study of Their Antitumor Activity. *Archiv der Pharmazie*, 345 (4): 275-286.
- Insuasty, B., García, A., Bueno, J., Quiroga, J., Abonia, R., Ortiz, A. (2012b). Antimycobacterial Activity of Pyrimido[4,5-b] diazepine Derivatives. Archiv der Pharmazie, 345 (9): 739-744.
- Insuasty, B., García, A., Quiroga, J., Abonia, R., Ortiz, A., Nogueras, M., Cobo, J. (2011). Efficient microwaveassisted synthesis and antitumor activity of novel 4,4'-methylenebis[2-(3-aryl-4,5-dihydro-1*H*-pyrazol-5-yl) phenols]. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 46 (6): 2436-2440.
- Insuasty, B., Tigreros, A., Orozco, F., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Sanchez, A., Cobo, J. (2010a). Synthesis of novel pyrazolic analogues of chalcones and their 3-aryl-4-(3-aryl-4,5-dihydro-1*H*-pyrazol-5-yl)-1-phenyl-1*H*-pyrazole derivatives as potential antitumor agents. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, **18** (14): 4965-4974.
- Insuasty, B., García, A., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J. (2010b). Synthesis of novel 6,6a,7,8-tetrahydro-5H-naphtho[1,2-e]pyrimido[4,5-b][1,4]diazepines under microwave irradiation as potential anti-tumor agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 45 (7): 2841-2846.
- Insuasty, B., Martinez, H., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J. (2008a). Synthesis of new bis-3,5diphenylpyrazolines derivatives linked with alkyl chains. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, 45 (5): 1521-1524.
- Insuasty, B., Orozco, F., García, A., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J. (2008b). Microwave-assisted synthesis of new regioisomeric 6,7-dihydroindeno[1,2-e] pyrimido[4,5-b][1,4]diazepin-5(5aH)-ones. Journal of Heterocyclic Chemistry, 45 (6): 1659-1663.
- Insuasty, B., Orozco, F., Lizarazo, C., Quiroga, J., Abonia, R., Hursthouse, M., Nogueras, M., Cobo, J. (2008c). Synthesis of new indeno[1,2-e]pyrimido[4,5-b][1,4] diazepine-5,11-diones as potential antitumor agents. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 16 (18): 8492-8500.

- Insuasty, B., Orozco, F., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J. (2008d). Microwave induced synthesis of novel 8,9-dihydro-7*H*-pyrimido[4,5-*b*][1,4]diazepines as potential antitumor agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, **43** (9): 1955-1962.
- **Insuasty, B., Abonia, R., Quiroga, J.** (1992). The reaction of ketones with *ortho*-diamines. I. The reaction of aromatic α,β-unsaturated ketones with 4,5-dimethyl-1,2-phenylenediamine. *An. Quim.*, **88**: 718-721.
- Kostanecki, S., Tambor, J. (1899). Ueber die sechs isomeren Monooxybenzalacetophenone (Monooxychalkone). Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft, 32 (2): 1921-1926.
- Mohamed, R., Abdelrahman, S., Ahmad, M. (2012). Recent advances in the therapeutic applications of pyrazolines. *Expert Opinion on Therapeutic Patents*, **22** (3): 253-291.
- Montoya, A., Quiroga, J., Abonia, R., Nogueras, M., Cobo, J., Insuasty, B. (2014). Synthesis and in Vitro Antitumor Activity of a Novel Series of 2-Pyrazoline Derivatives Bearing the 4-Aryloxy-7-chloroquinoline Fragment. *Molecules*, **19** (11): 18656-18675.
- Parvesh, S., Amit, A., Vipan, K. (2014). Recent developments in biological activities of chalcones: A mini review. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 85: 758-777.
- 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. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, **31** (6): 1333-1335.
- Ramajayam, R., Girdhar, R., Yadav, M. (2007). Current Scenario of 1,4-Diazepines as Potent Biomolecules-A Mini Review. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 7 (8): 793-812.
- Ramírez, J., Svetaz, L., Quiroga, J., Abonia, R., Raimondi, M., Zacchino, S., Insuasty, B. (2015). Synthesis of novel thiazole-based 8,9-dihydro-7*H*-pyrimido[4,5-*b*][1,4] diazepines as potential antitumor and antifungal agents. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 92: 866-875.
- Ramírez, J., Rodríguez, M. V., Quiroga, J., Abonia, R., Sortino, M., Zacchino, S. A., Insuasty, B. (2014). Efficient Synthesis of Novel 3-Aryl-5-(4-chloro-2-morpholinothiazol-5-yl)-4,5-dihydro-1*H*-pyrazoles and Their Antifungal Activity Alone and in Combination with Commercial Antifungal Agents. Archiv der Pharmazie, **347** (8): 566-575.
- Sortino, M., Delgado, P., Juárez, S., Quiroga, J., Abonia, R., Insuasty, B., Nogueras, M., Rodero, L., Garibottoe, F. M., Enrize, R. D., Zacchino, S. (2007). Synthesis and antifungal activity of (Z)-5-arylidenerhodanines. *Bioorganic & Medicinal Chemistry*, 15 (1): 484-494.
- Vianna-Rodrigues, S., Martins-Viana, L., Quiroga, J., Insuasty, B., Abonia, R., Baumann, W. (1994). Chromatographic and spectroscopic properties of regioisomers of some 1*H*-1,5-benzodiazepines. *Journal of Heterocyclic Chemistry*, **31** (4): 813-817.
- Wenglowsky, S. (2013). Pyrazolo[3,4-b]pyridine kinase inhibitors: a patent review (2008 - present). Expert Opinion on Therapeutic Patents, 23 (3): 281-298.

Biomasa del fitoplancton eucariota y su disponibilidad para la red trófica del embalse Riogrande II (Antioquia, Colombia)

Mónica Tatiana López-Muñoz^{1,*}, John Jairo Ramírez-Restrepo¹, Jaime Alberto Palacio-Baena², Ricardo O. Echenique³, Carlos E. De Mattos-Bicudo⁴, Edison Andrés Parra-García¹

> ¹ Grupo de Limnología Básica y Experimental y Biología y Taxonomía Marina, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
> ² Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia
> ³ Facultad de Ciencias Naturales y Museo, (UNLP)/CIC-BA, La Plata, Argentina
> ⁴ Núcleo de Pesquisa em Ecologia, Instituto de Botânica, São Paulo, Brasil

Resumen

Con el objetivo de establecer la biomasa de carbono contenida en el fitoplancton eucariota del embalse Riogrande II (Antioquia, Colombia), entre agosto de 2011 y agosto de 2012, la porción de esa biomasa disponible para el zooplancton filtrador y la calidad de alimento que podría representar para dicho grupo, el fitoplancton se clasificó en dos rangos de longitud correspondientes a nanoplancton (5 a $20 \,\mu$ m) y microplancton (> $20 \,\mu$ m). Para ambos grupos se calculó el contenido de carbono celular y la biomasa total en contenido de carbono. Además, para el nanoplancton, el cual corresponde a la fracción filtrable, se estimaron las concentraciones de nitrato y de fosfato. Los altos niveles de biomasa de organismos fototróficos evidenciaron el papel fundamental del fitoplancton dominante es pequeña, el flujo de carbono y de nutrientes parece estar dirigido principalmente hacia la vía detrítica y las sustancias disueltas, y no directamente al zooplancton filtrador, cuya principal fuente de alimento en el fitoplancton eucariótico la constituyen los organismos nanoplanctónicos mixotróficos (Cryptophyta y Euglenophyta), que en función de un mayor volumen poseen concentraciones más elevadas de nitrato y fosfato y, por lo tanto, pueden proveer alimento de mejor calidad que el resto del nanoplancton. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: biomasa, carbono, fitoplancton, microplancton, nanoplancton, zooplancton.

Eukariotic phytoplankton biomass and its availability for the food web at Riogrande II reservoir (Antioquia, Colombia)

Abstract

In order to establish the carbon biomass content in the eukaryotic phytoplankton at Riogrande II reservoir (Antioquia, Colombia) from August 2011 to August 2012, as well as the portion of this available biomass for filter-feeding zooplankton and the quality of food it could represent for each group, we classified phytoplankton considering two length ranges corresponding to nanoplankton (5 to 20 μ m) and microplankton (>20 μ m). We estimated the cellular carbon content and the total biomass represented as carbon content for both groups. We also estimated nitrate and phosphate concentrations for the nanoplankton, which corresponds to the filterable fraction. The high levels of phototrophic organisms biomass showed the essential role of eukaryotic phytoplankton in carbon fixation; however, due to the eutrophication of this reservoir and to the small size of dominant zooplankton, the carbon flux and nutrients seemed to be directed mainly to the detrital track and to dissolved substances and not directly to the filter-feeding zooplankton, whose main food source among eukaryotic phytoplankton is constituted by mixotrophic nanoplanktonic organisms (such as Cryptophyta and Euglenophyta), that according to their greater volume have higher concentrations of nitrate and phosphate and, therefore, can provide better quality food than the remaining nanoplankton. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Biomass, carbon, phytoplankton, microplankton, nanoplankton, zooplankton.

Introducción

Como fijadoras de carbono y productoras de biomasa, las algas, así como las macrófitas y las bacterias fotosintéticas, son uno de los principales grupos de organismos autótrofos en los ambientes acuáticos continentales (**Bellinger & Sigee**, 2010). De esta manera, las algas del fitoplancton tienen un papel fundamental en las redes tróficas acuáticas como productores primarios, ya que son el principal proveedor de energía y nutrientes para los consumidores de niveles tróficos superiores (**Moss**, *et al.*, 2003).

La cuantificación de la biomasa de microorganismos presentes en los ecosistemas acuáticos es fundamental en la evaluación de su capacidad de carga, de los requerimientos de nicho y de los flujos de materia y energía trófica. La biomasa es un indicador del éxito de cada especie para reproducirse y sobrevivir a factores de estrés fisiológico y, en general, es una medida de la conversión exitosa de carbono inorgánico en carbono orgánico (**Vollenweider**, 1969).

Dado que la densidad, o el carbono orgánico total en partículas, no permiten una estimación adecuada de la concentración de partículas disponibles como alimento para los herbívoros (**Rocha & Duncan**, 1985), la estimación de la biomasa mediante el carbono se utiliza ampliamente para cuantificar el metabolismo de la comunidad y la transferencia de energía trófica, por lo cual se ha convertido en una herramienta esencial en los estudios funcionales de los ecosistemas acuáticos (**Gosselain & Hamilton**, 2000).

Además, la biomasa estimada como el contenido de carbono de los organismos planctónicos es una variable significativa en los modelos de ecosistemas y del equilibrio del carbono biogeoquímico, debido a que este elemento es el componente estructural más importante de los organismos. Generalmente, esta biomasa se estima mediante la conversión del tamaño microscópico al volumen celular (biovolumen) y, posteriormente, a la concentración de carbono, utilizando la derivada de carbono a relaciones de volumen (**Menden-Deuer & Lessard**, 2000). De esta forma, algunas especies de poco biovolumen pueden cumplir una función muy relevante en el mantenimiento de las estructuras comunitarias a través de los flujos de carbono (**Rodríguez-Martínez**, 2010).

En este contexto se planteó la pregunta que originó el presente trabajo: ¿qué porción de la biomasa de carbono contenida en el fitoplancton eucariótico del embalse Riogrande II puede ser consumida por el zooplancton dominante en este sistema? Se planteó que si más del 90 % de la biomasa del fitoplancton eucariótico (estimada como biovolumen) fue aportada por especies del género *Staurastrum* (la morfología de este taxón le permite disminuir el pastoreo), la porción disponible debía ser muy baja (inferior al 5 % de la biomasa estimada como contenido de carbono), y estaría conformada principalmente por especies de Chlorophyta y Cryptophyta, que son las algas dominantes que más fácilmente consume el zooplancton.

Para corroborar la hipótesis, el objetivo de este trabajo fue establecer la biomasa (estimada como el contenido de carbono) en el fitoplancton eucariótico del embalse Riogrande II, así como la porción de dicha biomasa disponible para el zooplancton filtrador y la calidad del alimento que podría representar para este grupo.

*Correspondencia:

Mónica Tatiana López-Muñoz, monicatatiana@gmail.com Recibido: 11 de febrero de 2016 Aceptado: 31 de marzo de 2016

Materiales y métodos

El embalse Riogrande II está ubicado a 2.150 msnm al noroccidente de la ciudad de Medellín (Antioquia, Colombia), en jurisdicción de los municipios de Don Matías, San Pedro, Belmira, Santa Rosa de Osos y Entrerríos, y se sitúa en las coordenadas 75°32'-75°26' O y 6°33'-6°28' N. El embalse tiene un volumen de 240 millones de m³ hasta la cota de vertedero (2.270 msnm), una profundidad máxima de 50 m, un tiempo de retención aproximado de 72,8 días y un caudal aproximado de 35 m³ seg⁻¹ en la captación. Capta las aguas de un área media de drenaje de 1.214 hectáreas, y recibe principalmente las aguas de los ríos Grande y Chico y de la quebrada Las Ánimas. El embalse tiene múltiples usos: generación hidroeléctrica, abastecimiento de agua potable y contribución al saneamiento del río Medellín; además, en su área de influencia se desarrollan actividades agrícolas y ganaderas.

La información se recolectó en cinco estaciones de muestreo localizadas al ingreso (1) y al final (2) del brazo del río Chico, en la torre de captación (3), al final del brazo de la quebrada Las Ánimas (4) y al final del brazo del río Grande (5) (Figura 1).

Muestreo y análisis de las muestras

Entre agosto de 2011 y agosto de 2012 se hicieron muestreos mensuales en el embalse. Las muestras de fitoplancton se recolectaron en tres profundidades de la zona fótica utilizando una botella van Dorn de 5 l de capacidad, y se fijaron con solución de Lugol y ácido acético al 1 %.

La identificación taxonómica del fitoplancton se hizo en un microscopio fotónico usando, entre otras, las claves de Bourrelly (1970), Castro & Bicudo (2007), Comas (1996), Cox (1996), Gasse (1986), Huber-Pestalozzi (1968), Komárek & Fott (1983), Prescott, et al. (1972), Prescott, et al. (1975), Prescott, et al. (1982), Teiling (1967), Tell & Conforti (1986) y West, et al. (1923). El material se depositó en la colección del Laboratorio de Limnología Básica y Experimental y Biología y Taxonomía Marina de la Universidad de Antioquia, Colombia (CLUA).

Para determinar las características morfométricas de las especies se emplearon fotomicrografías y el programa de morfometría geométrica TPSdig2, y los organismos se consideraron como la unidad fisiológica (células, cenobios, colonias y filamentos). Se estimaron el número de células por colonia y las dimensiones de cada organismo, incluida la máxima dimensión lineal (MDL, μ m). Además, se calcularon el biovolumen (V, μ m³) y la superficie (S, μ m²) de acuerdo a las ecuaciones geométricas de **Hillebrand**, *et al.* (1999). El conteo del fitoplancton se hizo mediante la técnica de campos al azar usando cámaras de sedimentación de 50 ml (**Lund**, *et al.*, 1958; **Utermöhl**, 1958). Los valores obtenidos en los conteos se convirtieron a densidad utilizando la fórmula de **Ros** (1979).



Figura 1. Ubicación del embalse Riogrande II y localización de las estaciones de muestreo

La información sobre la taxocenosis zooplanctónica se obtuvo de **Villabona-González** (2015).

Tratamiento de la información

Teniendo en cuenta que el tamaño celular del plancton es uno de los factores que controlan el metabolismo y la estructura de la comunidad (**Chisholm**, 1992; **Rodríguez**, 1994; **Li**, 2002), que la MDL es una medida indirecta de resistencia a la maniobrabilidad del zooplancton, y que se ha reportado una estrecha relación entre el contenido de carbono y el biovolumen para diferentes grupos del fitoplancton (**Menden-Deuer & Lessard**, 2000; **Cermeño**, *et al.*, 2005), para el cálculo de la concentración de carbono celular se clasificó el fitoplancton por rangos de tamaño según el promedio de la MDL como nanoplancton (5 a 20 μm) y microplancton (>20 μm).

El contenido de carbono celular (pgC/cel) se calculó mediante las ecuaciones de **Menden-Deuer & Lessard** (2000), así: para algas no diatomeas, pgC/cel=0,216 x $V^{0,939}$ y para diatomeas, pgC/cel=0,288 x $V^{0,811}$, donde V es el volumen celular. La biomasa total de carbono se obtuvo multiplicando el carbono celular por la densidad de células por mililitro (**Gosselain & Hamilton**, 2000) y los resultados se reportaron en pgC/ml.

La fracción del fitoplancton que por su tamaño pudiera ser filtrado por el zooplancton reportado en el embalse Riogrande II (Villabona-González, 2015), se determinó según los criterios de Gophen & Geller (1984), Kerner, *et al.* (2004) y Giraldo (2010), y coincidió en este caso con la porción nanoplanctónica, dado que según estos autores, la mayoría de los organismos filtradores que componen la taxocenosis pueden consumir partículas entre 0,5 y 35 µm, pero seleccionan especialmente las de tamaños inferiores a 20 µm.

Para estimar las concentraciones internas de nitrato (N) y fosfato (P) de las algas nanoplanctónicas y deducir la calidad de alimento que ofrecen al zooplancton de acuerdo con sus características bioquímicas, se calculó la concentración de nutrientes interna mínima en la que la tasa de crecimiento es igual a cero (Q_{min}), así como la constante de saturación media para la absorción de nutrientes K (mmol nutrientes/l), utilizando las regresiones $Log_{10} Q^{N}_{min} = -8.7 + 0.68 * Log10$ V; $Log_{10} K^{N} = -0.71 + 0.52 * Log10$ V y $Log_{10} Q^{P}_{min} = -10.5 + 0.86 * Log10$ V, donde V es el volumen celular (**Edwards**, *et al.*, 2012).

Debido a que la mayoría del zooplancton filtrador pertenecía al orden Cladocera, y que *Bosmina freyi* (Cladocera) representó el 60 % de la biomasa zooplanctónica total (Villabona-González, 2015), para determinar el grado de asociación entre dicho orden y el nanoplancton, se ejecutó un análisis de correlación de Spearman utilizando el programa R, versión 3.2.0 (R Core Team, 2015).

Resultados y discusión

El microplancton (>20 μ m) representó 70,2 % del fitoplancton, 99,1 % del promedio del carbono celular por especie y 99,9 % del promedio del carbono fitoplanctónico en el embalse (Tabla 1).

Según **Chisholm** (1992), ante condiciones saturadas de nutrientes, los fitopláncteres de células de MLD grande pueden generar florecimientos, mientras que los organismos pequeños tienden a permanecer relativamente constantes. Esto se debe a que en aguas ricas en nutrientes el fitoplancton de mayor tamaño tiene tasas más altas de producción de biomasa (**Cermeño**, *et al.*, 2005; **Marañón**, *et al.*, 2007), y es menos controlado por los herbívoros (**Kiørboe**, 1993).

En el microplancton la división Charophyta presentó los organismos con mayor volumen promedio y, por lo tanto, con mayor contenido de carbono celular. Dado que fue el grupo fitoplanctónico más abundante durante el estudio (**López-Muñoz**, 2015), su biomasa total de carbono superó ampliamente la de los demás y constituyó más de 98 % del total en todos los muestreos y estaciones (Figura 2).

Debido a que el zooplancton filtrador del embalse está constituido principalmente por organismos pequeños en relación con el fitoplancton dominante (0,2 a 1,5 mm de longitud, según **Villabona-González**, 2015), y a que la morfología de los especímenes de Charophyta de mayor volumen y densidad (*Staurastrum*) le confiere ventajas para evitar el pastoreo (**Hansson & Tranvik**, 1996), es posible considerar que la vía detrítica es el camino fundamental del

flujo de energía en el embalse. Al respecto, **Ramírez**, *et al.* (2015) han señalado que en este sistema el tripton (organismos muertos, detritus y sustancias coloidales de origen orgánico o inorgánico) y no el fitoplancton es el componente que más contribuye con la atenuación de la irradiancia descendente, lo que sugiere una alta concentración de partículas detríticas y apoya esta presunción.

Según **Rodríguez-Martínez** (2010), en los ecosistemas acuáticos eutróficos las cadenas tróficas son cortas y la eficiencia de la transferencia de la producción primaria hacia los herbívoros es baja en comparación con las pérdidas hacia la vía detrítica. Sin embargo, la elevada producción primaria y el reducido número de niveles tróficos permiten la disponibilidad de biomasa para el resto de la cadena trófica. Se infiere, entonces, que en lagos eutróficos la principal fuente de alimento del zooplancton filtrador la constituyen el carbono orgánico detrítico y la biomasa bacteriana y, solo en muy baja proporción, el fitoplancton, y específicamente el nanoplancton (**Geller & Müller**, 1981).

Pese a lo anterior y a que el énfasis de este trabajo se centró en estimar la biomasa fitoplanctónica disponible para los filtradores, es necesario considerar que los productores primarios planctónicos se consumen también como sustancias disueltas y no solo como alimento en partículas y que, en consecuencia, al considerar ambas vías se puede suponer que el flujo de energía indirecto desde el microplancton es alto, incluso teniendo en cuenta la exportación hacia el sedimento y las pérdidas por respiración bacteriana.

Además, en un estudio sobre la dieta del rotífero forrajero *Asplanchna girodi* en el embalse, **Giraldo** (2010) encontró que, aunque en menor proporción que las clorococales, las algas incluidas en la porción de microplancton, tales como *Ceratium, Staurastrum, Coelastrum,* y algunas diatomeas,

 Tabla 1. Número de taxones por división, límites y valores medios de la máxima dimensión lineal (MDL), biovolumen, contenido de carbono por taxón y biomasa de carbono del fitoplancton del embalse Riogrande II por rangos de tamaño (agosto de 2011 a agosto de 2012)

Rango de tamaño	División	Número de taxones	MDL (µm)	Biovolumen (mm ³)	Biomasa (pgC/cél)	Biomasa total (pgC/ml)
Microplancton	Charophyta	15	23,9-455,9 (90,8)	0,1-832,2 (208,8)	8,8-78258,4 (20314,8)	2,1*10-1,8*107 (1,8*106)
	Chlorophyta	19	20,3-149,2 (47,8)	0,0-16,7 (5,2)	3,8-1967,3 (632,3)	2,4*10-1,5*10 ⁴ (2,1*10 ³)
	Cryptophyta	1	21,7	2,8	369,2	$2,7*10^{3}$
	Dinophyta	3	31,1-193,7 (92,6)	17,5-69,0 (50,0)	2027,8-7534,2 (5515,8)	4,4*103-4,8*104 (2,3*104)
	Euglenophyta	5	30,3-109,8 (59,0)	0,1-43,7 (10,7)	16,2-4903,6 (1231,7)	1,4*10-8,1*103 (2,3*103)
	Ochrophyta	23	23,8-318,2 (59,0)	0,0-40,2 (10,7)	4,0-1196,4 (1231,7)	1,0*10-7,9*103 (5,7*102)
Nanoplancton	Charophyta	4	12,4-17,7 (15,5)	0,3-1,2 (0,6)	46,2-166,3 (92,8)	8,5*10-2,8*10 ² (1,7*10 ²)
	Chlorophyta	14	8,7-17,7 (12,8)	0,0-3,0 (0,6)	2,2-396,8 (83,9)	5,1-1,6*103 (4,4*102)
	Cryptophyta	3	10,2-18,2 (15,4)	0,2-1,3 (0,8)	30,0-176,1 (109,4)	3,7*10 ² -7,3*10 ³ (3,3*10 ³)
	Euglenophyta	2	15,4-18,3 (16,8)	2,2-3,5 (2,9)	295,0-455,3 (375,1)	9,3*10 ² -1,1*10 ³ (1,0*10 ³)
	Ochrophyta	5	7,2-16,9 (13,5)	0,1-0,2 (0,2)	11,8-23,5 (16,4)	2,6*10-1,8*102 (6,7*10)



Figura 2. Biomasa de carbono del fitoplancton (microplancton) por divisiones taxonómicas. Embalse Riogrande II. A. Por muestreos. B. Por estaciones

hacen parte de la dieta de esta especie. De ellas, *Ceratium* y *Staurastrum* fueron dominantes durante este estudio y contribuyeron significativamente a la biomasa de carbono, como ya se mencionó.

El nanoplancton fue dominado por algas flageladas mixotróficas (Cryptophyta y, en menor proporción, Euglenophyta), cuya contribución a la biomasa de carbono en esta porción del fitoplancton superó el 70 % en todas las muestras (Figura 3). En ambientes limitados de luz, la mixotrofia es una estrategia adaptativa que permite utilizar las bacterias como fuente de carbono orgánico y de nutrientes (**Medina-Sánchez**, 2002), lo que constituye una de las razones para que estas dos divisiones predominen en el nanoplancton. Diversos autores han documentado la presencia de criptofitas en contenidos estomacales de especies del zooplancton. Además, **Bogdan & Gilbert** (1987) encontraron una alta eficiencia en la ingestión de varias especies de Cryptophyta por parte de numerosos zooplancteres. De esta forma, es posible deducir que las especies nanoplanctónicas de



Figura 3. Biomasa de carbono del fitoplancton (nanoplancton) por divisiones taxonómicas. Embalse Riogrande II. A. Por muestreos. B. Por estaciones

la división criptofita presentes en el embalse Riogrande II hacen parte de la dieta frecuente del zooplancton de este sistema.

En cuanto a la calidad de alimento que podría ofrecer el fitoplancton (nanoplancton), además de la biomasa de carbono, se evidenció que las divisiones Euglenophyta y Cryptophyta también pueden contener mayores concentraciones de nitratos y fosfatos (Tabla 2) y, por lo tanto, se asume que la ingestión de los organismos de estos grupos y la incorporación de tales nutrientes podría favorecer las tasas de crecimiento y la reproducción del zooplancton.

Aunque las biomasas del nanoplancton y los cladóceros no evidenciaron relaciones significativas (correlaciones entre 0,05 y 0,46), en la Figura 4 se muestra que la tendencia temporal de estas variables fue similar entre septiembre y noviembre de 2011 y entre marzo y abril de 2012. Además, espacialmente ambas taxocenosis presentaron las mayores biomasas en las estaciones localizadas al ingreso del brazo del río Chico (1) y al final del brazo del río Grande (5).

Debido a la poca biomasa de los organismos autótrofos en el nanoplancton, estos resultados pueden interpretarse como un efecto indirecto de la variación en la disponibilidad de recursos para las algas mixotróficas y el zooplancton filtrador (por ejemplo, bacterias, ciliados y protozoos nanoplanctónicos), tal como lo reportaron **Hwang & Heath** (1997). Además, según **Lampert & Sommer** (1997), la herbivoría del zooplancton es una de las principales fuentes de regeneración de nutrientes disueltos y, por ende, uno de los factores que afecta las tasas de crecimiento del fitoplancton, pues una porción de los nutrientes contenidos en las algas es liberada a través de los detritus provenientes de la alimentación, las heces o la excreción animal.

Así mismo, en el plano espacial la tendencia hacia valores de biomasa más altos en las colas del embalse (ingreso del brazo del río Chico y final del brazo del río Grande), puede estar asociada a mayores concentraciones de material orgánico debido al ingreso de los afluentes y, en el caso

Tabla 2. Concentración interna mínima de los nutrientes (nitrato-N y fosfato-P) a la que la tasa de crecimiento algal es igual a cero (Q_{min}), y constante de saturación media para la absorción de nutrientes (K) del fitoplancton (nanoplancton) del embalse Riogrande II (agosto de 2011 a agosto de 2012)

División	$Log_{10}Q^{\rm N}_{\ min}$	$Log_{10}K^{N}_{\ min}$	$Log_{10}Q^{P}_{min}$
Charophyta	-6,83	0,72	-8,14
Chlorophyta	-7,06	0,55	-8,42
Cryptophyta	-6,81	0,73	-8,11
Euglenophyta	-6,36	1,08	-7,54
Ochrophyta	-7,23	0,41	-8,64

250

particular del ingreso del brazo del río Chico, por la mezcla provocada por la intrusión de la pluma del río hasta el fondo y por la poca profundidad de la columna de agua (**Toro**, *et al.*, 2013), pues estos factores favorecen la disponibilidad de pequeñas partículas de alimento tanto para las algas mixótrofas (principales componentes del fitonanoplancton), como para el zooplancton.

Aunque la biomasa del fitonanoplancton fue notoriamente superior al final del brazo del río Grande, la de los cladóceros fue significativamente mayor en el ingreso del brazo del río Chico, lo cual puede ser el resultado de la alta sensibilidad de los flagelados mixotróficos a las floraciones de cianobacterias (**Moustaka-Gouni**, *et al.*, 2006; **Krevš**, *et al.*, 2010), ya que la mayor biomasa de cianobacterias se encontró en el ingreso del brazo del río Chico (**Palacio-Betancurt**, 2014).

Conclusiones

En el embalse Riogrande II el fitoplancton eucariótico cumple un rol fundamental en la fijación del carbono, lo cual se refleja en los altos valores de biomasa, especialmente de organismos fototróficos. Sin embargo, debido a la eutrofia del sistema y a la pequeña talla del zooplancton dominante en comparación con la de las células algales, el flujo de energía, el de carbono y el de los nutrientes almacenados por las algas parece estar orientado principalmente a la vía detrítica y a las sustancias disueltas y no a los consumidores de niveles tróficos superiores, en este caso, el zooplancton filtrador.

En el fitoplancton analizado, la principal fuente de alimento para el zooplancton dominante parece estar constituida por organismos mixótrofos (Cryptophyta y Euglenophyta). No obstante, suponemos que la biomasa zooplanctónica está sustentada principalmente por algas y bacterias pertenecientes al nanoplancton (2 a 20 μ m) y al picoplancton (<2 μ m), los cuales no fue posible detectar mediante el método de cuantificación empleado, y que, debido a su reducido biovolumen, contienen bajas concentraciones de carbono y nutrientes, aunque probablemente se encuentran en altas concentraciones en el embalse.

Lo anterior conduce a la aceptación parcial de la hipótesis planteada, pues aunque la porción de biomasa (estimada como carbono) disponible para el zooplancton fue inferior al 1 % de la biomasa fitoplanctónica total y estuvo conformada principalmente por las especies agrupadas en Cryptophyta, más que las Chlorophyta, las Euglenophyta constituyeron el siguiente grupo de mayor contenido de carbono.

Los resultados obtenidos resaltan la necesidad de realizar estudios en los cuales se incluyan las fracciones de menor tamaño del fitoplancton y la taxocenosis de bacterioplancton, pues de esta forma se podrán realizar los cálculos necesarios para estimar el metabolismo y las transferencias de energía y carbono en los ecosistemas acuáticos.



Figura 4. Variación de la biomasa media de carbono del fitoplancton (nanoplancton) y de la biomasa media de cladóceros en el embalse Riogrande II. A. Por muestreos. B. Por estaciones

Agradecimientos

Los autores agradecen a las Empresas Públicas de Medellín, por el financiamiento del programa de investigación "Estudio de las condiciones ambientales de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico", del cual hace parte el presente estudio, y a Isabel Cristina Gil por la traducción al inglés.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Bellinger E.G., Sigee D.C. 2010. Freshwater algae. Identification and use as bioindicators. Wiley-Black Well. John Wiley & Sons. p. 271.
- Bogdan, K.G., Gilbert, J.J. 1987. Quantitative comparison of food niches in some freshwater zooplankton. Oecología. 72: 331-340
- **Bourrelly P.** 1970. Les Algues d'Eau Douce. Initiation à la Systématique. Tome III, Les algues blues et rouges: Les Eugléniens, Peridiniens et Cryptomonadines. Éditions N. Boubée. Paris. p. 572.

- Castro, A.J., Bicudo, C.E. de M. 2007. Flora ficológica. Cryptophyceae. Rima. p. 121.
- Cermeño, P., Estévez-Blanco, P., Marañón, E., Fernández, E. 2005. Maximum photosynthetic efficiency of sizefractionated phytoplankton assessed by ¹⁴C-uptake and fast repetition rate fluorometry. Limnol. Oceanogr. 50 (5): 1438-1446.
- Chisholm S.W. 1992. Phytoplankton size. En: Falkowski, P.G & Woodhead, A.D. (Eds.). Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea. Plenum, New York. p. 213-237.
- **Comas A.** 1996. Las Chlorococcales Duliacuícolas de Cuba. Bibliotheca Phycologia, 99. Cramer, Stuttgart. p. 192.
- **Cox E.J.** 1996. Identification of Freshwater Diatoms from live Material. Chapman & Hall, London. p. 168.
- Edwards, K.F., Thomas, M.K., Klausmeier, C.A., Litchman, E. 2012. Allometric scaling and taxonomic variation in nutrient utilization traits and maximum growth rate of phytoplankton. Limnol. Oceanogr. 57 (2): 554-566.
- Gasse F. 1986. East African diatoms. Taxonomy, ecological distribution. Bibliotheca Diatomologica. J. Crammer. Berlin – Stuttgart. p. 201.
- Geller, W., Müller, H. 1981. The filtration apparatus of Cladocera: Filter mesh-sizes and their implications on food selectivity. Oecología. 49: 316-321.
- **Giraldo, M.** 2010. Composición de la dieta del rotífero *Asplanchna girodi* (De Guerne, 1888) y su variación temporal y espacial en el embalse Riogrande II (Antioquia, Colombia). Trabajo de pregrado, Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Gophen, M., Geller, W. 1984. Filter mesh size and food particle uptake by *Daphnia*. *Oecologia*. **64**: 408-412.
- Gosselain, V., Hamilton, P. B. 2000. Algamica: Revisions to a key-based computerized counting program for free-living, attached, and benthic algae. Hydrobiologia. 438: 139-142.
- Hansson, L.A., Tranvik, L.J. 1996. Quantification of invertebrate predation and herbivory in food chains of low complexity. Oecologia. 108: 542-551.
- Hillebrand, H., Duerselen, C.D., Kirschtel, D., Pollingher, U., Zohary, T. 1999. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. J. Phycol. 35: 403-424.
- Huber-Pestalozzi, G. 1968. Das Phytoplankton des Süsswassers. Systematik und Biologie. 3. Teil: Cryptophyceae, Chloromonadophyceae, Dinophyceae. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, Germany. p. ;?.
- Hwang, S.J., Heath, R. 1997. The distribution of protozoa across a trophic gradient, factors controlling their abundance and importance in the plankton food web. J. Plankton Res. 19: 491-518.
- Kerner, M., Ertl, S., Spitzy, A. 2004. Trophic diversity within the planktonic food web of the Elbe Estuary determined on isolated individual species by ¹³C analysis. J. Plankton Res. 26 (9): 1039-1048.

- Kiørboe, T. 1993. Turbulence, phytoplankton cell size, and the structure of pelagic food webs. Adv. mar. Biol. 29: 1-72.
- Komárek J., Fott B. 1983. Das Phytoplankton des SüBwassers. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart. p. 1044.
- Krevš, A., Koreivienė, J., Mažeikaitė, S. 2010. Plankton food web structure during cyanobacteria bloom in the highly eutrophic Lake Gineitiškės. Ekologija. 56 (1/2): 47–54.
- Lampert, W., Sommer, U. 1997. Limnoecology: The ecology of lakes and streams. Oxford University Press. New York. p. 382.
- Li-W, K.W. 2002. Macroecological patterns of phytoplankton in the northwestern North Atlantic Ocean. Nature. **419**: 154-157.
- López-Muñoz, M.T. 2015. Aspectos taxonómicos y ecológicos del fitoplancton eucariótico del embalse Riogrande II (Antioquia, Colombia). Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Instituto de Biología. Programa de Posgrado. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Lund, G., Kippling, C., Le Cren, E.D. 1958. The inverted microscope method of estimating algal numbers and analysis statistical basis of estimation by counting. Hidrobiologia. 11: 143-170.
- Marañón, E., Cermeño, P., Rodríguez, J., Zubkov, M.V., Harris, R.P. 2007. Scaling of phytoplankton photosynthesis and cell size in the ocean. Limnol. Oceanogr. 52 (5): 2190-2198.
- Medina-Sánchez J.M. 2002. El eslabón fitoplancton bacteria en un ecosistema de alta montaña: estructura, función y regulación. Tesis doctoral, Departamento de Biología animal y ecología. Universidad de Granada, España.
- Menden-Deuer, S., Lessard, E.J. 2000. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton. Limnol. Oceanogr. 45 (3): 569-579.
- Moustaka-Gouni, M., Vardaka, E., Michaloudi, E., Kormas, K.A., Tryfon, E., Mihalatou, H., Gkelis, S., Lanaras, T. 2006. Plankton food web structure in a eutrophic polymictic lake with a history in toxic cyanobacterial blooms. Limnol. Oceanogr. **51** (1/2): 715-727.
- Moss, B., Mckee, D., Atkinson, D., Collings, S.E., Eaton, J.W.,
 Gill, A.B., Harvey, I., Hatton, K., Heyes, T., Wilson,
 D. 2003. How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms. Journal of Applied Ecology. 40: 782-792.
- Palacio-Betancurt H.M. 2014. Dinámica espacio-temporal de las cianobacterias en el embalse Riogrande II. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Instituto de Biología. Programa de Posgrado. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Prescott G.W., Croasdale H.T., Vinyard W.C. 1972. North American Flora. The New York Botanical Garden. p. 84.
- Prescott G.W., Croasdale H.T., Vinyard W.C. 1975. A Synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermae. Section 1. University of Nebraska Press. USA. p. 275.

- Prescott G.W., Croasdale H.T., Vinyard W.C., Bicudo C.E. de M. 1982. A Synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermae. Section 4. University of Nebraska Press. USA. p. 700.
- **R Core Team.** 2015. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL. http://www.R-project.org.
- Ramírez, J.J., Arcila, M.C., Sepúlveda, S.C. 2015. Cuantificación de los componentes que afectan el coeficiente de atenuación vertical para irradiancia descendente en el embalse Riogrande II (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 39 (151): 228-238.
- Rocha, O., Duncan, A. 1985. The relationship between cell carbon and cell volume in freshwater algal species used in zooplanktonic studies. J. Plankton Res. 7 (2): 279-294.
- Rodríguez, J. 1994. Some comments on the size-based structural analysis of the pelagic ecosystem. Sci. Mar. 58 (1-2): 1-10.
- Rodríguez-Martínez J. 2010. Ecología. 2° Edición. Ediciones Pirámide. Madrid, España.
- Ros J. 1979. Prácticas de Ecología. Ed. Blume. Barcelona, España.
- Sigee D.C. 2004. Freshwater Microbiology: Diversity and dynamic interactions of microorganisms in the aquatic environment. Chichester, UK, John Wiley & Sons. p. 544.
- Teiling E. 1967. The desmid genus Staurodesmus. A taxonomic study. Arkiv För. p. 629.
- Tell G., Conforti V. 1986. Euglenophyta pigmentadas de la Argentina. Bibliotheca Phycologica, 75: Berlin-Stuttgart, Ed. Cramer. p. 301.

- Toro, M., Moreno, A., Chalarca, D., Grajales, H. 2013. Dinámica ambiental de los nutrientes (especies químicas del nitrógeno, fósforo y sílice) en los embalses La Fe, Riogrande II y Porce II a través de modelos conceptuales y matemáticos, como herramienta de gestión de la calidad de agua en los tres sistemas. En: Palacio J (ed), Informe técnico embalse Riogrande II "Estudio de la problemática ambiental de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico". Universidad de Antioquia, Universidad Nacional sede Medellín, Empresas. Públicas de Medellín. Medellín: 242-297.
- Utermöhl, H. 1958. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton-methodik. Mitt int. Ver. Limnol. 9: 1-38.
- Villabona-González S.L. 2015. Relaciones ecológicas de la biomasa de las poblaciones de rotíferos y microcrustáceos en la zona fótica del embalse Riogrande II, Antioquia, Colombia. Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Instituto de Biología. Programa de Posgrado. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Vollenweider R.A. 1969. A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments. I.B.P. Handbook 12. Davis F.A. Co. Blackwell Sci. Pub. Oxford. p.213.
- West W., West G.S., Carter N. 1923. A Monograph of the British Desmidiaceae. Vol. 5. The Ray Society. London. p. 299.

Artículo de posesión

Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamerica

Gabriel Roldán-Pérez

Grupo de Investigación de Limnología y Recursos Hídricos, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro de número a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 6 de abril de 2016

Resumen

La comunidad de macroinvertebrados acuáticos mejor estudiada en Colombia es la entomofauna. Los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera son los mejor conocidos en cuanto a su taxonomía, ecología y su utilización como bioindicadores de la calidad del agua. Es necesario profundizar en el estudio de algunos grupos como los anélidos, moluscos, ácaros y dípteros, de los cuales aun falta conocimiento de su taxonomía y autoecología. El índice BMWP (Biological Monitoring Working Party), desarrollado en Europa en el siglo XX a partir de la década de los años setenta, es muy popular en Colombia y Latinoamérica, pero es necesario hacer adaptaciones para las diferentes regiones en el continente. Este trabajo presenta una revisión de los estudios realizados durante las últimas cuatro décadas en Colombia, y de manera general en Latinoamérica. Se presenta el estado actual del conocimiento de los diferentes grupos de los macroinvertebrados acuáticos en terminos de la resolución taxonómica, los aspectos ecológicos y su utilización como bioindicadores de la calidad del agua. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: macroinvertebrados, bioindicacion, índice BMWP, Colombia.

Macroinvertebrates as bioindicators of water quality: four decades of development in Colombia and Latin America

Abstract

Entomofauna is the community of aquatic macroinvertebrates best studied in Colombia. Ephemeroptera, Trichoptera, and Plecoptera orders are the better known in the taxonomy, ecology and their use as bioindicators of water quality. It is necessary to deepen the study of some groups such as annelids, molluscs, mites and dipterans, which still lack knowledge of their taxonomy and autoecology. The BMWP (Biological Monitoring Working Party) index, developed in Europe in the twentieth century in the early seventies, is very popular in Colombia and Latin America, but it is needed to make more detailed adjustments for different regions on the continent. This paper presents a review of studies conducted during the last four decades in Colombia in particular, and more generally, in Latin America. The current state of knowledge of the different groups of aquatic macroinvertebrates in terms of taxonomic resolution, environmental aspects and its use as bioindicators of water quality analyzes is presented. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Macroinvertebrates, bioindication, BMWP index, Colombia.

Introducción

Los macroinvertebrados acuáticos son todos aquellos organismos que viven en el fondo de ríos y lagos, adheridos a la vegetación acuática, troncos y rocas sumergidas. Sus poblaciones están conformadas por platelmintos, insectos, moluscos y crustáceos principalmente. Se les denomina macroinvertebrados, porque su tamaño va de 0.5mm hasta alrededor de 5.0mm, por lo que se les puede observar a simple vista. Es un hecho que la composición de las comunidades de macroinvertebrados refleja la calidad de los ecosistemas acuáticos; por ello, los métodos de evaluación basados en dichos organismos han sido ampliamente utilizados desde hace varias décadas como una parte integral del monitoreo de la calidad del agua. Los países de la Unión Europea y Norte América han sido los líderes en este proceso (Gaufin y

Tarzwell, 1952; **Hynes**, 1959; **Resh** *et al.* 1995. Los estudios basados en esta metodología han permitido un conocimiento del estado ecológico de los ríos y lagos europeos, lo cual sirvió de base para lograr una sorprendente recuperación de éstos ecosistemas en los últimos 20 años.

De acuerdo con el conocimiento que se tenga de la fauna acuática en cada país, esta evaluación podrá hacerse en diferentes niveles de precisión. Los indices son una de las formas numéricas biológicas que generan informacion y criterios para la evaluación de la contaminacion, basados en

Correspondencia:

Gabriel Roldán-Pérez, groldan@uco.edu.co Recibido: 9 de febrero de 2016 Aceptado: 25 de abril de 2016 la integridad ecológica. Estos índices pueden ser unimétricos, multimétricos, multivariados y de rasgos biológicos. Los índices multimétricos combinan en una puntuacién final el valor independiente de diversas métricas, que pueden ser simples o indices bióticos. Alemania que ha tenido una tradición más larga en el conocimiento de su flora y fauna acuática, ha adoptado el método saprobio, el cual requiere para su aplicación la identificación de los organismos hasta el nivel de especie. Otros países, como Bélgica, Francia, Gran Bretaña, Italia, Portugal, Dinamarca, Holanda e Irlanda, han adoptado sistemas de evaluación basados en el nivel de ordenes, familias y en algunos casos de géneros. Para la denominada "evaluación rápida del ecosistema", se ha comprobado su efectividad en un alto porcentaje, además de una considerable reducción de costos y de tiempo (De Pauw y Hawkes, 1993; Roldán, 2003). Statzner et al. (2001) discuten las perspectivas para el biomonitoreo en escalas espaciales como una unidad de medida de la composición funcional de las comunidades de macroinvertebrados. Mendes et al. (2014) proponen combinar el uso de las diatomeas con los macroinvertebrados en la evaluación de la calidad del agua.

La evaluación de la calidad del agua se ha realizado tradicionalmente basada en los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos. Sin embargo, en los últimos años, muchos países han aceptado la inclusión de los macroinvertebrados para evaluar la calidad de los ecosistemas acuáticos. Para el ecólogo, un ecosistema acuático es un sistema funcional en el cual hay un intercambio cíclico de materia y energía entre los organismos vivos y el ambiente abiótico. Por lo tanto, la biología y la química, están estrechamente relacionadas; en la evaluación de las aguas naturales y contaminadas juegan papeles complementarios.

Desarrollo histórico de la bioindicacion de la calidad del agua

La utilización de los organismos acuáticos como bioindicadores de la calidad de los ecosistemas acuáticos comienza en Europa mediados del siglo XIX. Kolenati (1848) y Cohn (1853), encontraron relaciones entre ciertas especies y el grado de calidad del agua. En el siglo XX, Kolkowitz & Marsson (1908, 1909) propusieron el sistema saprobio para Alemania, que actualmente es adoptado en otros países europeos. Patrick (1949, 1950) desarrolla métodos biológicos para evaluar las condiciones ecológicas de las corrientes en Norteamérica y Gaufin y Tarzwell (1952) proponen los macroinvertebrados como indicadores de contaminación. El sistema limnosaprobio es introducido en Checoeslovaquia por Sládeček (1962). Hynes (1959,1963) propone los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua. Illies y Botosaneau (1963) discuten la zonación de las aguas corrientes y proponen los términos de ritrón y potamón para referirse a las zonas altas y bajas de los ríos; este trabajo se considera un clásico de la limnología europea.

El concepto de diversidad de especies basado en índices matemáticos derivados de la teoría de la información, comienza a aplicarse en los años cincuenta y sesenta. (Shannon & Weaver, 1949; Brillouin, 1951; Margalef, 1951; Beck, 1955; Wilhm & Dorris, 1966; 1968; y Wilhm, 1967, 1968). Dicha teoría parte de la base, que mientras mayor información se tenga acerca de un hecho, suceso o situación, mayor y más preciso será el entendimiento que se tenga de él. Washington (1984) hace una revisión de los índices de diversidad, bióticos y de similitud con especial referencia a los ecosistemas acuáticos. Presenta18 índices de diversidad, 19 índices bióticos y cinco índices de similitud y analizó su aplicabilidad a los sistemas biológicos.

Resh *et al.* (1995) desarrollaron en Maryland (Estados Unidos) métodos rápidos de evaluación de la calidad del agua usando los macroinvertebrados como bioindicadores. Tanto este método como el del Reino Unido valoran las condiciones del hábitat y predicen la fauna esperada en un determinado sitio. **Trihadiningrum** *et al.* (1996) utilizaron los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua en Indonesia. **Alba-Tercedor** (1996, 1988) adoptó la utilización de los macroinvertebrados acuáticos en los programas de evaluación de la calidad del agua en España, utilizando para ello el índice BMWP' (Biological Monitoring Water Party) adaptado para la Península Ibérica. **Towsand & Scarsbrook** (1997) calificaron la perturbación en las corrientes en relación con las características de los macroinvertebrados y la riqueza de dichas especies.

Lorenz, et al., (1997) desarrollan un sistema de bioindicadores en el río Rin (Alemania) con base en conceptos teóricos que describen los ríos naturales, entre los cuales se consideran la zonación, la hidráulica, el espiral de nutrientes, la jerarquía de tributarios y el concepto de río continuo, entre otros. Munné et al. 1998) proponen un índice de calidad en España que valora el estado de calidad de conservación del bosque de ribera (QBR). De Pauw & Hawkes (1993) analizan el desarrollo de la bioidicación en la Unión Europea a partir de la década de los años setenta y en especial de los noventa. La tabla 1 muestra la aplicación de los principales métodos para la evaluación de la calidad del agua en la Unión Europea basada en los macroinvertebrados acuáticos. Nótese la simplicidad de los diferentes métodos, los cuales son cualitativos y cómo la identificación de los organismos sólo llega hasta el nivel de familia en la mayoría de los casos. Es importante hacer énfasis que el método consiste en una evaluación rápida del ecosistema y que en ningún momento pretende definir los requerimientos ambientales a nivel de especie.

Birk & Herring (2006) hacen una comparación directa de los métodos de valoración usando los macroinvertebrados como bioindicadores. **Carsten et al.** (2007) discuten los índices de calidad del agua en Europa como indicador de un buen estado ecológico. Tambien existe el Indice de Integridad Biótica (IIB o IBI) o Indice de Integridad Biológica, el cual es una herramienta multimétrica para identificar y clasificar los problemas de contaminación del agua.
País	Método de indicación	Muestreo	Muestreo Análisis Identificación ¹		Estándar ²	Rango
Bélgica	BBI	Cualitativo	Cualitativo	O F G	Ν	0-10
Dinamarca	D F I	Cualitativo	Cualitativo	F G S	Ν	1-4
Francia	I B G N	Cuant/Cual	Cuant/Cual Cualitativo F		Ν	0-20
Alemania	BEOL/S	Cualitativo	Cuantitativo	S	Ν	0-100/1-4
Irlanda	Q – rating	Cualitativo	Cualitativo	F G S	Ν	0-5
Italia	EBI	Cualitativo	Cualitativo	O F G	R	0-14
Luxemburgo	I B	Cualitativo	Cualitativo	O F	Ν	0-10
Holanda	K 135	Cualitativo	Cualitativo	F G S	R	100-500
Portugal	BBI	Cualitativo	Cualitativo	O F G	-	0-10
España	BMWP'	Cualitativo	Cualitativo	F	-	0->150
Reino Unido	BMWP/ASPT	Cualitativo	Cualitativo	F	Ν	0->150/0-10

Tabla 1. Aplicación de los principales métodos de bioindicación para la evaluación de las aguas corrientes en los países de la Unión Europea con base en los macroinvertebrados (De Pauw y Hawkes, 1993).

O = Orden, F = Familia; G = Género; S = Especie 2. N=Nacional, R= Regional

Estado actual del conocimiento sobre los macroinvertebrados acuáticos en Colombia

Los primeros estudios de macroinvertebrados acuáticos en Colombia se iniciaron en la década de los años setenta (**Roldán** *et al.*1973; **Pérez & Roldán**, 1978). Las identificaciones preliminares se realizaron con base en las claves disponibles en esa época, desarrolladas en su mayoría por especialistas norteamericanos y europeos. Una vez verificado el primer reporte con especialistas, se encontró que la mayoría del material estaba incorrectamente identificado, pues las claves de estos autores estaban hechas para zonas templadas. Era por lo tanto, necesario elaborar claves con base en las recolectas hechas en el territorio colombiano.

Al inicio de la década de 1980 y con el apoyo de entomólogos americanos, se comenzó la elaboración de claves taxonómicas para cada uno de los grupos de macroinvertebrados acuáticos presentes en Colombia. En este proyecto participaron estudiantes del Programa de Biología en la Universidad de Antioquia, quienes aportaron a través de sus trabajos de pregrado valiosa información al conocimiento de los diferentes órdenes de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos. Como producto de estos estudios **Roldán** (1988) publicó la "*Guía para el Estudio de los Macroinvertebrados Acuáticos del Departamento de Antioquia*", trabajo que sirvió de referencia para el inicio del conocimiento de las comunidadesde estos organismos en diferentes regiones de Colombia y de Latinoamérica.

Estudios taxonómicos

El conocimiento de la taxonomía de los macroinvertebrados en los ecosistemas acuáticos es todavía incompleto en Colombia. Los grupos mas utilizados en evaluaciones de la calidad del agua corresponden a taxones de la entomofauna como efemerópteros, tricópteros, plecópteros y coleópteros. **Perla** *et al.* (2014) llevan acabo un extenso análisis del estado de conocimiento de los macroinvertebrdos acuáticos dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico. **Roldán** *et al.* (2014) escriben en esta publicación el Capitulo para Colombia, cuyo contenido es hasta el presente el documentado más completo para nuestro país. A continución se hace una revisión del estado actual de cada uno de los diferentes taxones.

Phylum Platyhelmintes

Los primeros reportes de los turbelarios de agua dulce en Colombia fueron hechas por **Fuhrmann** (1914), **Furmann** & Mayor (1914) y Ball (1969, 1980). El género *Dugesia* (Planariidae) es reportado para los ríos Medellín y Rionegro en aguas poco contaminadas (**Roldán** *et al.* 1973, Pérez & **Roldán** 1978). **Muñoz & Vélez** (2007) reportaron en 22 sistemas acuáticos del centro y sur oriente del departamento de Antioquia las especies *Girardia cameliae*, *G. paramensis* y *G. tigrina* (Dugesiidae).

Phylum Annelida

La subclase Hirudinea es un grupo que se encuentra principalmente en ambientes acuáticos degradados, ricos en carga orgánica residual y baja disponibidad de oxígeno disuelto. Los primeros reportes de hirudíneos colombianos en ecosistemas acuáticos de diferentes regiones, incluida la zona altoandina de los páramos, fueron hechos por **Weber** (1913), **Michaelsen** (1913-1914) y **Ringuelet** (1972, 1974, 1975). **Gaviria** (1993) elabora una clave para las familias Naidae y Tubificidae (*Tubifex*) presentes en Colombia.

Phylum Arthropoda

Clase Insecta

Orden Ephemeroptera. Los primeros estudios en Colombia se realizaron en el departamento de Antioquia, con énfasis en su taxonomía y distribución en diferentes gradientes altitudinales (**Roldán**, 1980, 1985, 1988). Posteriormente, diferentes autores contribuyeron en al avance del conocimiento del orden en varias regiones del país, mediante el registro y descripción de nuevos géneros y especies, particularmente de las familias Leptohyphidae, Baetidae, Leptophlebiidae y Polymitarciydae (**Muñoz & Ospina**, 1999; **Muñoz**, 2000; **Mosquera** *et al.* 2001; **Domínguez** *et al.* 2002, 2009; **Domínguez & Zúñiga**, 2003, 2009; **Camargo & Rozo**, 2003; **Molineri**, 2010; **Molineri** *et al.* 2002, 2011; **Molineri & Zúñiga**, 2004, 2006; **Gutiérrez & Reinoso** 2010; **Salinas** *et al.*2011; **Días** *et al.* 2011; **Forero** *et al.* 2013 y **Forero & Reinoso**, 2013).

El Orden Ephemeroptera contiene las familias Baetidae, Caenidae, Coryphoridae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Leptohyphidae, Leptophlebiidae, Oligoneuriidae y Polymitarcyidae. Las familias Baetidae, Leptophlebiidae y Leptohyphidae son las de mayor distribución y diversidad y la región natural andina es la que cuenta con el mayor número de registros específicos (**Roldán**, 1988; **Reinoso**, 1999; **Zúñiga, et al.** 2004, **Gutiérrez & Reinoso**, 2010). A nivel sudamericano se encuentra disponible una publicación que recopila la información sobre las ninfas y los imagos del orden en la región y que incluye aspectos taxonómicos, ecológicos y de distribución (**Domínguez & Fernández**, 2009).

Orden Odonata. Los primeros reportes en el país fueron hechos por Williamson (1918a, b, 1919, 1920); Navas, 1935 y Hincks, 1934). Trabajos sobre la taxonomía, la riqueza de este orden y su distribución en algunas regiones como Antioquia, distrito de Santa Marta, Valle del Cauca, Boyacá y las zonas del pacífico y el atlántico, fueron realizados por Arango & Roldán, (1983); Cruz, (1986); Suárez, (1987); De Marmels (1982a,b, 2001); Novelo-Gutiérrez (1995a.b): Ramírez (1996): Ramírez & Novelo-Gutiérrez (1999); Pérez (2003); Ceballos (2004); Astudillo (2005); Bermúdez (2005), Palacino-Rodríguez (2009); Urrutia (2005); Altamiranda-Saavedra et al. (2010) y Garzón & Realpe (2009). Rodríguez (2009), evaluó los anisopteros depositados en la Colección del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia y Amaya-Perilla & Palacino-Rodríguez (2012) publican una lista de los odonatos del departamento del Meta.

En años recientes, diferentes autores ampliaron el registro y la distribución de las familias y géneros conocidos para Colombia y describieron nuevas especies asociadas con sus correspondientes estados adultos (**Pérez-Gutiérrez**, 2003, 2007; **Pérez** *et al.* 2007; **Bermúdez & López**, 2009; **Montes-Fontalvo & Pérez-Gutiérrez**, 2011a, b, **Amaya-Vallejo & Novelo-Gutiérrez**, 2011 y **Rojas-Riaño**, 2011). En Colombia, igual que para Sur América, la mayor riqueza de especies está en las familias Libellulidae (Anisoptera) y Coenagrionadae (Zigoptera). Sin embargo, el conocimiento sobre su distribución, los requerimientos del hábitat y la ecología están poco documentados (**von Ellenrieder & Garrison**, 2009). **OrdenPlecoptera.** Los trabajos realizados durante la última década han contribuido a incrementar el conocimiento de la diversidad y la distribución del orden en el país. Plecoptera está representado por la familia Gripopterygidae y el género *Claudioperla*, es registrada para los Andes del sur de Nariño (**Barreto** *et al.* 2005, **Zúñiga** *et al.* 2009) y Perlidae, con los géneros *Klapalekia* (conocido en los Andes orientales de la Sabana de Bogotá), *Anacroneuria* dominante en Colombia y el Neotrópico y *Macrogynoplax*, registrado únicamente en tierras bajas de la región amazónica (**Zúñiga & Stark**, 2007; **Zúñiga** *et al.* 2001, 2007). El registro actual de *Anacroneuria* muestra una amplia distribución altitudinal (50-3600 msnm), la mayoría de ellas citadas para la región natural andina y pacífica y en menor proporción para la caribe y la amazónica.

Varios autores contribuyeron en los últimos años al avance del conocimiento del orden, mediante la descripción de nuevas especies y el registro y ampliación del ámbito de distribución para los géneros y las especies, particularmente de la familia Perlidae (**Rojas & Baena**, 1993; **Zamora & Rossler**, 1995, 1997; **Stark** *et al*. 1999, 2002, 2009; **Stark y Zúñiga**, 2003; **Zúñiga & Stark**, 2002, 2007; **Zúñiga** *et al*. 2007, 2009; **Zúñiga**, 2010 y **Bohórquez** *et al*. 2011). Claves taxonómicas para la identificación de los estados inmaduros y los individuos adultos del orden en Sur América y Colombia se encuentran en **Stark** *et al*. (1999, 2009) y **Froehlich** (2009).

Orden Hemiptera. Son los insectos conocidos popularmente como chinches de agua. Se distinguen, los semiacuáticos (infraorden Gerromorpha) que viven en la película superficial del agua y los verdaderos heteróptera acuáticos (infraorden Nepomorpha), bajo la superficie del agua. Los registros pioneros del grupo fueron hechos por Roback & Nieser (1974) en los llanos orientales y Álvarez & Roldán (1983) en Antioquia. Las familias de mayor frecuencia y riqueza específica son Naucoridae y Veliidae. Entre los Heteroptera, los Gerromorpha constituyen el grupo mejor conocido en el país. Aristizábal (2002) estudió los taxones de este infraorden en la película superficial del agua. Molano et al. (2005) reportan un listado de las especies de Gerromorpha, con información sobre su distribución geográfica y altitudinal. Aportes importantes al conocimiento de los heterópteros en Colombia y la descripción de nuevas especies fueron hechas por (Polhemus & Manzano, 1992; Polhemus & Polhemus, 1995; Padilla & Nieser, 2003; Padilla, 2010a,b, 2012a,b; Molano & Camacho, 2006; Morales-Castaño & Molano-Rendón, 2008; Posso & González, 2008; Mazzucconi et al. 2009 y Sites & Álvarez, 2010). Es de destacar la producividad científica de Dora P. Padilla en los últimos años (Padilla, 2013, 2014, 2015 y 2016; Parra-Trujillo et al. 2014). Esta información está relacionada especialmente con los departamentos de Antioquia, Risaralda, Quindío, Nariño, Valle del Cauca, centro y suroccidente del país.

Orden Coleoptera. Es un grupo megadiverso en la zona Neotropical, con representantes acuáticos o semiacuáticos en la vegetación litoral. Los primeros trabajos fueron hechos por Wooldrige (1973, 1976), con énfasis en la descripción de nuevas especies y registros de los géneros en el norte del país, cuenca del Río Cauca y Magdalena y el Urabá antioqueño. Las familias de mayor abundancia y riqueza son Elmidae, Ptilodactylidae y Psephenidae y, en general, están asociadas a aguas de buena calidad ambiental (Roldán, 2003; Arias-Díaz et al. 2007; Zúñiga & Cardona 2009). Otros autores contribuyeron con el conocimiento del grupo en la región Neotropical, afín con la fauna de coleópteros del país (Spangler, 1981 y Spangler & Santiago, 1987, 1992). Posteriormente, Machado (1988), Roldán (1988), Ramos (1997), Manzo (2005, 2006), Caupaz-Flórez et al. (2006), Arias Díaz et al. (2007) y Gutiérrez et al. (2009), aportaron información a la riqueza del orden, especialmente en los departamentos de Antioquia, Tolima, Valle del Cauca, suroccidente y centro del país. Elmidae fue la familia de mayor diversidad y ámbito de altura, con predominio de los géneros Heterelmis, Macrelmis, Cylloepus, Microcylloepus, y Disersus.

Orden Megaloptera. La familia Corydalidae y el género *Corydalus* es la registrada con mayor frecuencia (**Roldán**, 2003; **Zúñiga & Cardona**, 2009). **Contreras-Ramos** (1998) contribuyó al conocimiento del orden en Colombia con nuevos registros de distribución y la descripción de nuevas especies de *Corydalus* presentes en el país. **Contreras-Ramos** (2009) elaboró una clave taxonómica ilustrada para larvas y adultos para este orden en Sur América y una sinópsis de las familias Croydalidae y Sialidae, información válida para los taxones que se encuentran en Colombia.

Orden Trichoptera. Los primeros estudios fueron realizados por Correa et al. (1981). Hydropsychidae es la familia de mayor distribución y diversidad en Colombia, seguida de Leptoceridae e Hydroptilidae (**Reinoso**, 1999; Muñoz, 2004; Guevara et al. 2005, 2007a, b; Reinoso et al. 2007, 2008; Vásquez et al. 2010; Vásquez & Reinoso 2012 y Vásquez et al. 2013, 2014). En las últimas décadas varios autores contribuyeron al registro y la descripción de nuevos géneros y especies que existen en Colombia con énfasis en la región natural andina, particularmente de las familias Hydropsychidae, Leptoceridae e Hydroptilidae (Flint, 1978; Flint & Wallace, 1980; Holzenthal, 1988a, b; Holzenthal & Flint, 1995; Holzenthal & Blahnik, 1995; Blanik, 1998 y Muñoz-Quesada, 1997). Flint (1991) publica un estudio sobre los tricópteros de Antioquia y describe una nueva especie Mortoniella roldani (en reconocimiento al autor de este artículo). Claves taxonómicas para la identificación de las formas inmaduras y los individuos adultos de Trichoptera presentes en Colombia, solo están documentadas regionalmente en Antioquia (Roldán, 1988; Flint, 1991 y Posada & Roldán, 2003). La información consignada por Angrisano & Sganga (2009) a nivel sudamericano y neotropical y **Springer** *et al.* (2010) en Costa Rica, incluyen varios taxones que se encuentran en Colombia.

Orden Lepidoptera. Es un grupo aun poco estudiado; los primeros reportes fueron hechos por **Berg** (1871) sobre la familia Piralidae. **Dyar** (1914) reporta los lepidópteros de la zona del Canal de Panamá. **Romero & Navarro** (2009) aportaron información sobre las familias más comunes con representantes acuáticos o semiacuátios y elaboraron una clave taxonómica ilustrada para larvas y adultos de estos taxones en Suramérica, varios de ellos presentes en Colombia.

Orden Diptera. Es un grupo megadiverso; Welkenson (1979) reportó los Tabanidae de los departamentos del Chocó, Valle del Cauca. Bedoya & Roldán (1984) realizaron evaluaciones sobre la riqueza y la distribución altitudinal de los estados larvarios de las familias del orden en el departamento de Antioquia. Wayne & Hogue (1986) reportan una nueva especie de Ephydridae Diedrops roldanorum, Hogue & Bedoya (1989) describen una nueva especie de Blephariceridae en Antioquia Paltostima roldani, y Hogue (1990) reporta una nueva especie de Blephariceridae Maruina roldanorum; (estas tres especies fueron nominadas en reconocimiento al autor de este artículo). Lizarralde de Grosso (2009) reportó las principales familias de dípteros acuáticos conocidos para Sudamérica, varias de ellas frecuentes en cuerpos de agua del país. Información sobre los trabajos con las familias Simuliidae y Ceratopogonidae, con representantes en el medio acuático, se encuentran en la serie Aquatic Biodiversity in Latin América-ABLA (Coscarón & Coscarón-Arias, 2007 y Borkent & Spinelli, 2007).

La familia Chironomidae constituye parte importante de la biomasa de los ambientes lóticos y lénticos y tiene un papel determinante en los ciclos tróficos y el procesamiento de los detritus (**Ospina** *et al.* 1999; **Paggi**, 1999). **Abril & Parra** (2007) y **Posada-García** *et al.* (2008) generaron información sobre la familia con base en el análisis de los huevos, las larvas, las pupas y los individuos adultos de los sistemas lénticos y lóticos del Páramo de Frontino (3500-4000 msnm). Con base en información de la sabana de Bogotá, **Ospina** *et al.* (1999) y **Ruiz** *et al.* (2000a, b) elaboraron guías taxonómicas ilustradas para la identificación de genéros de Chironominae, Tanypodinae, Podonominae y Diamesinae. **Wiedembrug & Ospina** (2005) publican una clave para la identificación de exhuvias de Tanytarsini (Chironmidae) neotropicales.

Phylum Arthopoda

Clase Arachnoidea

Aún no hay un estudio sistemático de este taxón para Colombia. Algunos registros pioneros de los ácaros acuáticos del país fueron hechos por **Walter** (1912), **Lundblad** (1953) y Viets (1956). Recientemente, Rosso de Ferradás & Fernández (1995, 2005, 2009) publicaron un listado de las especies con datos biogeográficos y claves taxonómicas ilustradas para las principales familias y géneros de los ácaros acuáticos (Hydrachnidia) de Sur América.

Clase Crustacea

A esta clase pertenecen los cangrejos de agua dulce. Este grupo de macroinvertebrados, en especial del orden Decapoda es el mejor conocido. Rodríguez (1972), describe Brachyura, Trichodactylidae de Venezuela y Colombia. Rodríguez (1981) distingue dos familias Trichodactylidae de zonas geográficas bajas y Pseudothelpusidae de regiones de montaña y Rodríguez (1985) describe los Pseudothelphusidae de Colombia. Von Prahl (1988) reporta los cangrejos de agua dulce del departamento de Antioquia. Rocha (1994) realiza una extensa revisión de la Familia Pseudothelpusidae, género Neostrengeria en la cordillera oriental de Colombia. Campos (2003), hace la revisión del género Hypolobocera (Pseudothelphusidae); Watling, (2003), reporta una nueva especie de Hyalella para Colombia; Valencia & Campos (2007) evalúan el género Macrobrachium (Palaemonidae); Campos & Guerra (2008), establecen la propuesta de sinonimia para las especies de cangrejo dulceacuícola Hypolobocera solimanie - Hypolobocera triangula de Colombia, y Arteta-Bonivento (2009) hace un estudio sobre los cangrejos en el delta del Río Rancheria, Colombia.

Phylum Mollusca

Los primeros registros los realizó **Fuhrmann & Mayor** (1914) a partir de su viaje de exploración científica en Colombia. Posteriormente, **Patiño-González (Hermano Daniel)** (1941), **Pilsbry** (1955), **Prain** (1956), **Malek & Little** (1971), aportaron al conocimiento del grupo, mediante la descripción de nuevas especies en diferentes familias. En años recientes, **Soler** (1983) y **Gómez & Velásquez** (1999), contribuyeron al estudio taxonómico y ecológico de los caracoles pulmonados de agua dulce en la sabana de Bogotá y los moluscos de la reserva ecológica del Cerro San Miguel en Medellín.

Estudios ecológicos

Los trabajos pioneros sobre la ecología acuática en Colombia se iniciaron en los años setenta con los estudios sobre la contaminación del río Medellín y otras corrientes de agua en el departamento de Antioquia (Roldán et al. (1973); Pérez& Roldán, (1978); Matthias & Moreno, (1983). Posteriormente Quintero & Rojas (1987), Rojas et al. (1995); Rojas & Zúñiga (1996); Zamora (1996, 2002); Zúñiga et al. (1997), Ballesteros et al. (1997), Ramos (1997), Roldán (2001), Urrutia (2005), Gutiérrez et al. (2009), García et al. (2009), Zúñiga (2010) y Giraldo (2012), registraron en el Valle del Cauca y la región suroccidental la fauna de Ephemeroptera, Trichoptera, Odonata y Coleoptera, su distribución altitudinal, los aspectos ecológicosy la relación con la calidad del agua y el hábitat. **Chará** *et al.* (2009) y **Giraldo** (2012) evaluaron la composición de la comunidad de los macroinvertebrados bentónicos en las corrientes de bajo orden en el sur y centro del país.

Zamora (1995, 1996, 2002, 2010) y Serna & Zamora (2004) analizaron la similitud de la comunidad de macroinvertebrados bentónicos entre los ecosistemas lénticos ubicados en la costa pacífica caucana y el piedemonte amazónico, así como también los diferentes aspectos ecológicos y biogeográficos de las corrientes hídricas del departamento del Cauca. Guevara-Cardona et al. (2005), Arias et al. (2007), Guevara-Cardona et al. (2007a, b), Vásquez-Ramos & Reinoso-Flórez (2012), reportaron la estructura y distribución de coleópteros y tricópteros y su relación con la calidad del agua en varias corrientes del departamentos del Tolima. Casas et al. (2006) analizaron la composición y la distribución de los efemeropteros en algunos ríos del Chocó. Rincón (1996, 1999) y Romero et al. (2006) describen la distribución espacial y altitudinal de los tricópteros en los Andes orientales y Rincón & Castro (2008) analizan el efecto del caudal sobre los patrones de emergencia de los individuos de este orden.

La estructura de la comunidad de Trichoptera y su dinámica espacio-temporal en un gradiente altitudinal de la cuenca del río Manzanares fue estudiada por Serna (2003); Rúa-García (2012) reportó la composición y distribución de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en cuatro ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta. Pérez & Gutiérrez (2003) realizan el estudio biotaxonómico de los odonatos del distrito de Santa Marta, Rodríguez et al. (2011) evaluaron los grupos funcionales alimentarios de macroinvertebrados acuáticos en el río Gaira y Aguirre-Pabón et al. (2012) estudiaron la deriva de macroinvertebrados acuáticos en el río Gaira. Ballesteros (2004), Tamaris-Turizo et al. (2007), Tamaris-Turizo & Sierra-Labastidas (2009), Zúñiga (2010) y Bohórquez et al. (2011), aportaron al conocimiento del microhábitat, los hábitos alimentarios, los patrones de emergencia y la producción secundaria para el orden Plecoptera en la zona andina del suroccidente y el caribe colombiano. Rincón (2002) analizó las preferencias de diferentes taxones de insectos acuáticos por los microhábitats disponibles en una pequeña corriente altoandina de Boyacá. Realpe (2009), determinó la diversidad del genero Ischnura (Odonata: Coenagronidae) y su relación con la altitud y orogenia de la Cordillera Oriental.

Zamora *et al.* (1996) evaluaron la composición de las comunidades de los macroinvertebrados acuáticos en pequeñas corrientes en la isla de Gorgona. Longo *et al.* (2004, 2005, 2009, 2010) analizaron la composición, la riqueza, la densidad, la diversidad y la equidad de la comunidad de macroinvertebrados y el ensamblaje de insectos acuáticos en la Isla Gorgona y su relación con las variables físicas,

químicas e hidráulicas. **Longo** *et al.* (2009) y **Longo & Blanco** (2009), analizaron las variables ambientales, físicas y químicas que influyeron en la composición y la estructura del ensamble de la entomofauna acuática en dicha isla.

Chará-Serna *et al.* (2010, 2012), evaluaron mediante análisis de contenido estomacal la dieta de la entomofauna asociada a los paquetes de hojarasca en corrientes de bajo orden en las zonas protegidas de la ecorregión cafetera de Colombia y definieron el papel trófico de esta fauna. **Rodríguez-Barrios** *et al.* (2011) determinaron la riqueza, la abundancia y la biomasa de los grupos funcionales alimentarios de la comunidad de macroinvertebrados y su variación espaciotemporal en una corriente de la Sierra Nevada de Santa Marta. **Boyero** *et al.* (2011a, b), analizaron los patrones de la distribución a nivel global de los macroinvertebrados detritívoros y de la diversidad latitudinal, así como sus implicaciones en la pérdida de la biodiversidad en las corrientes ubicadas en zonas de clima variable.

Nazarova *et al.* (2004) realizaron observaciones sobre las deformidades del aparato bucal de las larvas de Chironomidae en los canales laterales de la Ciénaga Grande de Santa Marta, en una comunidad dominada por *Goeldichironomus* y *Chironomus*. Adicionalmente, Monsalve (2004) y Abril & Parra (2007) utilizaron los fósiles de esta familia para valoraciones sedimentarias del páramo de Frontino en Antioquia y discutieron su utilización como indicadores del cambio climático.

Rodríguez-Barrios et al. (2007) estimaron la variación en la densidad de la deriva de los macroinvertebrados acuáticos y su aporte de materia orgánica en términos de la biomasa en una pequeña corriente tropical de montaña en los cerros orientales de Bogotá. Tamaris-Turizo (2009) evaluó el transporte de la materia orgánica y la deriva de los macroinvertebrados acuáticos en un río en la región Caribe. Quiñonez et al. (1998) analizaron estos tópicos en la zona de ritral del río Medellín. Carmona et al. (2010) evalúan la calidad de las aguas en una vereda El Colorado del municipio de Guarne (Ant), Chará et al. (2007, 2008, 2011) evaluaron la transformación del paisaje hacia monocultivos agrícolas y ganaderos en las microcuencas asociadas al río La Vieja (Valle del Cauca). Los resultados de estos trabajos mostraron problemas de degradación del suelo, la pérdida de la diversidad biológica y la disminución de la calidad y cantidad de agua, especialmente en corrientes pequeñas. Contreras et al. (2008) evalúan la calidad del agua en cuatro corrientes en Norte de Santander. Longo et al. (2005) discuten aspectos relacionados con la autoecología de dos especies de Lymnaea. Giraldo et al. (2014) determinaron los cambios en el ambiente acuático asociados a la restauración del corredor ribereño en las corrientes de bajo orden afectadas por la ganadería y su impacto sobre las comunidades bentónicas y las características abióticas. Donato-Rondón et al. (2010) muestran los efectos de la eutrofización en la interaccion entre las algas y los herbívoros en una corriente andina.

Castro-Rebolledo *et al.* (2015) discuten los patrones de emergencia de los insectos acuáticos.

Empleo de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de calidad del agua

Las siguientes son las razones por las cuales se consideran los macroinvertebrados como los mejores indicadores de calidad del agua: son abundantes, de amplia distribución y fáciles de recolectar; son sedentarios en su mayoría v, por tanto, reflejan las condiciones de su habitat; son relativamente fáciles de identificar: representan los efectos de las variaciones ambientales de corto tiempo; proporcionan información para integrar efectos acumulativos; poseen ciclos de vida largos (semanas y/o meses); se reconocen a simple vista; pueden cultivarse en el laboratorio; responden rápidamente a los tensores ambientales y varían poco genéticamente (Roldán, 1999, 2003). Las comunidades de macroinvertebrados presentan diferentes respuestas a la contaminación. Metcalf (1989), distingue tres enfoques principales para evaluar la respuesta de las comunidades de macroinvertebrados a la contaminación. Estos son: el sapróbico, la diversidad y el biótico.

El enfoque sapróbico. El término saprobio, para referirse a la capacidad que tenían ciertos organismos de vivir en determinados niveles de contaminación, fue designado en Alemania por Kolkwitz & Marsson (1908, 1909). Definieron tres niveles de saprobiedad: a) zona polisapróbica, predominantemente de procesos reductivos, b) zona mesosapróbica, parcialmente reductiva con procesos predominantemente oxidativos y c) zona oligosapróbica, exclusivamente procesos oxidativos. En el sistema saprobio se utilizan todos los organismos acuáticos como indicadores de calidad del agua. También se tienen en cuenta algunos aspectos fisicoquímicos como DBO5, el NH4-N y el oxigeno disuelto. La ventaja del sistema saprobio es que incluye gran variedad de taxones y es aplicable a todo tipo de ríos. La desventaja, es que los bioindicadores deben emplearse a nivel de especie y en el neotrópico esta información aun no esta disponible. Al igual que otros sistemas de bioindicación, el sistema sapróbico se desarrolló para dar un valor numérico, conocido como índice sapróbico, el cual va de 1.0 a 4.0 y se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$S = \frac{\sum_{1}^{n} (nSi)(Ai) (Gi)}{\sum_{1}^{n} (Ai) (Gi)}$$

Donde:

S =índice sapróbico

n = número de taxones

i = número de orden de los taxones

Si = valor de saprobiedad de los taxones

G = peso indicativo de los taxones

A: abundancia de taxones

El enfoque de la diversidad. Incluye tres componentes fundamentales de las comunidades naturales: riqueza, uniformidad o equidad y un indicativo de abundancia (en el caso de macroinvertebrados, el mas usado es de la densidad, pero bien podría ser biomasa, para describir la respuesta de la comunidad a la calidad ambiental. Una comunidad natural se caracteriza por presentar una alta diversidad de taxones y un número reducido de individuos por taxon; o un bajo número de taxones y muchos individuos por taxon. Esta situación se observa en la naturaleza en lugares como en las profundidades de los lagos y el mar, grandes alturas en las montañas y en sistemas sometidos a temperatures extremas. La contaminación del agua provoca una situación similar, haciendo que ciertas comunidades muy sensibles desaparezcan y otras mas resistentes aumenten en número. Se han desarrollado varios índices para medir la calidad del agua; uno de los más conocidos es el de Shannon-Weaver (1949) expres ada como:

$$\mathbf{H}' = -\sum_{1}^{s} (\sum pi) (Lnpi)$$

Donde:

H'= índice de diversidad de Shannon & Weaver

S = número de taxones

i = número de orden de los taxones

pi = indicador de abundancia relativa (densidad relativa o biomasa relativa son los más comunes)

ni = número de individuos por taxón en la muestra.

n = número total de individuos en la muestra.

Ln = logaritmo natural.

El enfoque biótico. Incluye los aspectos esenciales de la saprobiedad, combinando una medida cuantitativa de diversidad de especies con la información cualitativa sobre la sensibilidad ecológica de taxones de individuos en una expresión numérica simple. **Beck** (1955) propuso el índice biótico en los Estados Unidos basado en la relación entre especies intolerantes y tolerantes a la contaminación; los valores se encuentran entre 0 y 10. Este índice se expresa como:

$$I = 2Si - 2Si$$

Donde:

Si = número de especies intolerantes

S1 = número de especies tolerantes

Cualquier índice tiene su utilidad y valor de acuerdo con el criterio con que se use y con el conocimiento que se tenga de la fauna local.

El método BMWP para Colombia (BMWP/Col)

El Biological Monitoring Working Party (BMWP) fue establecido en Inglaterra en 1970, como un método simple y rápido para evaluar la calidad del agua usando los macroinvertebrados como bioindicadores. Las razones para ello fueron básicamente económicas y por el tiempo que se necesita invertir. El método sólo requiere llegar hasta nivel de familia y los datos son cualitativos (presencia o ausencia). El puntaje va de 1 a 10 de acuerdo con la tolerencia de los diferentes grupos a la contaminación orgánica. Las familias más sensibles como Perlidae y Oligoneuriidae reciben un puntaje de 10; en cambio, las más tolerantes a la contaminación, por ejemplo, Tubificidae, reciben una puntuación de 1.0 (**Armitage** *et al.* 1983). La suma de los puntajes de todas las familias proporciona el puntaje total BMWP.

La bioindicación en Colombia se remonta a los años setenta con los trabajos en el río Medellín (Roldán et al. 1973). Posteriormente Matthias & Moreno (1983) realizaron un estudio fisicoquímico y biológico del mismo río, utilizando los macroinvertebrados como indicadores de la calidad del agua. Bohórquez & Acuña (1984) realizaron los primeros estudios para la sabana de Bogotá. (Zúñiga et al. (1993) hicieron una adaptación de este método para algunas cuencas del Valle del Cauca. Reinoso (1999) realizó un estudio del río Combeima en el Departamento del Tolima. Zamora (2000) hizo una adaptación del índice BMWP para la evaluación de la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia. Roldán (2001) aplica esta metodologia para la cuenca de Piedras Blancas en el Departamento de Antioquia. Riss et al. (2002) establecen valores de biondicación para la Sabana de Bogotá. Roldán (2003) adapta el sistema del BMWP para evaluar la calidad del agua en Colombia mediante el uso de los macroinvertebrados acuáticos. Con base en el conocimiento que actualmente se tiene en Colombia sobre los diferentes grupos de macroinvertebrados hasta el nivel de familia, propone utilizar el método BMWP/Col, como una primera aproximación para evaluar los ecosistemas acuáticos de montaña. La Tabla 2 presenta las familias y su valoración de acuerdo a su grado de adaptación a las diferentes calidades de agua. Cada región, tanto en Colombia como en Latinoamérica, han hecho sus propias valoraciones de puntajes de acuerdo a las sus experiencias (Zamora & Sarria, 2001; Sánchez-Herrera, 2005; Zúñiga 2009, Springer et al.2010).

Las formas inmaduras de la entomofauna tienen un buen potencial como bioindicadoras, además de ser una comunidad diversa, abundante y de amplia distribución altitudinal en los ecosistemas hídricos de Colombia. El género Anacroneuria (Plecoptera: Perlidae), es considerado uno de los grupos de mayor sensibilidad a la degradación del hábitat y del enriquecimiento de la carga orgánica residual (**Roldán**, 2003; **Zúñiga**, 2010). Entre los géneros de Ephemeroptera más sensibles se encuentran Lachlania (Ologineuriidae), Haplohyphes (Leptohyphidae), Mayobaetis, Andesiops (Baetidae) Atopophlebia y Thraulodes (Leptobhlebiidae); mientras que Camelobaetidius, Baetodes (Baetidae), Leptohyphes y Tricorythodes (Leptohyphidae) son de amplio espectro ambiental (**Roldán**, 2003; **Zamora**, Tabla 2. Puntajes de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Col (Roldán, 2003).

Familias	Puntajes
Anomalopsychidae, Atriplectididae, Blepharoceridae, Calamoceratidae, Ptilodactylidae, Chordodidae, Gomphidae, Hidridae, Lampyridae, Lymnessiidae, Odontoceridae, Oligoneuriidae, Perlidae, Polythoridae, Psephenidae	10
Ampullariidae, Dytiscidae, Ephemeridae, Euthyplociidae, Gyrinidae, Hydrobiosidae, Leptophlebiidae, Philopotamidae, Polycentropodidae, Xiphocentronidae.	9
Gerridae, Hebridae, Helicopsychidae, Hydrobiidae, Leptoceridae, Lestidae, Palaemonidae, Pleidae, Pseudothelpusidae, Saldidae, Simuliidae, Veliidae.	8
Baetidae, Caenidae, Calopterygidae, Coenagrionidae, Corixidae, Dixidae, Dryopidae, Glossossomatidae, Hyalellidae, Hydroptilidae, Hydroptilidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae, Naucoridae, Notonectidae, Planariidae, Psychodidae, Scirtidae.	7
Aeshnidae, Ancylidae, Corydalidae, Elmidae, Libellulidae, Limnichidae, Lutrochidae, Megapodagrionidae, Sialidae, Staphylinidae.	6
Belostomatidae, Gelastocoridae, Hydropsychidae, Mesoveliidae, Nepidae, Planorbiidae, Pyralidae, Tabanidae, Thiaridae	5
Chrysomelidae, Stratiomyidae, Haliplidae, Empididae, Dolicopodidae, Sphaeridae, Lymnaeidae, Hydraenidae, Hydrometridae, Noteridae.	4
Ceratopogonidae, Glossiphoniidae, Cyclobdellidae, Hydrophilidae, Physidae, Tipulidae.	3
Culicidae, Chironomidae, Muscidae, Sciomyzidae,	2
Tubificidae	1

1996; Zúñiga et al. 1997, Zúñiga & Cardona, 2009). Los géneros más sensibles del orden Trichoptera son *Triplectides* (Leptoceridae), *Rhyacopsyche* (Hydroptiliidae), *Chimara* (Philopotamidae), *Marilia* (Odontoceridae) y *Phylloicus* (Calamoceratidae). Los géneros *Leptonema* (Hydropsychidae) y *Atanatolica* (Leptoceridae) tienen un ámbito amplio, con adaptaciones a los ecosistemas con degradación incipiente (Roldán, 2003; Zúñiga et al.1993; Zamora, 1996; Ballesteros et al. 1997; Guevara et al. 2007a, b; Zúñiga & Cardona 2009); Forero et al. (2013); Forero & Reinoso, 2013); Vásquez et al. (2013, 2014).

Estandarización de protocolos de trabajo

En Colombia no hay protocolos normalizados para los trabajos en la bioindicación de la calidad del agua, aplicados a nivel regional o nacional, que faciliten las comparaciones entre los estudios realizados en las diferentes zonas del país. Es necesario trabajar en la estandarización de estos protocolos de muestreo, con énfasis en los grandes ríos y los cuerpos de agua lénticos, como los humedales o los grandes lagos. Esta homogeneización de protocolos de trabajo de campo, el recuento de los organismos, el análisis de laboratorio y el uso de los índices, son imprescindibles para conseguir los resultados y bases de datos consistentes y comparables (Roldán et al. 2014). Rueda-Delgado (2002) publicó el Manual de Métodos en Limnología, en donde compiló la información general sobre los diferentes métodos de estudio para la biota de mayor importancia en los ambientes acuáticos. Actualmente el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia-IDEAM está desarrollando una metodología de evaluación de la calidad del agua para Colombia mediante la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores (Sanabria, 2015, (Comunicación personal).

Uno de los problemas en estudios de bioindicación de la calidad del agua en Colombia es el uso indiscriminado de los índices bióticos, tanto en ecosistemas de aguas lóticas como lénticas. Estos ecosistemas tienen características hidrológicas y ecológicas diferentes y una biota adaptada a las condiciones particulares de cada uno de estos ambientes. El índice BMWP es muy popular y, aunque existen algunas adaptaciones de este parámetro biológico a nivel regional, para la validez de su aplicación es importante tener en cuenta la clase de los cuerpos de agua donde se aplica. Este índice ha sido estandarizado para la evaluación de la calidad del agua en corrientes hídricas de bajo y mediano orden, principalmente de la zona andina (**Zúñiga et al.** 1993; **Zamora**, 2000, **Roldán**, 2003).

Estudios taxonómicos detallados

La implementación y la eficacia de los programas encaminados a la evaluación de la calidad del agua a partir de orgaminasmos bioindicadores, depende en gran medida del soporte sólido de la taxonomía. Este aspecto es fundamental para garantizar la identificación correcta de los diferentes grupos que pueden suministrar la información ecológica, acerca de su respuesta con la calidad ambiental del recurso hídrico. En tal sentido, es importante aunar esfuerzos entre los diferentes grupos que estudian el tema, con el fin de elaborar una guía taxonómica adaptada a la fauna regional típica de las corrientes hídricas, con diferente nivel de deterioro ambiental.

La información sobre la taxonomía y la ecología de algunos de los grupos entomológicos de mayor diversidad, abundancia y biomasa es aún deficiente. Esta situación se presenta para los órdenes Diptera Odonata y Hemiptera, taxones que podrían suministrar información valiosa desde el punto de vista de la bioindicación, especialmente para los ambientes lénticos en donde su abundancia y diversidad, en general, es mayor que la que se presenta en los ecosistemas de las aguas corrientes. Por su parte, los moluscos y los anélidos, cuya abundancia y biomasa es muy alta en ambientes contaminados y enriquecidos con materia orgánica, carecen de una información taxonómica más detallada, lleva a generalizaciones e interpretaciones erradas acerca de su potencial como biondicadores de la calidad del agua.

Conclusiones

La información disponible en Colombia sobre la taxonomía, la ecología y la bioindicación de la calidad del agua no es similar en todos los grupos. Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera cuentan con mayor información que los demás taxones. Es importante además, profundizar en el estudio de los anélidos, los moluscos y los dípteros, especialmente de la familia Chironomidae.

Es necesario avanzar en la asociación de los estados inmaduros y sus correspondientes formas aladas, así como entre machos y hembras, con el fin de lograr una determinación taxonómica rigurosa.

Es importante definir una metodología unificada para el estudio de los ecosistemas lénticos y los grandes ríos.

La aplicación de la bioindicacion de la calidad del agua se inició en Colombia en la década de los años setenta y ahora está ampliamente extendida en todos los países latinoameicanos.

El gobierno nacional y, en especial con el Ministerio del Medio Ambiente y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM, deben implementar normas que promuevan la utilización de los macroinvertebrados como bioindicadores en programas de evaluación ambiental de cuerpos de agua. Esta herramienta es un buen complemento a la información de tipo fisicoquímica y bacteriológica de amplia utilización en Colombia y permitirá un análisis integral del recurso hídrico.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Abril, R. G. y Parra, L.N. 2007. Macroinvertebrados acuáticos de páramo de Frontino Antioquia Colombia con énfasis en Chironomidae. Tesis Maestría Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. 60 p.
- Aguirre. P, J., Rodríguez, B. J y. Rodulfo, O.T. 2012. Deriva de macroinvertebrados acuáticos en dos sitios con diferente grado de perturbación, Río Gaira, Santa Marta, Colombia. *Rev. Intropica*. 7 9-19. Santa Marta, Colombia
- Alba-Tercedor, J. y Sánchez-Ortega, A. 1988. Un método rápido y simple para evaluar la calidad biológica de las aguas corrientes, basado en el de Hellawel 1978. *Limnetica* 4: 51-56.

- Alba-Tercedor, J.1996. Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los Ríos. IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA), Almeria, vol. 2, pp. 203-213.
- Altamiranda-Saavedra, M., Pérez-Gutiérrez, L.A. & Gutiérrez-Moreno, L.C. 2010. Distribución y respuesta de la comunidad de larvas de odonatos (Insecta: Odonata) a la disponibilidad de sustratos en una ciénaga del Departamento del Atlántico, Colombia. *Caldasia* 32 (2): 399-410.
- Álvarez, L.F. y Roldán, G. 1983. Estudio taxonómico y ecológico de los hemípteros a diferentes pisos altitudinales en el Departamento de Antioquia. Actualidades Biológicas 12 (44): 31-45.
- Amaya-Perilla, C & Palacino-Rodríguez, F. 2012. An update list of the dragonflies (Odonata) of Meta department (Colombia) with forty six new department records. *Bulletin* of American Odonatology 11 (2): 29-38.
- Amaya-Vallejo, V. & Novelo-Gutiérrez, R. 2011. The larva of Palaemnema mutans Calvert 1931 (Odonata: Platystictidae). Zootaxa 3049: 59-63.
- Angrisano, E.B. & Sganga, J.V. 2009. Trichoptera. Pp. 255-307. En: Domínguez, E. & Fernández, H. (Eds). Macroivertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. Fundación Miguel Lillo. Tucumán, Argentina.
- Arango, M.C. y Roldán, G. 1983. Estudio de las larvas acuáticas del orden Odonata a diferentes pisos altitudinales en el Departamento de Antioquia. Actual. Biol. 12 (46): 91-104.
- Arias-Díaz, D., Reinoso-Flórez, G., Guevara-Cardona, G. & Villa-Navarro, F.A. 2007. Distribución espacial y temporal de los coleópteros acuáticos en la cuenca del Río Coello (Tolima, Colombia). *Caldasia* 29 (1): 177-194.
- Armitage, P. D., D. Moss y M.T. Furse. 1983, The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates over a wide range of umpollutes runnigwaters sites. *Water Res*, **17**: 33-347.
- Aristizábal, H. 2002. Los hemípteros de la película superficial del agua en Colombia. Parte I: Familia Gerridae. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras No 20, Bogotá.
- Arteta-Bonivento, R. 2009. Cangrejos en el delta del río Ranchería, Riohacha (Colombia) (Crustacea: Decapoda: Brachyura). Bol. Cient. Mus. Nat. 13 (1): 140-152.
- **Astudillo, M.R.** 2005. Variación altitudinal de las náyades de los géneros de Odonata (Insecta) en algunos cuerpos de agua del suroccidente colombiano. Tesis de pregrado. Universidad del Valle. Programa de Biología. Santiago de Cali. 55 p.
- Ball, I.R. 1969. An annoted checklist of freshwater Tricladida of the Neartic Neotropical regions.*Candian Journal of Zoologia* 47: 59-64.
- Ball, I.R. 1980. Freshwater planarians from Colombia; a revision of Fuhrmans' types. *Bijdragen tot Dierkunde* 50: 235-242.
- **Ballesteros, Y.V.** 2004. Contribución al conocimiento del género *Anacroneuria* (Pecoptera: Perlidae) y su relación con la calidad del agua en el río Riofrío (Valle del Cauca). Tesis de Maestría en Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Universidad del Valle. Cali, Colombia. 90p.

- Ballesteros, Y.V., Zúñiga, M. del C. y Rojas, A.M. 1997. Distribution and structure of the order Trichoptera in various drainages of the Cauca River basin, Colombia, and their relationships to water quality. Pp. 19-23. En: Holzenthal, R.W. y Flint, O. Jr. (Eds.). Proceedings of the 8th International Symposium on Trichoptera, 1995. Ohio Biological Survey, Columbus, Ohio, USA.
- Barreto, V.G., Reinoso, G., Guevara, G. y Villa, F.A. 2005. Primer registro de Gripopterygidae (Insecta: Plecoptera) para Colombia. *Caldasia* **27**: 243-246.
- Beck, W. M. 1955. Suggested method for reporting biota data. Sewage Ind. Wastes, 27: 1193-1197.
- Bedoya, I. y Roldán, G. 1984. Estudio de los dípteros acuáticos en diferentes pisos altitudinales en el Departamento de Antioquia. *Revista Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* 2 (2): 113-134.
- Berg, C. 1871. Beitrage zu den Pyralidinen Sudamerikas. Ent. Zeit. Entomol. Verein. Stettin 37: 342-355.
- Bermůdez, C. 2005. Clave para los imagos de los géneros de Libellulidae (Odonata:Anisoptera) del Valle del Cauca, Colombia. Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle 6 (1): 7-22.
- Bermůdez, C. y López-Victoria, M. 2009. Primeros registros de libélulas (Odonata: Anisoptera) en la Isla Malpelo, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología* 35 (2): 286-287.
- Birk, S. & D. Hering. 2006. Direct comparison of assessment methods using benthic macroinvertebrates: a contribution to the EU Water Framework Directive intercalibration exercise. Hydrobiologia 566 (1): 401-415.
- Blahnik, R.J. 1998. A revisión on the Neotropical species of the genus *Chimarra*, subgenus *Chimarra* (Trichoptera: Philopotamidae). *Memoirs of the American Entomological Institute* 59: 1-318.
- Bohórquez, H., Reinoso, G. y Guevara, G. 2011. Seasonal size distribution of *Anacroneuria* (Plecoptera: Perlidae) in an Andean tropical river. *Revista Colombiana de Entomología* 37 (2): 305-312.
- **Bohórquez, A. y A. Acuña.** 1984. Inventario de las morfofamilias de las clases Gasterópoda y Clitelata como bioindicadores limnológicos de la laguna de La Herrera. p. 32. Memorias XIX Congreso Nacional y III Grancolombiano de Ciencias Biológicas, Bucaramanga, UniversidadIndustrial de Santander, 70 p.
- Borkent, A. y Spinelli, G.R. 2007. Neotropical Ceratopogonidae. En: Adis, J., Arias, J.R., Rueda-Delgado, G. & Wantzen, K.M. (Eds.). Aquatic Biodiversity in Latin America (ABLA). Vol. 2. Pensoft, Sofia, Moscow. Serie ABLA. 198 p.
- Boyero, L., Pearson, R., Dudgeon, G., Graca, M.A.S., Gessner, M.O., Albariño, R.J., Ferreira, V., Yule, C.M., Boulton, A.M., Arunachalam, J., Callisto, M., Chauvet, E., Ramírez, A., Chará, J., Moretti., J.F., Goncalves, J.F. Jr., Helson, J.E., Chará-Serna, A.M., Encalada, A.C., Davies, J.N., Lamothe, S., Cornejo, A., Castela, J., Li, A.O.Y., Buria, L.M., Villanueva, V.D., Zúñiga, M.del C.

y Pringle, C.M. 2011a. Global distribution of a key trophic guild contrasts with common latitudinal diversity patterns. *Ecology* **92** (9): 1839-1848.

- Boyero, L., Pearson, R.G., Dudgeon, D., Ferreira, V., Graca, M.A.S., Gessner, M.O., Boulton, A.J., Chaubet, E., Yule, C.M., Albariño, R.J., Ramírez, A., Helson, J.E., Callisto, M., Arunachalam, M., Chará, J., Figueroa, R., Mathooko, J.M., Moretti, M.S., Goncalves, J.F. Jr., Chará-Serna, A.M., Davies, J.N., Encalada, E.A., Lamothe, S., Buria, L.M., Castela, J., Cornejo, A., Li, A.O.Y., Erimba, C.M., Villanueva, V.D., Zúñiga, M. del C., Swan, C.M. y Barmuta, L.A. 2011b. Global patterns of stream detritivore distribution: implications for biodiversity loss in changing climates. *Global Ecology and Biogeography* 21: 134-141.
- Brillouin, L. 1951. Maxwells demon cannot operate: information and entropy. I and II. *Journ. Appl. Phys.*, 22: 334-343
- Camargo, C. & Rozo, M.P. 2003. Colombian Darien Ephemeroptera. Pp. 291-292. En: Gaino, E. (Ed.). Research Update on Ephemeroptera & Plecoptera.University of Perugia, Perugia, Italy.Campos, M and Rodríguez, G. 1985. A new species of *Neostrengeria* (Crustacea: Decapoda: Pseudothelphusidae) with notes on geographical distribution of the genus. *Proc. Biol. Sci.* Wash. 98 (3), 1985, pp. 718-727.
- Campos, M. 2003. A review of the freshwater crabs of the genus Hypolobocera Ortmann, 1897 (Crustacea: Decapoda: Brachyura: Pseudothelphusidae), from Colombia Proceedings of the Biological Society of Washington 116 (3):754-802. 2003.
- Campos, M & Guerra, L. 2008. Propuesta de sinonimia para las especies de cangrejo dulceacuícola Hypolobocera solimanie-Hypolobocera triangula de Colombia. Rev. Biol. Trop. vol.56, n.3, pp. 987-994.
- Carmona, Y., Herrera, R. y Roldán, G. 2010. Estudio socioeconómico y ambiental de la vereda el Colorado, Municipio de Guarne, Antioquia. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras No. 26. Santafé de Bogotá.
- Carsten von der Ohe, P., Pru, R. Bernhard Schafer, M. Liess, E. de Deckere & W. Brack. 2007. Water quality indices across Europe-a comparison of the good ecological status of five river basins. Journal of Environmental Monitoring 9 (9): 970-978.
- Castro-Rebolledo, M. I. & J. C. Donato-Rondón, 2015. Emergence patterns in tropical insects: The role of water discharge frequency in an Andean Stream. Annales de Limnologie 51 (2): 147-155.
- Casas-Córdoba, L., Córdoba-Aragón, K. E., Asprilla-Murillo, S. y Mosquera, Z. 2006. Composición y distribución del Orden Ephemeroptera en los ríos Tutunendo y Catugadó, Quibdó-Chocó (Colombia). Asociación Colombiana de Limnología -Neolimnos 1: 92-97.
- Caupaz-Flórez, F., Reinoso, G., Guevara, F.A. & Villa, F.A. 2006. Diversidad y distribución de la familia Elmidae (Insecta: Coleoptera) en la cuenca del río Prado (Tolima, Colombia). Asociación Colombiana de Limnología-Neolimnos 1: 106-116.

- **Ceballos A.** 2004. Contribucion al conocimiento y distribución de los odonatos (Insecta: Odonata) en Colombia. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia.
- Chará J., Pedraza, G., Giraldo, L.P e Hincapié, D. 2007. Efecto de corredores ribereños sobre el estado de quebradas en la zona ganadera del río La Vieja, Colombia. *Revista Agroforestería de las Américas* 45: 72-78.
- Chará, J., Pedraza, G. y Giraldo, L.P. 2008. Corredores ribereños como herramienta de protección de ambientes acuáticos en zonas ganaderas. Pp 111-130. En: Murgueitio, E., Cuartas, C. & Naranjo, J.F. (Eds.). Ganadería del futuro: Investigación para el desarrollo. Fundación CIPAV. Santiago de Cali, Colombia.
- Chará, J., Giraldo, L.P., Chará-Serna, A.M. y Pedraza, G.X. 2011. Beneficios de los corredores ribereños de *Guadua angustifolia* en la protección de ambientes acuáticos en la ecorregión cafetera de Colombia. Efectos sobre la escorrentía y captura de nutrientes. *Recursos Naturales y Ambiente* 61: 60-66.
- Chará, J., Zúñiga, M. del C., Giraldo, L.P., Pedraza, G., Astudillo, A., Ramírez, L. y Posso, C.E. 2009. Diversidad y abundancia de macroinvertebrados acuáticos en quebradas de la cuenca del río La Vieja, Colombia. Pp. 129-142. En: Rodríguez, J.M., Camargo, J.C., Niño, J., Pineda, A.M., Arias, L.M., Echeverry, M.A. & Miranda, C.L. (Eds.) Valoración de la Biodiversidad en la Ecorregión del Eje Cafetero. CIEBREG. Pereira, Colombia.
- Chará-Serna, A.M., Chará, J., Zúñiga, M. del C., Pearson, R.G. y Boyero, L. 2012. Diets of leaf litter associated invertebrates in three tropical streams. *Annales de Limnologie* – *International Journal of Limnology* 48: 139-144.
- Chará-Serna, A.M., Chará, J., Zúñiga, M. del C., Pedraza, G.X. y Giraldo, L.P. 2010. Clasificación trófica de insectos acuáticos en ocho quebradas protegidas de la ecorregión cafetera colombiana. Universitas Scientiarum 1: 27-36.
- Cohn, F. 1853. Über lebende Organismen im Trinkwasser. Z. klin. Med., 4: 229-237.
- **Contreras-Ramos, A.** 1998. Systematics of thedobsonfly genus *Corydalus* (Megaloptera:Corydalidae). Thomas Say Publications in Entomology: Monographs. Lanham.
- Contreras-Ramos, A. 2009. Megaloptera.. En:Domínguez, E. & Fernández, H. (Eds.). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología, Pp. 233-245. Primera Edición. Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Contreras, J., Roldán, G., Arango, A. & Álvarez, L.F. 2008. Evaluación de la calidad del agua de las microcuencas La Laucha, La Lejía y La Rastrojera utilizando los macroinvertebrados como bioindicadores. Municipio de Durania, departamento Norte de Santander, Colombia. *Revista de la Acdemia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* **32** (123): 171-193.
- Correa, M., Machado, T. y Roldán, G. 1981. Taxonomía y ecología del orden Trichoptera en el Departamento de Antioquia a diferentes pisos altitudinales. *Actualidades Biológicas* **10** (36): 35-48.

- Coscarón. S. & Coscarón-Arias, C. 2007. Neotropical Simuliidae (Diptera: Insecta). Aquatic Biodiversity of Latin America (ABLA Series).Vol. 3. Pensoft Publishers, Sofia, Moscow.
- Cruz, L. 1986. Contribución a los estudios taxonómicos de Odonata Zigoptera de Colombia: descripción de una nueva especie de *Cianallagma* (Odonata: Coenagrionidae). *Caldasia* 14 (68/70): 743-747.
- De Pauw, N & H. A. Hawkes. 1993, Biological monitoring of water quality, en: *River quality monitoring and control*, W. J. Walley y S. Judd, eds., publicado por Aston University, Reino Unido, 249 p.
- De Marmels, J. 1982a. Cuatro náyades nuevas de la familia Libellulidae (Odonata: Anisoptera). Boletín de Entomología Venezolana 2 (11): 94-101.
- De Marmels, J. 1982b. Dos náyades nuevas de la familia Aeshnidae (Odonata: Anisoptera). *Boletín de Entomología Venezolana* 2 (12): 102-106.
- De Marmels, J. 2001. Aeshna (Hesperaeschna) condor sp. nov. from the Venezuelan Andes, with a redescription of A. (H.) joannisi, comments on other species, and description of larvae (Odonata: Aeshnidae). International Journal of Odonatology 4 (2): 119-134.
- Dyar, H.G. 1914. Report of Lepidoptera of Smithsonian Biological Survey of Panamá Canal Zone. Proc. US. Nat. Mus. 47: 139-150.
- Días, L., Bacca, T., Navarro, L., Acevedo, F., Benavides, P. y Fiuza-Ferreira, P.S. 2011. Association of nymphs and adults of Ephemeroptera (Insecta) using the amplified fragment length polymorphism (AFLP) technique. Annales de Limnologie – International Journal of Limnology 47: 151-157.
- Domínguez, E. & Fernández, H. (Eds.). 2009. Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología. Primera Edición. Fundación Miguel Lillo. San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Domínguez, E. & Zúñiga, M. del C. 2003. First generic record and description of a new species of *Ulmeritoides* (Ephemeroptera: Lepophlebiidae) from Colombia. Pp. 43-45. En: Gaino, E. (Ed.). Research update on Ephemeroptera and Plecoptera. University of Perugia, Italy.
- Domínguez, E. & Zúñiga, M. del C. 2009. First description of the nymph of *Farrodes roundsi* (Traver) (Ephemeroptera: Leptophlebiidae, Atalophlebiinae) with comments on its phylogenetic relationships. *Aquatic Insects* **31** (Suppl. 1): 73-81.
- Domínguez, E., Zúñiga, M. del C. y Molineri, C. 2002. Estado actual del conocimiento y distribución del orden Ephemeroptera (Insecta) en la región amazónica. *Caldasia* 24 (2): 459-469.
- Donato-Rondón, J. C., S. J. Morales-Duarte & M. I. Castro-Rebolledo. 2010. Effects of eutrophication on the interaction between algae and grazers in an Andean stream. Hydrobiologia 657 (1): 159-166.
- Flint, Jr., O.S. 1978. Studies of Neotropical caddisflies. XXII: Hydropsychidae of the Amazon basin (Trichoptera). *Amazoniana* 6: 373-421.

- Flint, Jr. O.S., Wallace, J.B. 1980. Studies of Neotropical caddisflies, XXV: the immature stages of *Blepharopus diaphanous* and *Leptonema columbianun* (Trichoptera: Hydropsychidae). *Proceeding of the Biological Society of Washington* 93 (1): 178-193.
- Flint, Jr. O.S. 1991. Studies of Neotropical Caddisflies, XLV:The Taxonomy, Phenology and Faunistics of the Trichoptera of Antioquia, Colombia. *Smithsonian Contributions to Zoology* **520**: 1-113.
- Forero, C. A.M. Gutiérrez, C & Reinoso, F.G. 2013. Evaluación de la calidad del agua del rio Opia (Tolima-Colombia) a través de la fauna de macroinvertebrados acuáticos y parámetros fisicoquímicos. *Rev. Caldasia* 35 (2): 371-387.
- Forero, C. A.M & Reinoso, F. G. 2013. Estudio de la familia Baetidae (Ephemeroptera: Insecta) en una cuenca con influencia de la urbanización y agricultura: río Alvarado-Tolima. *Rev. Asoc. Col. Cienc.* (Col.), 25: 12-21.
- Froehlich, C. G. 2009. Plecoptera.. En: Domínguez, E. y Fernández, H. (Eds.). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología. Pp. 145-166. Primera Edición. Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- **Fuhrmann, O.** 1914. Turbellariés d'eau douce de Colombie. Mémoires de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles: 793-804.
- Fuhrmann, O. & Mayor, E. 1914. Voyage d'exploration scientifique en Colombie. Mémoires de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles: 5 (2): 193-201
- Gaufin, A. R. & Tarzwell, C. M. 1952. Aquatic invertebrates as indicators of stream Pollution. Amer. Publ. Health Rep. 67: No. 1.
- García, J. F. Cantera, J. Zúñiga, M. del C & Montoya, J. 2009. Estructura y diversidad de las comunidades de macroinvertebrados acuáticos en la cuenca baja del río Dagua (Andén pacífico vallecaucano-Colombia). *Revista de Ciencias de la Universidad del Valle* 13: 27-48.
- Garzón, C. & Realpe, E. 2009. Diversidad de odonata (insecta) en la Reserva Natural Cabildo-Verde (Sabana de Torres-Santander, Colombia), una aproximación hacia la conservación. *Caldasia* vol.31, n.2, pp. 459-470.
- Gaviria, E. 1993. Claves para las especies colombianas de las familias Naidae y Tubificidae (Oligochaeta, Annelida). *Caldasia* 17 (2): 237-248.
- **Giraldo, L.P.** 2012. Diversidad y abundancia de larvas de Trichoptera (Insecta) asociadas a pequeñas quebradas andinas del centro y sur occidente colombiano. Tesis de Maestría. Universidad de Costa Rica. Estudios de Posgrado en Biología. San José, Costa Rica. 125 p.
- Giraldo, L.P., Chará, J., Zúñiga, M.del C., Chará-Serna, A.M. & Pedraza, G. 2014. Impacto del uso del suelo agropecuario sobre macroinvertebrados acuáticos en pequeñas quebradas de la cuenca del río La Vieja (Valle del Cauca, Colombia). *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol.* Vol. 62 (Suppl. 2): 203-219.

- Gómez, M.I. & Velásquez, H.I. 1999. Estudio de los moluscos de agua dulce de la Reserva Ecológica Cerro de San Miguel (Caldas, Antioquia, Colombia). Actualidades Biológicas 21 (71): 151-161.
- Guevara, C.G. Reinoso, F.G. & Villa-Navarro, N.F. 2005. Estudio del orden Trichoptera en su estado larval en la cuenca del Río Coello, Departamento del Tolima. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* 17: 59-70.
- Guevara-Cardona, G. Reinoso-Flórez, G. & Villa-Navarro, N.F. 2007a. Caddisfly larvae (Insecta: Trichcotera) of the Coello River Basin in Tolima (Colombia): Spatial and temporal patterns and bioecological aspects. Pp. 113-120. En:Bueno-Soria, J., Barba-Álvarez, R. y Armitage, B. (Eds.). Proceeding of the XIIth International Symposium on Trichoptera.The Caddis Press.
- Guevara-Cardona, G. López-Delgado, E.O. Reinoso-Flórez, G.
 & Villa-Navarro, N.F. 2007b. Structure and distribution of the Trichoptera fauna in a Colombian Andean river basin (Prado, Tolima) and their relationship to water quality. Pp. 129-134. En: Bueno-Soria, J., Barba-Álvarez, R. y Armitage, B. (Eds.). Proceeding of the XII th International Symposium on Trichoptera. The Caddis Press.
- Gutiérrez, C. & Reinoso, G. 2010. Géneros de ninfas del orden Ephemeroptera (Insecta) del Departamento del Tolima, Colombia: listado preliminar. *Biota Colombiana* 11 (1 y 2): 23-32.
- Gutiérrez, C., Zúñiga, M. del C., Van Bodegom, P.M., Chará, J. & Giraldo, L.P. 2009. Rove beetles (Coleoptera: Staphylinidae) in Neotropical riverine landscapes: characterizing their distribution. *Insect Conservation and Diversity* 2: 106-115.
- Hincks, W.D. 1934. Odonata (Paraneuroptera) from Perú and Colombia. *Entomologist's Record and Journal of Variation* 46: 77-81.
- Hogue, Ch. 1989. Description of a new species of net-winged midge (Diptera: Blepharicedidae) from the Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. *Contributions in Sciences. Natural History Museum of Los Angeles County* 340: 1-10.
- Hogue, Ch. 1989. The net-wingued midge fauna (Diptera: Blephariceridae) of Antioquia Depatment, Colombia. *Contributions in Science*. 413: 1-14.
- Hogue, Ch. 1990. A remarkable new species of Maruina (Diptera: Psychodidae) from Colombia. Aquatic Insects 12 (3): 185-191.
- Holzenthal, R.W. 1988a. Studies in Neotropical Leptoceridae (Trichoptera), VIII: the genera *Atanatolica* Mosely and *Grumichella* Müller (Triplectidinae: Grumichellini). *Transactions of the American Entomological Society* 114: 71-128.
- Holzenthal, R.W. 1988b. Systematic of Neotropical Triplectides (Trichoptera: Leptoceridae). Annals of the Entomological Society of America 81: 187-208.
- Holzenthal, R.W. & Blahnik, R.J. 1995. New species of *Smicridea* (*Rhyacophylax*) (Trichoptera: Hydropsychidae) from Costa Rica. *Entomological News* **106**: 213-223.

- Holzenthal, R.W. y Flint, Jr. O.S. 1995. Studies of Neotropical caddisflies. LI: systematics of the Neotropical caddisfly genus *Contulma* (Trichoptera: Anomalopsychidae) *Smithsonian Contributions to Zoology* **575**: 1-59
- Hynes, H. B. N. 1959. The use of invertebrates as indicators of river pollution". Porc. Linnean. Soc. London, (2): 165-170.
- Hynes, H. B. N. 1963. *The biology of polluted water*. Liverpool University Press, 202 p.
- Illies, J. & L. Botosaneau. 1963. Problemès et mèthodes de la classification et dela zonation écologique des euax courants, considérées surtout du point de vue faunistique, *Mitt. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.*, 12: 1-57.
- Kolenati, F.A. 1848. Uber Nutzen und Schaden der Trichopteren", *Stettiner Entomol. Ztg.* 9.
- Kolkwitz, R & Marsson, W.A. 1908. Ecology of plant saprobia. Verh. Ges. Oekol., 26: 505-519.
- Kolkwitz, R & Marsson, W.A. 1909. Ökologie der tierischen Saprobien. Beitäge zür Lehre von der biologische Gewäserbeuteilung. Internationale Reveu der gesamten Hydrobiologie, 2: 126-152.
- Lizarralde de Grosso, M. 2009. En:Domínguez, E. y Fernández, H. (Eds). Macroivertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología. Pp. 341-364Fundación Miguel Lillo. Tucumán, Argentina.
- Longo, M. Ceballos, V.E. Zamora, G. & Vásquez, G. 2004. Diversidad, similitud y carácter bioindicador de los macroinvertebrados acuáticos epicontinentales de tres ecosistemas lóticos en el piedemonte llanero. Unicauca Ciencia 8: 15-20.
- Longo, M. Zamora, H., Vásquez, V.A. & Velásquez, L.E. 2005. Aspectos ecológicos de *Limnaea* (Mollusca: Limnaeideae) en la región de Aguas Tibias, Municipio de Puracé-Coconuco. *Revista Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* 17: 47-58.
- Longo, M. & Blanco, J.F. 2009. Sobre los filtros que determinan la distribución y abundancia de los macroinvertebrados diádromos y no-diádromos en cada nivel jerárquico del paisaje fluvial en islas. Actualidades Biológicas 31 (91): 179-195.
- Longo, M., Gómez-Aguirre, A.M., Blanco, J.F. & Zamora-González, H. 2009. Cambios multianuales y espaciales de la composición y estructura del ensamble de insectos acuáticos en las quebradas perennes de la Isla Gorgona, Colombia. Actualidades Biológicas 31 (91): 141-160.
- Longo, M., Zamora, H., Guisande, G. & Ramírez, J.J. 2010. Dinámica de la comunidad de macroinvertebrados en la quebrada Potrerillos (Colombia): respuesta a los cambios estacionales de caudal. *Limnetica* **29** (2): 195-210.
- Lorenz, C. M., G. M. van Dijk., A. G. M. van Hattum & W. P. Cofino. 1997. Concepts in river ecology: implications for indicator development. *Regul. Rivers: Res. Manage.*, 13: 501-516.
- Lundblad, O. 1953. Die Hydracarinenfauna von Colombia. Ark. Zool. (ser. 2), 5 (8): 435-585

- Machado, T. 1988. Distribución ecológica e identificación de los coleópteros acuáticos en diferentes pisos altitudinales del Departamento de Antioquia. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Malek, E.A. & Little, M.D. 1971. Aroapyrgus colombiensis n. sp. (Gastropoda, Hydrobiidae) snail intermediate host of Paragonimus caliensis in Colombia. Nautilus 85: 20-26.
- Manzo, V. 2005. Key to the South America genera of Elmidae (Insecta: Coleoptera) with distributional data. *Studies of Neotropical Fauna and Environmental* 40 (3): 201-208.
- Manzo, V. 2006. A review of the American species of *Xenelmis*Hinton (Coleoptera: Elmidae), with a new species from Argentina. *Zootaxa* 1242: 53-68.
- Matthias, U. & Moreno, H. 1983. Estudio de algunos parámetros físicoquímicos y biológicos del río Medellín y sus principales afluentes. *Actualidades Biológicas* 12 (46): 106-117.
- Mazzucconi, S.A., López-Ruf, M.L. & Bachmann, A.O. 2009. Hemiptera: Heteroptera: Gerromorpha y Nepomorpha.En: Domínguez, E. y Fernández, H. (Eds). Macroivertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología.Pp. 167-232. Fundación Miguel Lillo. Tucumán, Argentina.
- Mendes, T., C. L. Elias, S. F. P. Almeida, A. R. Calapez & M. J. Feio. 2014. Comparing alternatives for combining invertebrate and diatom assessment in stream quality classification. Marine and Freshwater Research 65 (7): 612-623.
- Meza, A.M. Rubio, J. Días, L. & Walteros, J. 2012. Calidad de agua y composición de macroinvertebrados acuáticos en la subcuenca alta del río Chinchiná. *Caldasia* 34 (2): 443-456.
- Margalef, R. 1951. Diversidad de especies en las comunidades naturales. *P. Inst. Biol. Appl.* 9: 15-27.
- Metcalf, J. L. 1989, "Biological water quality assessment of running waters based on macroinvertebrate communities: history and present status I, Europe", *Environ. Pollut.*, 60: 101-139.
- Michaelsen, W. 1913-1914. Die Olichaeten Columbias, en: Fuhrmann and Mayr, Voyage d'exploration scientifique en Colombie. *Mémoires de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles* 5: 202-252.
- Molano, F. & Camacho, D.L. 2006. Especies de Gerridae (Heteroptera:Gerromorpha) del Departamento del Quindío. Pp. 370-376. En: Molano, F. y Morales, I.T. (Eds.). *Riqueza biótica quindiana*. Universidad del Quindío, Armenia, Colombia.
- Molano, F., Camacho, D.L. & Serrato, C. 2005. Guerridae (Heteroptera: Gerromprpha) de Colombia. *Biota Colombiana* 6 (2): 163-172.
- Molineri, C. 2010. A cladistic revision of *Tortopus* Needham & Murphy with description of the new genus *Tortopsis* (Ephemeroptera: Polymitarcyidae). *Zootaxa* **2481**: 1-36.
- Molineri, C. & Zúñiga, M. del C. 2004. Lumahyphes a new genus of Leptohyphidae (Insecta: Ephemeroptera). Aquatic Insects 26 (1): 19-30.

- Molineri, C. & Zúñiga, M. del C. 2006. New species of Leptophyphidae (Insecta: Ephemeroptera) from Colombia with evidence of reproductive time segregation. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 41 (2): 139-151.
- Molineri, C. Cuz, P.V. & Emerich, D. 2011. A new species of Asthenopus (Ephemeroptera: Polymitarcyidae: Asthenopodinae) from Brasil and Colombia. Zootaxa 2750: 33-38.
- Molineri, C., Peters, J. & Zúñiga, M. del C. 2002. A new family, Coryphoridae (Ephemeroptera: Ephemerelloidea) and description of the winged and egg stages of *Coryphorus*. *Insecta Mundi* 15 (2): 117-122.
- Montes-Fontalvo, J.M. & Pérez-Gutiérrez, L.A. 2011a. Rediscovery of *Mesagrion leucorrhinum* (Zygoptera: Megapodagrionidae): a formal description of female and ultimate stadium of larva with notes on habits. *International Journal of Odonatology* 14 (1): 91-100.
- Montes-Fontalvo, J.M. y Pérez-Gutiérrez, L.A. 2011b. *Heteropodagrion croizati* sp. nov. (Odonata: Megapodagrionidae) with a key to the known species of the genus.Zootaxa **2810**: 63-68.
- Monsalve, C. A. 2004. Palinología del Holoceno superior en la laguna Puente Largo, Páramo de Frontino, Antioquia, cordillera Occidental, Colombiana. Tesis Magíster, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín.
- Morales-Castaño, I.T. & Molano-Rendón, F. 2008. Heterópteros acuáticos del Quindio (Colombia): Los infraórdenes Gerromorpha y Nepomorpha. *Revista Colombiana de Entomología.* **34** (1): 121-128.
- Mosquera, S. Alba-Tercedor, J. & Zúñiga, M. del C. 2001. Atopophlebia fortunensis Flowers (Ephemeroptera: Leptophlebiidae) and *Caenis chamie* (Ephemeroptera: Caenidae). Notes on their biology and ecology.Pp. 157-160, En: Domínguez, E. (Ed.), Trends in Research in Ephemeroptera and Plecoptera. Kluwer Academic Plenum Publishers. New York, USA.
- Muñoz, D. & Ospina, R. 1999. Guía para la identificación genérica de los Ephemeroptera de la Sabana de Bogotá, Colombia. Ninfas y algunos géneros de adultos. Actualidades Biológicas 21 (70): 47-60.
- Muñoz, F. 2000. Especies del orden Trichoptera (Insecta) en Colombia. *Biota Colombiana* 1 (3): 267-288.
- Muñoz, F. 2004. El Orden Trichoptera (Insecta) en Colombia, II: inmaduros y adultos, consideraciones generales. Pp. 319-349. En: Fernández, F., Andrade, M.G., y Amat, G. (Eds.). Insectos de Colombia No 3. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Muñoz, M & Vélez, I. 2007. Redescripción y algunos aspectos ecológicos de Girardia tigrina, G. cameliae y G. paramensis (Dugesiidae, Tricladida) en Antioquia, Colombia. Revista Mexicana de Biodiversidad 78: 291- 301, 2007
- Munné, A. C. Solà, & Prat, N. 1998. QBR: un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de ribera. *Tecnología del agua*, 175: 20-37.

- Muñoz-Quesada, F. 1997. Five new species and a new record of Costa Rican Leptonema Guérin (Trichoptera: Hydropsychidae). Proceeding of the Entomological Society of Washington 99: 115.
- Navas, L. 1935. Odonatos de Colombia. Boletín de la Sociedad Entomológica Española. 17: 33-38.
- Nazarova, L.B., Riss, W., Kahlheber, A. & Werding, B. 2004. Some observations of buccal deformities in chironomid larvae (Diptera: Chironomidae) from the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *Caldasia* 26 (1): 275-290.
- Novelo-Gutiérrez, R. 1995a. La náyade de Brechmorhoga praecox (Hagen, 1861) y notas sobre las náyades de B. rapax Calvert, 1898, B. vivax Calvert, 1906 y B. mendax (Hagen, 1861) (Odonata: Libellulidae). Folia entomológica mexicana 94: 33-40.
- Novelo-Gutiérrez, R. 1995b. Náyade de Brechmorhoga pertinax (Odonata: Libellulidae). Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México, serie Zoología 66 (2): 181-187.
- Ospina, T.R. Riss, W. & Ruíz, J.L. 1999. Guía para la identificación genérica de larvas de quironómidos (Diptera: Chironomidae: Orthocladiinae) de la Sabana de Bogotá. Pp. 363-383, En: Amat, G., Andrade, M.G. y Fernández, F. (Eds.), Insectos de Colombia No 2. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.* Colección Jorge Alvárez Lleras No 13. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Padilla-Gil, D.N. & Nieser, N. 2003. Nueva especie de Tachygerris y nuevos registros de colecta de los Gerridae (Hemiptera: Heteroptera) de Colombia. Agronomía Colombiana 21 (1-2): 51-57.
- Padilla-Gil, D.N. 2010a. Five new species of *Buenoa* (Hemiptera: Heteroptera: Notonectidae) from Colombia. *Zootaxa* 2411: 22-32.
- Padilla-Gil, D.N. 2010b. Two new species of *Martarega* (Hemiptera: Heteroptera: Notonectidae) and a new species of *Tachygerris* from Colombia. *Zootaxa* **2560:** 61-68.
- Padilla-Gil, D.N. 2012a. Two new species of *Rhagovelia* from Colombia (Hemiptera:Heteroptera: Veliidae) with revised keys to the Colombian species in the *torquata* and *robusta* groups. *Zootaxa* 325: 57-63
- Padilla-Gil, D.N. 2012b. Los hemípteros acuáticos del Municipio de Tumaco (Nariño, Colombia). Guía ilustrada. Editorial Universitaria-Universidad de Nariño, San Juan de Pasto.
- Padilla, D.N. 2013. Description of the egg and immature stages of *Potamobates anchicaya* J. Polhemus & D. Polhemus, 1995 (Hemiptera: Heteroptera: Gerridae) and intersexual variation in adults". *Zootaxa*. 5: 524-532.
- Padilla, D.N, y F. Ferraz. 2013. Two new species of *Microvelia*, 1834 (Hemiptera: Heteroptera: Veliidae) from Colombia, with a key to Colombian species. *Zootaxa*. 5: 587-595.
- Padilla, D.N. 2014. New records of aquatics Heteroptera (Hemiptera) from the Andean foothills of the Amazonia (Putumayo, Colombia). *Revista Colombiana de Entomologia*. 40 (2): 234-238.

- Padilla, D.N. 2014. Distribución espacial de las especies del género Buenoa Kirkaldy 1904 (Hemiptera: Notonectidae) en Tumaco (Nariño, Colombia). Acta Biológica Colombiana. 19 (1): 83-88.
- Padilla, D.N. 2015. Gerromorpha y Nepomorpha (Heteroptera) del Pacífico de Colombia; lista de especies, distribución geográfica y altitudinal. *Biota Colombiana*. 16 (1): 20-35.
- Padilla, D.N. 2015. Description of the egg and immature stages of *Martarega lofoides* Padilla-Gil, 2010 (Hemiptera: Heteroptera: Notonectidae). *Zootaxa*.4: 593-599.
- Padilla, D.N. 2015. Ten new species of *Rhagovelia* in the angustipes complex (Hemiptera: Heteroptera: Veliidae) from Colombia, with a key to the Colombian species. *Zootaxa*. (1): 71-95.
- Padilla, D.N. 2016. Las chinches semi-acuáticas de la Reserva Natural Río Ñambí (Nariño), Colombia. Acta Biologica Colombiana. 21 (1): 201-206.
- Paggi, A.C. 1999. Los Chironomidae como indicadores de calidad de ambientes dulceacuícolas. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina* 58: 202-207.
- Palacino-Rodríguez, F. 2009. Dragonflies (Anisoptera: Odonata) 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.
- Parra- Trujillo, Y.T, D. N. Padilla y G. Rreinoso. 2014. Diversidad y distribución de *Rhagovelia* (Hemiptera, Veliidae) del departamento del Tolima". *Revista de la* Asociación Colombiana De Ciencias Biológicas. 26: 82-88.
- Patiño-González J. (Hermano Daniel). 1941 Apuntes sobre algunos moluscos colombianos. *Revista de la Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 4: 15-16.
- Patrick, R. 1949. A proposed biological measure of stream conditions, based on a survey of the Conestoga basin, Lacaster County, Pennsylvania. *Proc. Acad. Nat. Sci. Phila.*, 101: 277-341.
- Patrick, R. 1950. Biological measure of stream conditions. Sewage ind. Wastes. 22: 926-939.
- Pérez, G. & Roldán, G. 1978. Niveles de contaminación por detergentes y su influencia en las comunidades bénticas del Río Rionegro (Antioquia). Actualidades Biológicas 7 (24): 27-36.
- Pérez, L.A. & Gutiérrez. 2003. Estudio biotaxonómico de los odonatos (Insecta: Odonata Fabricius, 1973) del Distrito de Santa Marta (Magdalena, Colombia). Tesis de pregrado. Universidad del Magdalena, Facultad de Ciencias Básicas, Programa de Biología. Santa Marta, Colombia.
- Pérez-Gutiérrez, L.A. 2007. The larvae of *Teinopodagrion* caquetanum De Marmels and *T. vallenatum* De Marmels (Zygoptera: Megapodagrionidae). Odonatologica 36 (3): 307-313.
- Pérez-Gutiérrez, L.A., Monroy-González, J.D. & Realpe-Rebolledo, E.A. 2007. Local assemblage patterns of odonates in Central Chocó, Colombian Pacific Pp 183-199. En: India (Ed.). Odonata - Biology of dragonflies.

- Perla Alonso-Eguíalis, Mora, J.M. Campbel. B& Springer, M. (Eds). 2014. Diversidad, conservación y uso de los macroinvertebrados dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico. IMTA México.
- Pilsbry, H.A. 1955. South American land and freshwater mollusks. IX Colombian Species Lymnaeabogotensis.Proceeding of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia 87: 83-88.
- Polhemus, J.T. & Manzano, M.R. 1992. Marine Heteroptera of the Eastern Tropical Pacific (Gelastocoridae, Gerridae, Mesoveliidae, Saldidae, Veliidae).Pp. 302-320.En: Quintero, D. y Avello, A. (Eds.). Insects of Panamá and Mesoamérica. Oxford University Press.
- Polhemus, J.T. & Polhemus, D.A. 1995. A phylogenetic review of the *Potamobates* fauna of Colombia (Hemiptera: Gerridae) with descriptions on three new species. *Proceeding of the Biological Society of Washington* 97 (2): 350-372.
- Posada, J. A. & Roldán, G. 2003. Clave ilustrada y diversidad de las larvas de Trichoptera en el nor-occidente de Colombia. *Caldasia* 25 (1): 169-192.
- Posada-García, J.A., Abril-Ramírez, G. y Parra-Sánchez, L.N. 2008. Diversidad de los macroinvertebrados acuáticos del páramo de Frontino (Antioquia, Colombia). *Caldasia* **30** (2): 441-445.
- Posso, C.E. & González, R. 2008. Gerridae (Hemiptera: Heteroptera) del Museo Entomológico de la Universidad del Valle.*Revista Colombiana de Entomología* 34 (2): 230-238.
- Prain, T. 1956. On a collection of *Pomacea* from Colombia, with description of a new subspecies. *Journal of Conchology* 24: 73-79.
- Quintero, A. & Rojas, A.M. 1987. Aspectos bioecológicos del orden Trichoptera y su relación con la calidad del agua. *Revista Colombiana de Entomología* **13** (1): 26-38.
- Quiñonez, M., Ramírez, J. & Días, A. 1998. Estructura numérica de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos derivadores en la zona de ritral del río Medellín. *Actualidades Biológicas* 20: 7586.
- Ramírez, A. 1996. Six new dragonfly larvae of the family Gomphidae in Costa Rica, with a key to the Central American genera (Anisoptera). *Odonatologica* 25 (2): 143-156.
- Ramírez, A y Novelo-Gutiérrez, R. 1999. The Neotropical dragonfly genus *Macrothemis*: new larval descriptions and an evaluation of its generic status based on larval stage (Odonata: Libellulidae). *Journal of the North American Benthological Society* 18 (1): 67-73.
- Ramos, A. 1997. Coleópteros acuáticos y semiacuáticos en cuatro ríos del sur occidente colombiano. Tesis de pregrado. Universidad del Valle, Programa de Biología. Santiago de Cali, Colombia.
- **Realpe, E.** 2009. Diversidad del genero*Ischnura* (Odonata: Coenagronidae) y su relación con la altitud y orogenia de la Cordillera Oriental-Andes colombianos. Tesis de doctorado. Universidad de los Andes.

- **Reinoso-Flórez, G.** 1999. Estudio de la fauna béntica del río Combeima, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas*, Vol: 11 Fasc: 1 pp: 35-44.
- Reinoso, G., Guevara, G., Arias, D., García, J &Villa, F. 2007. Aspectos bioecológicos de la fauna entomológica de la cuenca mayor del río Coello - Departamento del Tolima, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* 19 (1):65-72.
- Reinoso, G., Guevara, G. Vejarano, M., García, J & Villa, F. 2008. Evaluación del río Prado a partir de los macroinvertebrados y de la calidad del agua. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* 20 (1): 102-116.
- Resh, V. H., Richard, H. N &. Barbour, M. T. 1995. Design and implementation of rapid assessment approaches for water resource monitoring using macroinvertebrates. *Aust. J. Ecology.*, 20: 108-121.
- Rincón, M. E. 2002. Comunidad de insectos acuáticos de la quebrada Mamarramos (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Entomología* 28 (1): 101-108.
- Rincón, M.E. 1996. Aspectos bioecológicos de los tricópteros de la quebrada Carrizal (Boyacá, Colombia). *Revista Colombiana de Entomología* 22: 53-60.
- Rincón, M.E. & Castro, M.I. 2008. Efecto del caudal sobre la emergencia de Trichoptera.Pp. 211-223. En: Donato, J.(Ed.) Ecología de un río de montaña de los AndesColombianos (Río Tota, Boyacá). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias. Bogotá, Colombia.
- Rincón, M.E. 1999. Estudio preliminar de la distribución altitudinal y espacial de los tricópteros en la cordillera Oriental, Colombia. Pp. 267-282. En: Andrade, M.G., Amat, G. y Fernández, F. (Eds.), Insectos de Colombia No 2. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Santafé de Bogotá.
- Ringuelet, R.A. 1972. Hirudíneos neotropicales de Colombia, Cuba y Chile, con descripción de una nueva especie de Oligobdella (Glossiphoniidae). Physis 31 (83): 345-352.
- Ringuelet, R.A. 1974. Los hirudíneos terrestres del género Blanchiardella Weber del Páramo norandino de Colombia. *Physis* **33** (86): 63-69.
- **Ringuelet, R.A.** 1975. Un nuevo hirudíneo de Colombia parásito de la trucha arco iris. *Neotropica* **21** (64): 1-4.
- Riss, W., Ospina, R. & Gutiérrez, J.D. (2002). Establecimiento de valores de Bioindicación para macroinvertebertados acuáticos de la Sabana de Bogotá. *Caldasia* 24 (1): 135-156.
- Roback, S.S. & Nieser, N. 1974. Aquatic Hemiptera (Heteroptera) from the Llanos Orientales of Colombia.*Proceedings of* the Academy of Natural Sciences of Philadelphia 126 (4): 29-49.
- Rocha, C.M. 1994. Diversidad en Colombia de los cangrejos del género *Neostrengeria*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Arbeláez Lleras No. 5. 143p.

- Rodríguez-Barrios, J., Ospina-Torres, R, Gutiérrez, J. D& Ovalle, H. 2007. Densidad y biomasa de macroinvertebrados acuáticos derivantes en una quebrada tropical de montaña (Bogotá, Colombia). *Caldasia* 29 (2): 397-412.
- Rodríguez-Barrios, J., Ospina-Torres, R. & Turizo-Correa, R. 2011. Grupos funcionales alimentarios de macroinvertebrados acuáticos en el río Gaira, Colombia. *Revista de Biología Tropical.* 59 (4): 1537-1552.
- 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.
- Rodríguez,G. 1972.Trichodactylidae from Venezuela, Colombia, andEcuador (Crustacea: Brachyura Alfre D E. Smalley Department of Biology, Tulane University, New Orleans, Louisiana 70118 and Reprinted from *Tulane Studies in Zoology and Botany*, Vol. 17, No. 3. p. 41-55.
- Rodriguez, G. 1981. Parte I; Arthropoda en Hulbert, S.H., G. Rodriguez y N.d. Sabtos (Ed). Aquatic biota of tropical South America. San Diego State University, San Diego, California. 223pp.
- Rodríguez, G. 1985. A new cavernicolous crab (Crustacea, Decapoda, Pseudothelphusidae) from Colombia. 33. 2 (73-80) (EnglM 20 ref., 3 figM 1 tab.)- Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas, Caracas 1010-A, Venezuela.
- Rojas, A.M. & Baena, M.L. 1993. Anacroneuria farallonensis (Plecoptera: Perlidae) una nueva especie para Colombia. Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle 1: 23-28.
- Rojas, A.M. & Zúñiga, M. del C. 1996. Aspectos bioecológicos del orden Ephemeroptera en cuencas de algunos ríos del Departamento del Valle del Cauca (Colombia). Pp. 453-472. En: Andrade, G., Amat, G. y Fernández, F. (Eds.). Insectos de Colombia. Estudios escogidos. Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Colección Jorge Álvarez Lleras No. 10.
- Rojas, A.M. Zuñiga, M. del C., Burbano, M.E. & Serrato, C. 1995. Altitudinal distribution of Ephemeroptera in the Farollones de Cali National Park, Colombia.Pp. 121-129. En: Corkum, L.P. y Ciborowski, J.J.N. (Eds.).Current directions in research on Ephemeroptera.Canadian Scholars Press, Inc. Toronto, Canadá.
- Rojas-Riaño, N.C. 2011. First record of the damselfly genus Anisagrion (Odonata: Coenagrionidae) from Colombia. *Revista Colombiana de Entomología* 37 (1): 164-165.
- Roldán, G., Builes, J. J., Trujillo, C. M. & Suárez, A. 1973. Efectos de la contaminación industrial y doméstica sobre la fauna béntica del río Medellín. *Actualidades Biológicas* 2 (5): 54-64.
- Roldán, G. 1980. Estudio limnológico de cuatro ecosistemas neotropicales diferentes con especial referencia a su fauna de efemerópteros. *Actualidades Biológicas* 9 (34): 103-117.
- Roldán, G. 1985. Contribución al conocimiento de las ninfas de efemerópteros en el Departamento de Antioquia. *Actualidades Biológicas* 14 (51): 3-13.

- **Roldán, G.** 1988. Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del Departamento de Antioquia. Fondo FEN-Colombia- Conciencias - Universidad de Antioquia, Editorial Presencia Ltda. Santafé de Bogotá.
- Roldán, G. 1999. Los macroinvertebrados y su valor como indicadores de la calidad del agua. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 23 (88): 375-387.
- **Roldán, G.** 2001. Estudio limnológico de los recursos hídricos del parque de Piedras Blancas. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* Colección Jorge Álvarez Lleras No. 9.
- **Roldán, G.** 2003. La bioindicacion de la calidad del agua en Colombia. Editorial Universidad del Antioquia, Medellín. 170p.
- Roldán, G, Zúñiga, M. del C, Zamora, H, Álvarez, L.F. Reinoso,
 G. & M. Longo, M. 2014. Capitulo de Colombia. En: Perla Alonso-Eguíalis, José Manuel Mora, Bruce Campbell y Monika Springer, Editores 2014. Diversidad, conservación y uso de los macroinvertebrados dulceacuícolas de México, Centroamérica, Colombia, Cuba y Puerto Rico. IMTA México.
- Romero, I.R., Pérez, S.M. & Rincón, M.E. 2006. Aspectos ecológicos de los Trichoptera del Parque Nacional Natural Cueva de los Guácharos, Huila (Colombia). *Actualidad y Divulgación Científica* **9:** 129-140.
- Romero, F. & Navarro, F. 2009. Lepidoptera. En:Domínguez, E. y Fernández, H. (Eds.). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología.Pp. 309-340. Primera Edición. Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Rosso de Ferradás, B. & Fernández, H.R. 1995. Acari, Hydrachnidia. Pp. 819-853. En: Loreto, E. y Tell, G. (Eds.). Ecosistemas de aguas continentales. Editorial Sur, Argentina.
- Rosso de Ferradás, B. & Fernández, H.R. 2005. Elenco y biogeografía de los ácaros acuáticos (Acari, Parasitengona, Hydrachnidia) de Sudamérica. *Graellsia* 61: 181-224.
- Rosso de Ferradás, B. & Fernández, H.R. 2009. Acari, Parasitengona, Hydrachnidia.. En: Domínguez, E. y Fernández, H. (Eds). Macroivertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biología.Pp 497-550. Fundación Miguel Lillo. Tucumán, Argentina.
- Rúa-García, G. A. 2012. Distribución y composición de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera en cuatro ríos de la Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia. Tesis de pregrado. Universidad del Magdalena. Programa de Biología, Santa Marta.
- **Rueda-Delgado, G.** (Ed.). 2002. *Manual de Métodos en Limnología*. Asociación Colombiana de Limnología. Pen Clips Publicidad y Diseño Ltda. Santafé de Bogotá.
- Ruíz, J., Ospina, R. & Riss, W. 2000a. Guía para la identificación genérica de larvas de quironómidos (Diptera: Chironomidae) de la Sabana de Bogotá. II. Subfamilia Chironominae. *Caldasia* 22 (1): 15-33.

- Ruíz, J., Ospina, R., Gómez, H. & Riss, W. 2000b. Guía para la identificación genérica de larvas de quironómidos (Diptera: Chironomidae) de la Sabana de Bogotá. III. Subfamilias Tanypodinae, Podonominae y Diamesinae. *Caldasia* 22 (1): 34-60.
- Salinas, L.G., Dias, L., Salles, F. & Bacca T. 2011. Three new species of *Baetodes* Needham & Murphy (Ephemeroptera: Baetidae) from Colombia. *Zootaxa* 3110: 61-68.
- Sánchez-Herrera, M.J. 2005. El índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party score), modificado y adaptado al cauce principal del río Pamplonita, Norte de Santanter. *Bistua* 3 (2): 54-67.
- Sánchez-Herrera, M.J. & Vendaño-Sánchez, M. 2005. Macroinvertebrados del Norte de Santander. Respuestas, Revista de la Universidad Francisco de Paula Santander 1: 3-20.
- Serna, D. 2003. Estructura de la comunidad de larvas del orden Trichoptera y su dinámica espacio-temporal en un gradiente altitudinal de la cuenca del río Manzanares, Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis de Pregrado. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad del Magdalena.
- Serna-Zamora, M.Y. & Zamora, H. G. 2004. Biogeografía y relaciones de similitud entre laspoblaciones de macroinvertebrados acuáticos epicontinentales en un transecto Cauca-Meta. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* **16** (1): 71-79.
- Shannon, C. E. &Weaver, W. 1949. The mathematical theory of communication. The Universisity of Illinois Press, Urbana, Illinois, pp 19-27, 82-103, 104-107.
- Sites, R. & Álvarez, L.F. 2010. Description of the female of *Procryphocricos perplexus* Polhemus (Hemiptera: Heteroptera: Naucoridae). *Zootaxa* **2562**: 66-68.
- Sládeček, V. 1962. A guide to limnosaprobical organisms. Sci. Pap. Inst. Chem. Technol. Water, 7 (2): 543-612.
- Soler, E. 1983. Contribución al estudio taxonómico y ecológico de caracoles (pulmonados de agua dulce) de la Sabana de Bogotá. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Programa de Biología. Santafé de Bogotá.
- Spangler, P.J. & Santiago-Fragoso, S. 1987. A revision of the genera Disersus, Pseudodisersus and Potamophilops of the Western hemisphere (Coleoptera: Elmidae) Smithsonian Contributions to Zoology No 446. Smithsonian Institution Press, Washington.
- Spangler, P.J. & Santiago-Fragoso, S. 1992. The aquatic beetle subfamily Larainae (Coleoptera: Elmidae) in México, Central America and West Indies. *Smithsonian Contributions to Zoology* No 528. Smithsonian Institution Press, Washington.
- Spangler, P.L. 1981. Coleoptera. En: Hulbert, S.H., Rodríguez, G y Santos, D. (Eds.). Aquatic Biota of Tropical South America.Part 1.Pp. 129-220. San Diego State University. San Diego, California.
- Springer, M., Ramírez, A. & Hanson. P. 2010. Macroinvertebrados de Agua dulce de Costa Rica I. *Revista de Biología Tropical*, 58 (Supl. 4).

- Suárez, M. 1987. Contribución al estudio de los odonatos del Valle del Cauca. Tesis de grado. Universidad del Valle. Cali. Colombia.
- Stark, B.P., Froehlich, C. & Zúñiga, M. del C. 2009. South American stoneflies (Plecopera) En: Adis, J., Arias, J.R., Golovatch, S., Wantzen, K.M. y Rueda-Delgado, G. (Eds.). Aquatic Biodiversity of Latin America (ABLA), Vol 5. Pensoft, Sofia-Moscow.
- Stark, B.P., Zúñiga, M. del C., Rojas, A.M. & Baena, M.L. 1999. Colombian *Anacroneuria*: descriptions of new and old species (Insecta: Plecoptera: Perlidae). *Spixiana* 22: 13-46.
- Stark, P.B. & Zúñiga, M. del C. 2003. The Anacroneuria guambiana complex of South America (Plecoptera: Perlidae). Pp. 151-159. En: Gaino, E. (Ed.). Research update on Ephemeroptera and Plecoptera. University of Perugia, Italy.
- Stark, P.B. Zúñiga, M. del C. & Sivec, I. 2002. Description of Anacroneuria (Plecoptera: Perlidae) from the upper Río Amazonas drainage, Colombia and Perú. Acta Entomologica Slovenica 9 (2): 119-122.
- Statzner, B., B. Bis, S. Dolédec & P. Usseglio-Polatera. 2001. Perspectives for biomonitoring at large spatial scales: a unified measure for the functional composition of invertebrate communities in European running waters. Basic and Applied Ecology 2: 73-85.
- Suárez, M. 1987. Contribución al estudio de los odonatos del Valle del Cauca. Tesis de pregrado. Universidad del Valle. Programa de Biología. Santiago de Cali.
- **Tamaris-Turizo, C.** 2009. Transporte de materia orgánica y deriva de macroinvertebrados acuáticos a lo largo de un río tropical. Tesis de Maestría en Acuicultura y Ecología Acuática Tropical. Instituto de Posgrados. Universidad del Magdalena.
- Tamaris-Turizo, C. & Sierra-Labastidas, T. 2009. Una inspección al papel de la producción de los Plecopteros en los sistemas lóticos. *Revista de Ciencias. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas de la Universidad del Valle. Vol.* 13: 109-120
- Tamaris-Turizo, C., Turizo, R. & Zúñiga, M. del C. 2007. Distribución espacio-temporal y hábitos alimentarios de ninfas de Anacroneuria (Insecta:Plecoptera:Perlidae) en el río Gaira (Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia). Caldasia 29 (2): 375-385.
- Towsend, C. R. & M. R. Scarsbrook. 1997. Quantifying disturbance in streams: alternative measures of disturbance in relation to macroinvertebrate species traits and species richness. J. N. Am. Benthol. Soc., 16 (3): 531-544.
- Trihadiningrum, Y., N. De Pauw, I. Tjondronegoro & R. F. Verheyen. 1996, Use of benthic macroinvertebrates for quality assessment of the Blawi river (East Java, Indonesia), en: *Perspectives in tropical limnology*, F. Schiemer y K. T. Boland, eds., SPB Academic Publishing, Amsterdam.
- Urrutia, M.X. 2005. Riqueza de especies de Odonata Zigoptera por unidades fisiográficas en el Departamento del Valle

del Cauca. Boletín del Museo de Entomología de la Universidad del Valle **6** (2): 30-36.

- Valencia, D& Campos, M. 2007. Freshwater prawns of the genus Macrobrachium Bate, 1868 (Crustacea: Decapoda: Palaemonidae) of Colombia. Zootaxa 1456: 1-44 (2007).
- Vásquez, J.M., Ramírez, F. Guevara G & Reinoso, G. 2010. Distribución espacial y temporal de los tricópteros inmaduros de la cuenca del Río Totaré (Tolima, Colombia). *Caldasia* **32** (1): 129-148.
- Vásquez-Ramos, M. y Reinos-Flórez, G. 2012. Estructura de la fauna béntica en corrientes de los Andes colombianos. *Revista Colombiana de Entomología* 38 (2): 351-358.
- Vásquez, J.M. Guevara G & Reinoso, G. 2013. Impactos de la urbanización y agricultura en cuencas con bosque seco tropical: influencia sobre la composición y estructura de larvas de tricópteros. *Rev. Asoc. Col. Cienc. Biol.*(Col.), 25: 61-70.
- Vásquez, J.M. Guevara G & Reinoso, G. 2014. Factores ambientales asociados con la preferencia de habitat de larvas de tricopteros en cuencas con bosque seco tropical (Tolima, Colombia). *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol.* 7744) Vol. 62 (Suppl. 2): 21- 40.
- Viets, K. 1956. Wassermilben (Hydrachnellae, Acari) aus Venezuela und Kolumbien Pp. 315-327. *En*: Ergebnisse der deutschen limnologischen Venezuela-Expedition 1952. Band 1. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin.
- von Ellenrieder, N. & Garrison, R.W. 2009. Odonata. En: Domínguez, E. y Fernández, H. (Eds.). Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología. Pp. 96-143. Primera Edición. Fundación Miguel Lillo, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- von Prahl, H. 1988. Cangrejos de agua dulce (Crustacea, Brachyura, Pseudothelphusidae y Trichodactylidae) capturados en el Departamento de Antioquia, Colombia. *Boletín. Ecotrópica* 18: 3-11.
- Walter, C. 1914. Hydracarina de Colombie. En: Fuhrmann, O. y Mayor, E. Voyage d'exploration scientifique en Colombie. Pp. 193-201. Mémoires de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles. Vol. 5. Neuchatel, Attinger.
- Watling, L. 2003. A new species of *Hyalella* from Colombia, and the redescription of H. meinerti Stebbing, 1899 from Venezuela (Crustacea: Amphipoda). *Journal of Natural History*, **37** (17), 2095-2111.
- Washington, H. G. 1984. Diversity, biotic and similarity indices. Water Res., 18 (6): 653-694.
- Wayne, N. & Hogue, Ch. 1986. Description of the new species of the shore fly genus *Driedrops* (Diptera; Ephydridae) from Colombia. *Contributions in Sciences-Natural History Museum of Los Angeles County* 377: 21-26.
- Weber, M. 1913. Hirudinéens Colombiennes. Mémoires de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles 5: 731-747.
- Welkenson, R.C. 1979. Horse-flies (Diptera: Tabanidae) of the Colombian Departments of Chocó, Valle, and Cauca. *Cespedecia* 8 (31-32): 87-435.

- Wiedenbrug, S. & Ospina-Torres, R. 2005. A key to pupal exuviae of Neotropical Tanytarsini (Diptera: Chironomidae). *Amazoniana* 18 (3-4): 317-371.
- Wilhm, J. F. y Dorris, T.C. 1968. Biological parameters of water quality. *Bioscience* 18: 447-481.
- Wilhm, J. L. 1967. Comparison of some diversity indices applied to populations of benthic receiving organic wastes. J. Wat. Pollut. Control. Fed., 39: 1673-1683.
- Wilhm, J. L., & Dorris, T. C. 1966. Species diversity of benthic macroinvertebrates in a stream receiving domestic and oil refinery effluents. *Am. Midl. Nat.*, 76: 427-449.
- Wilhm, J. L., & T. C. Dorris. 1968. Biological parameters for water quality criteria. *Bioscience*, 18: 447-481.
- Williamson, E.B. 1918a. A collecting trip to Colombia, South America.*Miscellaneous Publications.Museum of Zoology* of Michigan 3: 1-24.
- Williamson, E.B. 1918b. Results of the University of Michigan-Williamson expedition to Colombia, 1916-1917: two interesting new Colombian Gomphines (Odonata). Occasional papers of the Museum pf Zoology of Michigan 52: 1-14.
- Williamson, E.B. 1919. Results of the University of Michigan-Williamson Expedition to Colombia, 1916-1917: notes on species of the genus *Heteragrion* Selys with descriptions of new species (Odonata). Occasional papers of the Museum of Zoology of Michigan. 68: 1-89.
- Williamson, E.B. 1920. Results of the University of Michigan-Williamson Expedition to Colombia, 1916-1917: Notes on species of the genus *Progomphus* (Odonata). *Occasional papers of the Museum of Zoology of Michigan* No 77: 1-21.
- Wooldride, D. 1973. New Paracymus from South America. Journal of Entomological Society 46: 116-123.
- Wooldridge, D. 1976. New world Limnichidae. VI. A revision of Limnichoderus Casey (Coleoptera: Limnichidae). Journal of the Kansas Entomological Society 11: 163-173.
- Zamora, H. 1995. Relaciones de similitud entre comunidades de macroinvertebrados dulceacuícolas de ecosistemas lénticos, ubicados entre la costa pacífica caucana y el piedemonte amazónico. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* 9 (1-2): 7-21.
- Zamora, H. 1996. Aspectos bioecológicos de las comunidades de macroinvertebrados dulceacuícolas en el Departamento del Cauca. Unicauca Ciencia 1: 1-11.
- Zamora, H. 2000. Adaptación del índice BMWP para la evaluación biológica de la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia. *Unicauca Ciencia* 4: 47-59.
- Zamora, H. 2002. Análisis biogeográfico de los macroinvertebrados acuáticos epicontinentales (MAE) en el Departamento del Cauca, Colombia. *Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* 14 (1): 37-64.
- Zamora, H. 2010. Importancia de los macroinvertebrados acuáticos epicontinentales en la dieta natural de tres especies de peces

nativos del río Patía, departamento del Cauca. *Unicauca Ciencia* (13): 65-75.

- Zamora, H. & Roessler, E. 1995. Descripción morfológica y taxonómica de una nueva especie de Anacroneuria (Insecta-Plecoptera). Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas 9 (1-2): 85-91.
- Zamora, H. y Roessler, E. 1997. Número de estadios nayadales, ciclo biológico y patrón de crecimiento de *Anacroneuria caucana* (Insecta: Plecoptera). *Unicauca Ciencia* 2: 15-24.
- Zamora, H., Naundorf, G. & Vásquez, G.L. 1996. Macroinvertebrados dulceacuícolas del Parque Natural Nacional Isla Gorgona, Departamento del Cauca. Unicauca Ciencia 1: 12-18.
- Zamora, H. & Sarria, H. 2001. Calidad biológica de dos ecosistemas lóticos afectados por aguas residuales de rallanderías de yuca mediante la utilización de sus macroinvertebrados acuáticos como bioindicadores, comparando además la aplicación de los índices de Shannon-Weaver y BMWP. *Unicauca Ciencia* **6**: 21-42.
- Zúñiga, M. del C. 2009. Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental.: Caso del Río Meléndez (Valle del Cauca, Colombia). Pp. 303-310. En: Cantera, J., Y. Carvajal y L. Castro (Compiladores). Caudal ambiental: Conceptos Experiencias y Desafíos. Programa Editorial de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Zúñiga, M. del C. 2010. Diversidad, distribución y ecología del orden Plecoptera (Insecta) en Colombia, con énfasis en Anacroneuria (Perlidae). Universidad de la Amazonía. Momentos de Ciencia 7 (2): 101-112.
- Zúñiga, M. del C. Rojas, A.M. & Caicedo, G. 1993. Indicadores ambientales de calidad de agua en la cuenca del Río Cauca. *Revista de la Asociación de Ingenieros Sanitarios de Antioquia- AINSA* 13 (2): 17-28.
- Zúñiga, M. del C. Rojas, A.M. & Mosquera, S. 1997. Biological aspect of Ephemeroptera in rivers of southwestern Colombia (South América). Pp. 261-268. En: Landolt, P. y Sartori, M. (Eds). Ephemeroptera and Plecoptera biology, ecology and systematics. MTL, Mauron Tinguely y Lachat S.A., Switzerland.
- Zúñiga, M. del C. Stark, B.P., Rojas, A.M. & Baena, M.L. 2001. Colombian Anacroneuria (Insecta: Plecoptera: Perlidae): Biodiversity and distribution. Pp. 301-304. En: Domínguez, E. (Ed.) Trends in Research in Ephemeroptera and Plecoptera. Kluwer Academic Plenum Publishers, New York, USA.
- Zúñiga, M. del C. & Stark, B.P. 2002. New species and records of Colombian Anacroneuria (Insecta: Plecoptera: Perlidae). Spixiana 25 (3): 209-224.
- Zúñiga, M. del C. Molineri, C. & Domínguez, E. 2004. El Orden Ephemeroptera en Colombia. p. 17-41. *En*: Andrade. M.G., Amat García. G., Fernández F. (Eds.). Insectos de Colombia. Vol 3. Universidad Nacional de Colombia e Instituto Humboldt. Santafé de Bogotá, Colombia.

- Zúñiga, M. del C. Stark, B.P., Vázcones, J.J., Bersosa, F. & Vimos, D. 2006. Colombian and Ecuadoran Anacroneuria (Plecoptera: Perlidae) - new species, records and life stages. Studies on Neotropical Fauna and Environment 41 (1): 45-57.
- Zúñiga, M. del C. & Stark, B.P. 2007. The first record of *Macrogynoplax* Enderlein (Plecoptera: Perlidae) from the Colombian Amazon. *Illiesia* 3 (11): 102-103.
- Zúñiga, M. del C., Stark, B.P., Cardona, W., Tamaris, C. y Ortega, O.E. 2007. Additions to the Colombian *Anacroneuria* (Plecoptera: Perlidae) with descriptions of seven new species. *Illiesia* 3 (13): 127-149.
- Zúñiga, M. del C. y Cardona, W. 2009. Bioindicadores de calidad de agua y caudal ambiental. Pp. 167-198, *En*: Cantera, J., Carvajal, Y. y Castro, L. (Compiladores). Caudal ambiental: conceptos experiencias y desafíos. Programa Editorial de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Zúñiga, M. del C. Días, L., Martínez, D., Zabala, G. & Bacca,
 T. 2009. The first record of *Claudioperla* Illies (Plecoptera: Gripopterygidae) from Colombia. *Aquatic Insects* 31 (Supplement 1): 743-744.

Inaugural article

Climate, habitat associations and the potential distributions of Neotropical birds: Implications for diversification across the Andes

Carlos Daniel Cadena^{1, *}, Carlos A. Pedraza^{1,2}, Robb T. Brumfield³

¹Laboratorio de Biología Evolutiva de Vertebrados, Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia ²The Nature Conservancy, Bogotá, Colombia

³Museum of Natural Science and Department of Biological Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, USA

* Inaugural article by corresponding member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences in October 7, 2015.

Abstract

Contrary to the long-held view that the uplift of the Andes spurred biotic diversification by causing vicariance across multiple lineages with formerly continuous distributions, recent work suggests that dispersal across the Andes occurring after major uplift episodes was a major driver of speciation in Neotropical birds, with the ability of lineages to persist and disperse in the landscape being strong predictors of speciation. However, where and when dispersal events across the Andes occurred is unknown, and the role of climatic fluctuations and associated shifts in vegetation in promoting cross-Andes dispersal at different moments remains to be studied. We used models of species potential distributions based on contemporary and historical climatic data to examine scenarios of cross-Andes dispersal by 41 species of Neotropical lowland birds with varying habitat affinities. Our results indicate that ecological connectivity favoring cross-Andes dispersal at the present is higher in low-lying passes across the Andes of southern Ecuador and northern Peru than in passes in Colombia, and this spatial pattern appears to have been consistent at four different moments over the past 130,000 years. We also found that although some areas may be presently unsuitable for the dispersal of birds across the Andes, under past climatic conditions (i.e. during cooler and drier periods) they were substantially more likely to allow for ecological connectivity of populations across the cordillera. No consistent differences were found in ecological connectivity across the Andes in the present nor in the past for species occupying different habitat types. We suggest that valleys in the Andes are major drivers of evolutionary diversification not only by isolating populations of montane species, but also by allowing episodic dispersal of lowland species. Our models allow us to make predictions about gene flow which may be assessed in future studies examining fine-grain patterns of genetic exchange with landscape genetics tools. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Andean uplift, climatic change, isolation by resistance, lowland forest, speciation, species distribution models.

Clima, asociaciones de hábitat y la distribución potencial de aves neotropicales: implicaciones para la diversificación a través de los Andes

Resumen

En contraste con la visión tradicional de que el levantamiento de los Andes impulsó la diversificación biótica causando vicarianza en varios grupos con distribuciones que antes eran continuas, investigaciones recientes sugieren que eventos de dispersión a través de los Andes sucedidos después de los principales episodios de levantamiento fueron catalizadores principales de la especiación en aves neotropicales, y que la habilidad de los linajes para persistir y dispersarse en el paisaje predice fuertemente los patrones de especiación. Sin embargo, se desconoce cuándo y dónde sucedieron dichos eventos de dispersión, y el papel de las fluctuaciones climáticas y el consecuente desplazamiento de la vegetación como promotores de la dispersión a través de los Andes en distintos momentos no ha sido estudiado. Empleamos modelos de la distribución potencial de especies basados en datos de clima actual e histórico para examinar escenarios de dispersión a través de los Andes en 41 especies de aves neotropicales de tierras bajas con diferentes afinidades de hábitat. Nuestros resultados indican que la conectividad ecológica que favorecería la dispersión a través de los Andes en el presente es mayor en pasos bajos de la cordillera del sur de Ecuador y el norte de Perú que en pasos bajos de Colombia, y este patrón espacial parece haberse mantenido en cuatro momentos diferentes de los últimos 130,000 años. También encontramos que aunque algunas áreas actualmente no serían propicias para la dispersión de las aves a través de los Andes, bajo condiciones climáticas del pasado (i.e. durante períodos más fríos y secos) presentaron condiciones climáticas sustancialmente más idóneas para permitir la conectividad ecológica de poblaciones a través de la cordillera. No encontramos diferencias consistentes en la conectividad ecológica presente y pasada a través de los Andes entre especies de diferentes tipos de hábitat. Sugerimos que los valles andinos impulsan la diversificación evolutiva no solo porque aíslan las poblaciones de especies de montaña, sino porque permiten la dispersión episódica de especies de las tierras bajas. Nuestros modelos permiten hacer predicciones sobre flujo genético que pueden ser evaluadas en estudios futuros que examinen patrones de intercambio genético a escala fina usando herramientas de genética del paisaje. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: aislamiento por resistencia, bosque de tierras bajas, cambio climático, especiación, levantamiento andino, modelos de distribución de especies.

Introduction

Various historical hypotheses have been proposed to explain the origin of the astounding diversity of species in tropical South America. Many of these hypotheses are focused on processes leading to the geographic isolation of populations and their subsequent evolutionary differentiation; these processes include the uplift of the Andes, climatic fluctuations resulting in habitat fragmentation during the Quaternary, the emergence of riverine barriers, and marine incursions (Wallace, 1852; Haffer, 1967a; Haffer, 1969; Nores, 1999; Hoorn et al., 2010). The uplift of the Andes was an important driver of avian diversification because it resulted in the origin of novel environments to which species could disperse and diversify in, and because it promoted increased opportunities for allopatric differentiation in montane areas (Chapman, 1917; Hughes & Eastwood, 2006). The Andes also influenced the diversification of organisms distributed in surrounding lowland areas, serving as an effective barrier isolating populations on either side of the cordillera (Chapman, 1917; Brumfield & Capparella, 1996; Hoorn et al., 2010). Many lowland avian species are currently present on both sides of the Andes, suggesting that they were continously distributed prior to the Andean uplift or that dispersal across this newly formed barrier was plausible at times in the past (e.g. when vegetation belts were displaced upslope due to climatic change; Hooghiemstra, Wijninga & Cleef, 2006).

Classic studies on the biogeography of Neotropical birds exposed somewhat distinct views on the role of the Andean upflit as a driver of diversification in lowland avifaunas and interpreted cross-Andes distributions in different ways. On one hand, although **Chapman** (1917; 1926) entertained the possibility of dispersal across or around the northern Andes, he believed this to be relatively rare and instead envisioned the existence of "a pre-Andean fauna, the Pacific portion of which has been cut off from that of upper Amazonia by the Andean uplift". Under this vicariant scenario, populations were fragmented by the Andes and differentiated largely in allopatry owing to lack of movement of individuals across the cordillera (**Chapman**, 1917; **Chapman**, 1926). Alternatively, **Haffer** (1967a; 1974) believed the existence of a pre-Andean fauna in western South America to be

*Corresponding author:

Carlos Daniel Cadena, ccadena@uniandes.edu.co Received: September 18, 2015 Accepted: May 19, 2016 unlikely because much of the landscape would have been covered by shallow seas prior to the uplift. Instead, he posited that, during humid periods, Amazonian species episodically "spilled over" into western South America across low passes in the Andes (**Haffer**, 1974) or dispersed around the Andes through the northern lowlands of Colombia (**Haffer**, 1967a; **Haffer**, 1967b). In sum, although both of these authors assigned a critical role to the Andes as a driver of the divergence of isolated lowland populations, they had different views about the relative importance of mechanisms initiating allopatric divergence across the cordillera.

A recent analysis of molecular phylogeographic data for multiple avian lineages from the Neotropical lowlands (Smith et al., 2014) rejected the hypothesis of a single vicariant event explaining population differentiation across the Andes and obtained results consistent with multiple events of cross-Andes dispersal at different moments, a result in line with previous studies on other groups (Brumfield & Capparella, 1996; Dick, Roubik, Gruber & Bermingham, 2004; Cheviron, Hackett & Capparella, 2005; Miller et al., 2008). However, where and when dispersal events across the Andes occurred is not fully understood, and the role of climatic fluctuations and associated shifts in vegetation in promoting cross-Andes dispersal at different time periods remains to be studied. Another noteworthy finding of recent studies is that avian species with presumably contrasting dispersal abilities and habitat affinities differ significantly in their genetic structure and temporal patterns of speciation across the Andes and other features of the South American landscape (Bates, Tello & Silva, 2003; Burney & Brumfield, 2009; Cadena, Gutiérrez-Pinto, Dávila & Chesser, 2011; Smith, Amei & Klicka, 2012; Smith et al., 2014). Taken together, the above data suggest that achieving a comprehensive understanding of avian diversification in the Neotropics will require considering the interaction between species' ecologies and physical and climatic features of the landscape thought to isolate populations or to facilitate dispersal across putative barriers.

A wealth of recent studies have revealed that, owing to restrictions imposed by their fundamental ecological niches (**Hutchinson**, 1957), species' distributions can be accurately predicted by associating spatial occurrence data with environmental (e.g. climatic, topographic) variables to generate models of potential distributions (**Guisan & Thuiller**, 2005). Moreover, because ecological niches tend to be evolutionarily conserved (**Peterson**, **Soberón**

& Sánchez-Cordero, 1999; Peterson, 2011), distribution models are often transferable in time, such that historical distributions can be predicted using current occurrence data (Martínez-Meyer, Peterson & Hargrove, 2004; Bonaccorso, Koch & Peterson, 2006; Martínez-Meyer & Peterson, 2006; Ruegg, Hijmans & Moritz, 2006; Nogués-Bravo, 2009). This opens the exciting possibility of generating hypotheses about species' historical distributions that can be tested rigorously using phylogeographic data (Hugall, Moritz, Moussalli & Stanisic, 2002; Carstens & Richards, 2007; Carnaval, Hickerson, Haddad, Rodrigues & Moritz, 2009; Bell et al., 2010; Pulgarín-R. & Burg, 2012). Here, we use species distribution modelling methods to examine scenarios of cross-Andes dispersal by Neotropical lowland birds. Specifically, we used models of species potential distributions based on contemporary and historical climatic data to address the following questions: (1) Given current climatic conditions, which passes in the Andes are more suitable for dispersal across the cordillera by species from lowland habitats? (2) How has habitat connectivity across passes in the Andes varied over time? (3) Do current and historical patterns of potential habitat connectivity across Andean passes differ between species with different habitat associations? Based on our answers to these questions, we describe new questions and challenges for future studies on the topic.

Methods

Study system

More than 100 bird species have disjunct distribution ranges in northern South America and lower Central America separated by discontinouous environments in the Andes (Smith et al. 2014). Although there is substantial variation in the distribution of species whose ranges span both sides of the Andes, two general patterns can be discerned (Figure 1). First, for ca. 90% of the species the distributions of populations east of the Andes occur to the southern and eastern border of the llanos, or, more rarely, extend to the Mérida Andes and other coastal ranges of Venezuela, either by penetrating the riparian forests of the llanos or the foothills forests along the eastern slope of the Cordillera Oriental. We refer to this as the "northern crossing distribution" because it suggests across-Andes dispersal occurred by moving through the lowlands north of the Andes (Haffer, 1967b), through the pass separating the Cordillera Oriental and Mérida Andes known as the Táchira Depression, or through the Andalucía Pass or the Suaza-Pescado valleys at the base of the Cordillera Oriental (Figure 2). Second, for the remainder ca. 10% of species, distributions of populations east of the Andes do not include northern Amazonia. We refer to this as the "southern crossing distribution" because it has been used (Chapman, 1926) to propose hypotheses of across-Andes dispersal through passes in southern Ecuador (Loja Valley) and northern Peru (Porculla Pass; Figure 2).

Species with cross-Andes distributions occur both in closed humid forests and in drier, more open environments. Our analyses focused on 41 lowland avian species with cross-Andean distributions in northern South America and with different habitat associations (Table 1). Based on habitat preferences described in databases (**Stotz, Fitzpatrick, Parker & Moskovits,** 1996), our experience, and that of field ornithologists consulted for this study (J. E. Avendaño, J. Pérez-Emán), we assigned each of the 41 species to one of three habitat categories: humid forest, both humid and dry forest, and dry forest and open areas (Table 1).

Species distribution modelling

Species presence records were obtained from the Louisiana State University Museum of Natural Science (http:// app1003.1su.edu/natsci/lmns.nsf/index), BIOMAP project (http:// www.biomap.net/), speciesLink (http://www.splink. org.br/). Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia (SiB; http://www.siac.net.co/), GBIF (http:// www.gbif.org/), and the Colección Ornitológica Phelps (http://fundacionwhphelps.org/). Because some locations in databases lacked spatial coordinates or were georeferenced inaccurately, we used gazetteers (Paynter, 1997; Sua, Mateus & Vargas, 2004) and various sources of digital cartography to georeference data based on descriptions of localities. All individual records of each species were mapped and suspicious records (i.e. those without locality information or with considerable deviations from the known geographic or elevational ranges of species) were eliminated. This resulted in a total of 17,404 presence records, which we used to model species potential distributions (mean 415.9 SD 232.6 records per species; Figure 3).

We associated distribution records with 19 climate variables (30" resolution clipped to continental areas ranging from 26°12' N to 35°20 S and from 34°42' W to 109 °45' W; Figure 3), which describe annual trends and extreme or limiting environmental factors in current climate (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005). The maximum entropy method implemented in MAXENT (Phillips, Anderson & Schapire, 2006) was used to predict the potential distributions of species at present using species locations and presentday climate layers. We set MAXENT parameters as autofeatures mode, with 10,000 background samples representing the climatic conditions of the analyzed area. We used 75% of the data for model training using present climatic conditions and 25% for validation purposes. Outputs were defined as a logistic format interpretable as the probability of presence conditioned on environmental variables (Phillips et al., 2006). Model performance was determined by using the AUC, i.e. the area under receiver-operator curves (Fielding & Bell, 1997). Using a large number of climatic variables to generate species distribution models may result in model overfitting; accordingly, researchers often minimize the number of variables included in models by excluding those strongly



Figure 1. A sampling of specimens of lowland Neotropical birds with cross-Andes distribution ranges selected to show the diversity of taxa with populations on both sides of the Andes. For a subset of the species, range maps (taken from NatureServe (Ridgely *et al.*, 2005)) are shown to illustrate a variety of distribution patterns. Most range maps shown are examples of the "northern crossing" distribution pattern; maps 9 and 13 are examples of the "southern crossing" distribution pattern. 1. *Myrmotherula axillaris* (Thamnophilidae), 2. *Taraba major* (Thamnophilidae), 3. *Sclerurus mexicanus* (Furnariidae), 4. *Automolus ochrolaemus* (Furnariidae), 5. *Patagioenas speciosa* (Columbidae), 6. *Pionus menstruus* (Psittacidae), 7. *Piaya cayana* (Cuculidae), 8. *Trogon collaris* (Trogonidae), 9. *Baryphthengus martii* (Momotidae), 10. *Dendrocincla fuliginosa* (Furnariidae), 11. *Microcerculus marginatus* (Troglodytidae), 12. *Saltator grossus* (Incertae Sedis), 13. *Arremon aurantiirostris* (Emberizidae), 14. *Tangara gyrola* (Thraupidae), 15. *Tityra semifasciata* (Tityridae), 16. *Querula purpurata* (Cotingidae). Photograph and figure design by C. Burney and L. Céspedes.

correlated to others or by reducing the dimensionality of data using principal components analysis. However, we chose to include all 19 WorldClim variables in our models because correlations among variables differed between species from dry and humid forests, and we were interested in predicting potential distributions using the same climatic variables across all species. In addition, model overfitting may be less of a problem for situations with a large number of localities per species like in our study, and we note that MAXENT incorporates a penalization for terms included in the model using a regularization multiplier that guards agains problems related to overparametrization (**Phillips et al.**, 2006). Climate-based models accurately predicted species distributions in the present (mean AUC 0.9437, SD 0.0187). This allowed us to project models onto layers depicting reconstructions of past climate to generate hypotheses of historical distributions; this approach assumes niche conservatism, that climate constrains species' distributions and that species distributions at present are at equilibrium with current climate (**Peterson** *et al.*, 1999; **Peterson**, 2003; **Carnaval** *et al.*, 2009; **Tingley, Monahan, Beissinger & Moritz**, 2009). Specifically, models were projected to the past to infer potential distributions in the Mid Holocene —6 thousand years before present (kyr BP)—, the Last Glacial



Figure 2. Topographic map of northern South America showing the location of low-lying passes in the Andes across which avian species may have dispersed. We refer to the pass in southern Ecuador as the Loja Valley following **Chapman** (1926), but note that because the Loja Valley does not face the Amazon basin, the area might be best referred to as Loja-Zamora valleys (**Krabbe**, 2008). The literature has focused on the Táchira and Andalucía passes in Colombia, but preliminary analyses for this study revealed the existence of another area through which species may cross south of Andalucía; we refer to this pass as that of the Suaza-Pescado valleys based on rivers flowing through the area.

Maximum —LGM, 21 kyr BP— (**Braconnot** *et al.*, 2007), and the last interglaciation period —130-116 kyr BP— (**Kukla** *et al.*, 2002; **Otto-Bliesner** *et al.*, 2006). Climatic data for these historical periods were also obtained from WorldClim (http://www.worldclim.org/paleo-climate).

Estimating connectivity across passes

We measured ecological connectivity across passes in the Andes for lowland species of birds with ranges on both sides of the cordillera using an approach grounded in electrical circuit theory (**McRae**, 2006). This approach allows one

Table 1. Bird species included in our analyses of ecological connectivity of potential distributions across the Andes in the present and at three moments in the past. For each species, habitat affinites are indicated.

	Humid forest	Dry forest	Open areas
Trochilidae			
Glaucis hirsuta	Х		
Thamnophilidae			
Cymbilaimus lineatus	Х		
Taraba major	Х		
Thamnophilus doliatus		Х	
Dysithamnus mentalis	Х		
Myrmotherula ignota/obscura	X		
Formicivora grisea	Х	Х	
Furnariidae			
Sclerurus mexicanus	Х		
Sittasomus griseicapillus	Х		
Glyphorynchus spirurus	X		
Clibanornis rubiginosus	X		
Automolus ochrolaemus	X		
Synallaxis albescens		Х	х
Tyrannidae			
Flaenia flavogaster			x
Mionectes oleagineus	x		21
Myjophobus fasciatus	24		x
Terenotriccus erythrurus	x		Λ
Colonia colonus	X		v
Cotingidae	Λ		Λ
Quarula purpurata	x		
Pinridao	28		
Managus managus	v	v	
Constanting anythrocombala	A V	Λ	
Tityridaa	Λ		
Titurg inquisitor	v		
Tityra inquisitor	A V		
Schiffornia turding (consulato)			
Troglodytidae	Λ		
Miana a anallus manain stus	v		
Microcerculus marginalus			
	A V		
	Λ		
Ponotpindae	v		
Microbates cinereiventris	Х		
	V	V	
Eucometis penicillata	X	Х	
Tachyphonus luctuosus	Х	37	37
Thraupis episcopus		Х	Х
Tangara gyrola	X	••	
Tersina viridis	Х	Х	
Chlorophanes spiza	X		
Cyanerpes caeruleus	Х		
Sporophila nigricollis			Х
Emberizidae			
Arremon aurantiirostris	Х		
Cardinalidae			
Habia rubica	Х		
Cyanocompsa cyanoides	Х		
Incertae Sedis			
Saltator maximus	Х		
Icteridae			
Psarocolius angustifrons	Х		

to calculate resistance distances over a landscape; such distances measure the opposition of the environments in a given grid cell to movement of organisms. The inverse of resistance (conductance) can be interpreted to represent the likelihood of a dispersing individual choosing to move through a given grid cell relative to others available and in population-genetic applications is a proxy for migrants exchanged between populations (McRae, Dickson, Keitt & Shah, 2008). We calculated resistance/conductance distances using CIRCUITSCAPE, an algorithm that jointly considers random-walk theory and the effect on connectivity of multiple routes linking two localities (McRae et al., 2008). Resistance distances estimated using this approach have been shown to outperform traditional population genetic models (isolation by distance, least-cost path models) in predicting population structure (McRae & Beier, 2007), suggesting they are an appropriate measure of ecological connectivity in space.

To measure ecological connectivity across five main Andean passes hypothesized to have allowed for dispersal of avian species across the cordillera in Colombia, Ecuador and northern Peru (Chapman, 1917; Chapman, 1926; Haffer, 1967a; Haffer, 1967b), we delimited a 50x50 km quadrat around each pass (Figure 2). We then used surfaces with relative probabilities of presence generated for each of our study species (i.e. the MAXENT output of potential distribution models) to calculate cross-Andean connectivity at each pass for each species and at each time period as the conductance (i.e. the inverse of resistance) estimated using circuit-theory models of all alternative pathways crossing the Andes in the defined quadrat (McRae et al., 2008). To compare connectivity among passes and among time periods, we used mean conductance values across the 50 1x1km pixels contained within each quadrat.

Results

We illustrate our approach with an analysis of the potential distribution of White-bearded Manakin (Manacus manacus) at present and at the LGM focusing on the Andalucía Pass sector of the Cordillera Oriental of Colombia (Figure 4). The potential distribution range of this species appears to have been smaller and more discontinuous during the LGM than at present; a dimensionless proximity metric calculated by estimating the distance of every patch of suitable habitat to its nearest suitable neighboring patch (Gustafson & Parker, 1992) averaged (\pm SD) 1552 \pm 202 for the LGM and 7427 \pm 1347 for the present. Not only do potential ranges differ across time periods in size and continuity, but also in the suitability of the Andalucía Pass for the presence of the species. Although this pass is climatically unsuitable for M. manacus at present, the model suggests it was potentially suitable at the LGM, when there was much greater potential for connectivity between populations from the eastern slope of the Andes and the upper Magdalena Valley (Figure 4).



Figure 3. Study area and location of 17,404 presence records used to model the potential distributions of 41 avian species with cross-Andean distributions in the Neotropical lowlands.

Based on analyses of the present-day potential distributions of our 41 study species, conductance index values are highest across the Porculla Pass, suggesting this area is most suitable for dispersal of species across the Andes given current climatic conditions; connectivity of potential species distributions across the Andes is intermediate in the Loja, Táchira, and Andalucía passes, and lowest in the Suaza-Pescado pass (Figure 5). Present-day patterns in climatic connectivity across the Andes are similar to those estimated for 6 kyr BP. Conductance index values were considerably different at earlier periods (21 and 130 kyr BP; see below), but the overall pattern persisted over time: connectivity was consistently highest across the Porculla pass and lowest across the Suaza-Pescado pass across all time periods.

Our models indicate that relative to the present, connectivity of potential species distributions across the Andes was generally greater during the LGM (21 kyr BP) and 130 kyr BP than 6 kyr BP and at present (Figure 5). For the two southernmost passes (Loja and Porculla), connectivity was estimated to be greatest during the LGM, but for the northern passes (Táchira, Andalucía, and Suaza-Pescado) connectivity was similar during the LGM and 130 kyr BP. We found no consistent effects of the habitat affinities of species on patterns of climatic connectivity across Andean passes at different moments in time (Figure 5). Species in all three habitat categories showed the general pattern of increased potential connectivity 21 and 130 kyr BP relative to 6 kyr BP and the present, with some minor exceptions. First, connectivity across the Táchira and Andalucía passes for species occupying both humid and dry forests during the LGM tended to be lower than that estimated for species from only humid or only dry/open areas, and did not differ from estimates for 6 kyr BP and the present. Second, connectivity across the Suaza-Pescado, Loja, and Porculla passes at the LGM (and at 130 kyr BP por the latter two passes) tended to be greater for species from humid forests relative to those in other habitat categories.

Discussion

The uplift of the Andes undoubtedly had far-reaching effects on the Neotropical landscape and on the organisms occupying it. For avian species from lowland environments, the Andean uplift had various consequences for mechanisms affecting speciation, which include the physical isolation of populations



Figure 4. Left: Comparison of the predicted potential distributions of *Manacus manacus* for the present (brown) and the Pleistocene LGM (21 kyr BP; horizontal hatching) in Colombia suggests that the species' potential range extended more to the west in the past, crossing over the highest point in the Cordillera Oriental at the Andalucía Pass (encircled in green) to the Magdalena Valley slope. The inset shows the point localities used to build the model and the predicted potential distribution at present at a broader scale, which agrees well with the known distribution range of this taxon. Right: detailed view of the Andalucía Pass showing the relative probability of occurrence of *M. manacus* (more suitable sites are shown in orange/yellow, unsuitable sites in cyan/blue) in the region at present (top) and during the LGM (bottom). Note the much greater potential for connectivity across the Andes between points A and B (the line indicates a hypothetical crossing route across the cordillera) in the historical potential distribution.

on either side of the cordillera, the formation of the Amazon River system in its current configuration, and changes in precipitation patterns leading to the ecological isolation of large blocks of humid forest by arid environments (Haffer, 1967a; Haffer, 1967b; Hoorn et al., 2010). Accordingly, a large body of work on Neotropical avian biogeography has focused on describing patterns of genetic differentiation and area relationships seeking to test predictions of hypotheses linking Andean orogeny with evolutionary diversification (Brumfield & Capparella, 1996; Antonelli, Nylander, Persson & Sanmartín, 2009; Antonelli et al., 2010; Ribas, Aleixo, Nogueira, Miyaki & Cracraft, 2012). Consensus appears to be emerging that the hypothesis that Andean uplift resulted in pervasive cross-species vicariance and long-term, persistent isolation of avian populations separated by the cordillera is unlikely to be true: species with cross-Andes distributions are now known to have dispersed episodically across the cordillera (Miller et al., 2008), and cross-species analyses reveal patterns of genetic variation inconsistent with simultaneous vicariance (Smith et al., 2014). Thus, the data are more consistent with the hypothesis that cross-Andes distributions involve dispersal events than with the hypothesis of a pre-Andean fauna fragmented by the uplift (Chapman, 1917; Chapman, 1926; Haffer, 1967a; Haffer, 1967b).

Given incongruence across species in the timing of divergence across physical barriers and given effects of dispersal abilities on patterns of population structure and speciation across the Neotropical landscape, Smith et al. (2014) recently proposed a model of avian diversification in the region which posits that speciation is often initiated via episodic dispersal across barriers. Under this model, allopatric speciation is not directly linked to changes such as the uplift of the Andes, but rather is initiated by dispersal events, with the main drivers of diversification being the abilities of lineages to disperse and persist in a landscape previously structured by large-scale tectonic/ geologic processes (Smith et al., 2014). Under this model, understanding to what extent cross-Andes dispersal was plausible for species with different ecologies at different times and at different places is of central importance. The work presented in this study based on geographical projections of models of species potential distributions onto reconstructions of historical climates is a first approximation to addressing these issues.

Previous assessments of the suitability of passes in the Andes for dispersal of birds across the cordillera were based on subjective verbal descriptions of habitat features based on field observations. For example, the Andalucía Pass was considered to be an unlikely route for the crossing of species from the eastern lowlands west to the upper Magdalena Valley of Colombia due to it exhibiting "temperate" ecological conditions unsuitable for lowland forms (**Miller**, 1952). Based on this ecological argument, **Haffer** (1967a) posited that "a direct crossing of the mountains in this area



Figure 5. Connectivity across five Andean passes at present and at three moments in the past estimated based on species distribution models constructed for avian species in three habitat categories using climatic data. Connectivity is expressed using a conductance index estimated using an isolation-by-resistance model, with larger values indicating greater connectivity of climatically suitable environments (i.e. lower resistance to dispersal).

appears impossible" and hypothesized that "Amazonian species advanced exclusively around the northern tip of the Colombian Andes". However, recent spatial analyses of climatic data indicate that thermal regimes in areas such as the Andalucía Pass differ only slightly from those of lowland areas (**Zuloaga & Kerr**, 2016), implying that dispersal across these passes would not be entirely unexpected, particularly at times when vegetation currently restricted to the lowlands occupied higher elevations. Indeed, our analyses suggest that although the Andalucía Pass is indeed unsuitable at present for the dispersal of lowland species of birds across the Andes, climatic conditions in the area in the past (i.e., 21 and 130 kyr BP) were considerably more suitable for dispersal. More generally, our work shows that although current climates across most of the passes hypothesized to allow for cross-Andes connectivity may not enable dispersal of individuals or for extensions of population ranges at present, conditions during cooler periods in the past were more conducive to establishing connectivity and may have accounted for episodic dispersal events (e.g., **Miller** *et al.*, 2008). Of course, this idea is not new, as there is extensive palynological evidence of upslope displacement of ecosystems presently restricted to the lowlands in association with global cooling (**Hooghiemstra** *et al.*, 2006; **Flantua** *et al.*, 2014); however, ours is the first analysis using climatic data associated with species potential distributions to quantitatively document patterns of this sort.

Much of the literature on the effects of climatic change on avian speciation (e.g., the Pleistocene refugia model) has focused on the influence of declines in precipitation associated with global cooling driving habitat fragmentation and thus promoting allopatric speciation via vicariance (Haffer, 1969; Haffer & Prance, 2001). Our analyses are consistent with the additional hypothesis that climatic change may also be a major driver of speciation by linking rather than fragmenting habitats. By temporarily facilitating dispersal across otherwise unsurmountable barriers such as the Andean passes studied here, climatic change likely contributes to the initiation of differentiation in allopatry via dispersal, a central component of the diversification model of Smith et al. (2014). Climatic change allowing for extensions of the geographical ranges of populations is not only relevant for Neotropical diversification in relation to dispersal across the Andes, but it likely applies to other geographic settings. For example, colonization and diversification events across the Isthmus of Panama were likely influenced importantly by changes in connectivity driven by climate (Smith et al., 2012; Bacon et al., 2015; Bacon et al., 2016).

Our analyses indicate that ecological opportunities for dispersal across the Andes have been greater in the Porculla Pass of northern Peru and the Loja Valley of southern Ecuador relative to the Táchira Depression separating the Colombian and Venezuelan Andes or the Andalucía Pass in the Cordillera Oriental of Colombia. This may reflect contrasting climatic regimes between the areas where southern and northern passes are located related to the dynamics of main atmospheric circulation features (i.e. the South American monsoon and the Inter Tropical Convergence Zone); in addition, areas in the south likely maintained humid climatic conditions during the LGM, a time when areas in the northern Andes of Colombia became considerably drier (Marchant et al., 2004; Marchant et al., 2009; Cheng et al., 2013). Overall, our results thus suggest that the area where southern passes are located has likely played an important role in the evolution of Neotropical birds by serving as a corridor creating connections between separate geographic realms, especially during cooler periods. In turn, the same general area has spurred population divergence acting as a critical barrier limiting the dispersal of species from upper elevations (Winger & Bates, 2015). This highlights the important role of valleys in the Andes -and other montane regions (Robin, Vishnudas, Gupta & Ramakrishnan, 2015)— as drivers of evolutionary diversification both by triggering dispersal and by causing or maintaining population isolation.

To conclude, we note that arguably the greatest value of using distribution models to infer patterns in the historical ranges of species is that such models may allow the generation of hypotheses that one may subsequently test using phylogeographic data (**Hugall** *et al.*, 2002; **Carstens & Richards**, 2007; **Carnaval** *et al.*, 2009; **Bell** *et al.*, 2010;

Pulgarín-R. & Burg, 2012). For example, if the patterns recovered by our models are correct and apply not only to the periods we studied but more generally to other cool/ dry vs. warm/wet periods of the past, then one would predict (1) higher levels of gene flow between lowland populations across southern Ecuador and northern Peru than in Colombia, (2) no differences in gene flow across Andean passes in species from dry and open habitats, or (3)cross-Andes dispersal events in lowland species clustering at moments in the past when models suggested higher ecological connectivity across passes. Following the era of documenting general patterns of population structure across the Andes (Smith et al., 2014 and references therein), a fruitful area of inquiry for future work in the field would be to examine fine-grain patterns of genetic exchange integrating tools from landscape genetics with species distribution modeling.

Acknowledgements

We are grateful to Catalina Gonzalez for helpful comments on drafts of this manuscript and for her assistance with interpretation of climatic data. The manuscript was also improved thanks to comments from Ana Carolina Carnaval and three anonymous reviewers. Miguel Lentino provided locality data from the Colección Ornitológica Phelps, and Curt Burney and Laura Céspedes assisted with figure preparation. Our collaboration was greatly facilitated by financial support from the United States National Science Foundation (award DEB-0841729).

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest of any kind.

Bibliography

- Antonelli, A., Nylander, J.A.A., Persson, C., Sanmartín, I. 2009. Tracing the impact of the Andean uplift on Neotropical plant evolution. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 106: 9749-9754.
- Antonelli, A., Quijada-Mascareñas, A., Crawford, A.J., Bates, J.M., Velazco, P.M., Wüster, W. 2010. Molecular studies and phylogeography of Amazonian tetrapods and their relation to geological and climatic models. In: Hoorn, C. and Wesselingh, F.P., eds. Amazonia, landscape and species evolution: a look into the past: Wiley-Blackwell. 386-404.
- Bacon, C.D., Molnar, P., Antonelli, A., Crawford, A.J., Montes, C., Vallejo-Pareja, M.C. 2016. Quaternary glaciation and the Great American Biotic Interchange. Geology 44: 375-378.
- Bacon, C.D., Silvestro, D., Jaramillo, C., Smith, B.T., Chakrabarty, P., Antonelli, A. 2015. Biological evidence supports an early and complex emergence of the Isthmus of Panama. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 112: 6110-6115.
- Bates, J.M., Tello, J.G., Silva, J.M.C. 2003. Initial assessment of genetic diversity in ten bird species of South American cerrado. Studies on Neotropical Fauna and Environment 38: 87-94.

- Bell, R.C., Parra, J.L., Tonione, M., Hoskin, C.J., Mackenzie, J.B., Williams, S.E., Moritz, C. 2010. Patterns of persistence and isolation indicate resilience to climate change in montane rainforest lizards. Molecular Ecology 19: 2531-2544.
- Bonaccorso, E., Koch, I., Peterson, A.T. 2006. Pleistocene fragmentation of Amazon species' ranges. Diversity and Distributions **12**: 157-164.
- Braconnot, P., Otto-Bliesner, B., Harrison, S., Joussame, S., Peterchmitt, J.-Y., Abe-Ouchi, A., Crucifix, M., Driesschaert, E., Fichefet, T., Hewitt, C.D., Kageyama, M., Kitoh, A., Lainé, A., Loutre, M.-F., Marti, O., Merkel, U., Ramstein, G., Valdes, P., Weber, S.L., Yu, Y., Zhao, Y. 2007. Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum. 1. Experiments and large-scale features. Climate of the Past 3: 261-277.
- **Brumfield, R.T., Capparella, A.P.** 1996. Historical diversification of birds in northwestern South America: a molecular perspective on the role of vicariant events. Evolution **50**: 1607-1624.
- Burney, C.W., Brumfield, R.T. 2009. Ecology predicts levels of genetic differentiation in Neotropical birds. American Naturalist 174: 358-368.
- Cadena, C.D., Gutiérrez-Pinto, N., Dávila, N., Chesser, R.T. 2011. No population genetic structure in a widespread aquatic songbird from the Neotropics. Molecular Phylogenetics and Evolution 58: 540-545.
- Carnaval, A.C., Hickerson, M.J., Haddad, C.F.B., Rodrigues, M.T., Moritz, C. 2009. Stability predicts genetic diversity in the Brazilian Atlantic Forest hotspot. Science 323: 785-789.
- **Carstens, B.C., Richards, C.L.** 2007. Integrating coalescent and ecological niche modeling in comparative phylogeography. Evolution **61:** 1439-1454.
- Chapman, F.M. 1917. The distribution of bird life in Colombia. Bulletin of the American Museum of Natural History 36: 1-169.
- Chapman, F.M. 1926. The distribution of bird-life in Ecuador. Bulletin of the American Museum of Natural History 55: 1-784.
- Cheng, H., Sinha, A., Cruz, F.W., Wang, X., Edwards, R.L., d'Horta, F.M., Ribas, C.C., Vuille, M., Stott, L.D., Auler, A.S. 2013. Climate change patterns in Amazonia and biodiversity. Nature Communications 1: 1411-1416.
- Cheviron, Z.A., Hackett, S.J., Capparella, A.P. 2005. Complex evolutionary history of a Neotropical lowland forest bird (*Lepidothrix coronata*) and its implications for historical hypotheses of the origin of Neotropical avian diversity. Molecular Phylogenetics and Evolution **36**: 338-357.
- Dick, C.W., Roubik, D.W., Gruber, K.F., Bermingham, E. 2004. Long-distance gene flow and cross-Andean dispersal of lowland rainforest bees (Apidae: Euglossini) revealed by comparative mitochondrial DNA phylogeography. Molecular Ecology **13**: 3775-3785.
- Fielding, A.H., Bell, J.F. 1997. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/ absence models. Environmental Conservation 24: 38-49.

- Flantua, S.G.A., Hooghiemstra, H., Van Boxel, J.H., Cabrera, M., González-Carranza, Z., González-Arango, C. 2014. Connectivity dynamics since the Last Glacial Maximum in the northern Andes; a pollen-driven framework to assess potential migration. In: Stevens, W.D., Montiel, O.M. and P., R., eds. Paleobotany and Biogeography: A Festschrift for Alan Graham in His 80th Year. St. Louis, MO, USA: Missouri Botanical Garden Press. 98-123.
- Guisan, A., Thuiller, W. 2005. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. Ecology Letters 8: 993-1009.
- Gustafson, E.J., Parker, G.R. 1992. Relationships between landcover proportion and indices of landscape spatial pattern. Landscape Ecology 7: 101-110.
- Haffer, J. 1967a. Speciation in Colombian forest birds west of the Andes. American Museum Novitates **2294:** 1-57.
- Haffer, J. 1967b. Zoogeographical notes on the "nonforest" lowland bird faunas of northwestern South America. Hornero 10: 315-333.
- Haffer, J. 1969. Speciation in Amazonian forest birds. Science 165: 131-137.
- Haffer, J. 1974. Avian speciation in tropical South America with a systematic survey of the toucans (Ramphastidae) and the jacamars (Galbulidae). Nuttall Ornithological Club: Cambridge, Massachusetts.
- Haffer, J., Prance, G.T. 2001. Climatic forcing of evolution in Amazonia during the Cenozoic: on the refuge theory of biotic differentiation. Amazoniana 16: 579-607.
- Hijmans, R.J., Cameron, S.E., Parra, J.L., Jones, P.G., Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 25: 1965-1978.
- Hooghiemstra, H., Wijninga, V.M., Cleef, A.M. 2006. The paleobotanical record of Colombia: implications for biogeography and biodiversity. Annals of the Missouri Botanical Garden 93: 297-324.
- Hoorn, C., Wesselingh, F.P., ter Steege, H., Bermudez, M.A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sanchez-Meseguer, A., Anderson, C.L., Figueiredo, J.P., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F.R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J., Stadler, T., Särkinen, T., Antonelli, A. 2010. Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. Science 330: 927-931.
- Hugall, A., Moritz, C., Moussalli, A., Stanisic, J. 2002. Reconciling paleodistribution models and comparative phylogeography in the wet tropics rainforest land snail *Gnarosophia bellendenkerensis* (Brazier 1875). Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 99: 6112-6117.
- Hughes, C., Eastwood, R. 2006. Island radiation on a continental scale: exceptional rates of plant diversification after uplift of the Andes. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 103: 10334-10339.
- Hutchinson, G.E. 1957. Concluding remarks. Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology **22:** 415-442.

- Krabbe, N. 2008. Arid valleys as dispersal barriers to high-Andean forest birds in Ecuador Cotinga **29:** 28-30.
- Kukla, G.J., Bender, M.L., de Beaulieu, J.-L., Bond, G., Broecker, W.S., Cleveringa, P., Gavin, J.E., Herbert, T.D., Imbrie, J., Jouzel, J., Keigwin, L.D., Knudsen, K.L., McManus, J.F., Merkt, J., Muhs, D.R., Müller, H., Poore, R.Z., Porter, S.C., Seret, G., Shackleton, N.J., Turner, C., Tzedakis, P.C., Winograd, I.J. 2002. Last Interglacial climates. Quaternary Research 58: 2-13.
- Marchant, R., Boom, A., Behling, H., Hooghiemstra, H., Melief, B., Van Geel, B., Van der Hammen, T., Wille, M. 2004. Colombian vegetation at the Last Glacial Maximum: a comparison of model- and pollen-based biome reconstructions. Journal of Quaternary Science 19: 721-732.
- Marchant, R., Cleef, A., Harrison, S.P., Hooghiemstra, H., Markgraf, V., van Boxel, J., Ager, T., Almeida, L., Anderson, R., Baied, C., Behling, H., Berrio, J.C., Burbridge, R., Björck, S., Byrne, R., Bush, M., Duivenvoorden, J., Flenley, J., De Oliveira, P., van Geel, B., Graf, K., Gosling, W.D., Harbele, S., van der Hammen, T., Hansen, B., Horn, S., Kuhry, P., Ledru, M.-P., Mayle, F., Leyden, B., Lozano-García, S., Melief, A.M., Moreno, P., Moar, N.T., Prieto, A., van Reenen, G., Salgado-Labouriau, Schäbitz, F., Schreve-Brinkman, E.J., Wille, M. 2009. Pollen-based biome reconstructions for Latin America at 0, 6000 and 18 000 radiocarbon years ago. Climate of the Past 5: 725-767.
- Martínez-Meyer, E., Peterson, A.T. 2006. Conservatism of ecological niche characteristics in North American plant species over the Pleistocene-to-Recent transition. Journal of Biogeography 33: 1779-1789.
- Martínez-Meyer, E., Peterson, A.T., Hargrove, W.W. 2004. Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for biodiversity. Global Ecology and Biogeography **13**: 305-314.
- McRae, B.H. 2006. Isolation by resistance. Evolution 60: 1551-1561.
- McRae, B.H., Beier, P. 2007. Circuit theory predicts gene flow in plant and animal populations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 104: 19885-19890.
- McRae, B.H., Dickson, B.G., Keitt, T.H., Shah, V.B. 2008. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. Ecology **89:** 2712-2724.
- Miller, A.H. 1952. Supplementary data on the tropical avifauna of the arid upper Magdalena Valley of Colombia. Auk **69**: 450-457.
- Miller, M.J., Bermingham, E., Klicka, J., Escalante, P., Amaral, F.S.R., Weir, J.T., Winker, K. 2008. Out of Amazonia again and again: episodic crossing of the Andes promotes diversification in a lowland forest flycatcher. Proceedings of the Royal Society of London B 275: 1133-1142.
- Nogués-Bravo, D. 2009. Predicting the past distribution of species climatic niches. Global Ecology and Biogeography 18: 521-531.

- Nores, M. 1999. An alternative hypothesis for the origin of Amazonian bird diversity. Journal of Biogeography 26: 475-485.
- Otto-Bliesner, B.L., Marshall, S.J., Overpeck, J.T., Miller, G.H., Hu, A., members, C.L.I.P. 2006. Simulating Arctic climate warmth and icefield retreat in the last interglaciation. Science **311**: 1751-1753.
- Paynter, R.A., Jr. 1997. Ornithological gazetteer of Colombia, second edition. Museum of Comparative Zoology, Harvard University: Cambridge, Massachusetts.
- Peterson, A.T. 2003. Predicting the geography of species' invasions via ecological niche modeling. Quarterly Review of Biology **78**: 419-433.
- Peterson, A.T. 2011. Ecological niche conservatism: a timestructured review of evidence. Journal of Biogeography 38: 817-827.
- Peterson, A.T., Soberón, J., Sánchez-Cordero, V. 1999. Conservatism of ecological niches in evolutionary time. Science 285: 1265-1267.
- Phillips, S.J., Anderson, R.P., Schapire, R.E. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190: 231-259.
- Pulgarín-R., P.C., Burg, T.M. 2012. Genetic signals of demographic expansion in Downy Woodpecker (*Picoides pubescens*) after the last North American glacial maximum. PloS One 7: e40412.
- Ribas, C.C., Aleixo, A., Nogueira, A.C.R., Miyaki, C.Y., Cracraft, J. 2012. A palaeobiogeographic model for biotic diversification within Amazonia over the past three million years. Proceedings of the Royal Society of London B 279: 681-689.
- Ridgely, R.S., Allnutt, T.F., Brooks, T., McNicol, D.K., Mehlman, D.W., Young, B.E., Zook, J.R. 2005. Digital distribution maps of the birds of the Western Hemisphere, version 2.1. NatureServe: Arlington, Virginia, USA.
- Robin, V.V., Vishnudas, C.K., Gupta, P., Ramakrishnan, U. 2015. Deep and wide valleys drive nested phylogeographic patterns across a montane bird community. Proceedings of the Royal Society of London B **282**: 20150861.
- Ruegg, K.C., Hijmans, R.J., Moritz, C. 2006. Climate change and the origin of migratory pathways in the Swainson's thrush, *Catharus ustulatus*. Journal of Biogeography 33: 1172-1182.
- Smith, B.T., Amei, A., Klicka, J. 2012. Evaluating the role of contracting and expanding rainforest in initiating cycles of speciation across the Isthmus of Panama. Proceedings of the Royal Society of London B. 279: 3520-3526
- Smith, B.T., McCormack, J.E., Cuervo, A.M., Hickerson, M.J., Aleixo, A., Cadena, C.D., Pérez-Emán, J., Burney, C.W., Xie, X., Harvey, M.G., Faircloth, B.C., Glenn, T.C., Derryberry, E.P., Prejean, J., Fields, S., Brumfield, R.T. 2014. The drivers of tropical speciation. Nature. 515: 406-409.

- Stotz, D.F., Fitzpatrick, J.W., Parker, T.A.I., Moskovits, D.K. 1996. Neotropical birds: ecology and conservation. The University of Chicago Press: Chicago.
- Sua, S., Mateus, R.D., Vargas, J.C. 2004. Georreferenciación de registros biológicos y gacetero digital de localidades. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt: Bogotá, Colombia.
- Tingley, M.W., Monahan, W.B., Beissinger, S.R., Moritz, C. 2009. Birds track their Grinnellian niche through a century of climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 106 (Suppl. 2): 19637-19643.
- Wallace, A.R. 1852. On the monkeys of the Amazon. Proceedings of the Zoological Society of London 20: 107-110.
- Winger, B.M., Bates, J.M. 2015. The tempo of trait divergence in geographic isolation: Avian speciation across the Marañon Valley of Peru. Evolution 69: 772-787.
- Zuloaga, J., Kerr, J.T. 2016. Over the top: do thermal barriers along elevation gradients limit biotic similarity? Ecography in press.

Inaugural article

Natural Sciences

Bioerosion patterns in Tertiary rock cliffs of the Pacific coast of Colombia (Eastern Tropical Pacific)

Jaime R. Cantera-Kintz

Universidad del Valle, Ciudad Universitaria Meléndez, Cali, Colombia

Inaugural article by full member of the Colombian Academy of Exact, Physical and Natural Sciences in July 8, 2015

Abstract

The degree of internal Bioerosion of five tertiary sedimentary cliffs was examined in three tidal levels (high, medium and low) located in two bays of the Central region of the Pacific coast of Colombia, Tropical Eastern Pacific. The objective was to estimate bioerosion patterns and understand the principal factors determining spatial and temporal variations. The cliffs are composed by layers of soft sedimentary rocks (limestone) alternated with hard sedimentary rocks (shale, sandstones). Plate tectonics, high seismic risk, and processes occurring in the coastline heavily influence geology and geomorphology of the central region of the Pacific coast of Colombia. The region consists of Quaternary alluvial sediments of Pliocene and tertiary cliffs of sedimentary rocks (sandstones, mudstones and shales) of the Mayorquín and the Naya formations. Due to the high slopes and the high fracturing of the rock, non-biologic erosion is caused primarily by runoff and waves, which produces planar mass movements in different scales. It is also common the occurrence of falling blocks, mainly in the coastal cliffs. Main borers of soft rocks were bivalves of the family Pholadidae: *Cyrtopleura crucigera, Pholadidea* spp. and the crustacean *Upogebia* spp. Hard rocks were bored by mytilids species: *Lithophaga aristata, L. plumula*, and by the sipunculid *Phascolosoma* sp.

Major factors controlling bioerosion are in order of importance: hardness and nature of rocks, tidal level, abundance and distribution patterns (zonation) of benthic organisms associated to cliff fauna, and wave action. Total internal bioerosion displayed high values in low tidal levels and soft rocks of cliffs with moderate wave action. Bioerosion declines in externally located hard rocks of the two studied bays despite their exposure to higher hydrodynamics. Higher population densities of borer species were recorded in cliffs located in the internal parts of the bays and in the lower tidal levels. Bored volume was significantly different among tidal levels but not among stations. This was positively correlated with number of species and individuals.

Measurements of rocky material loss during the 12-month study period showed that cliff retreat varied between 4.2 cm y-1, in a hard-rock cliff located on an island in the outer region of the Malaga Bay to 13.2 cm y-1 in a mixed-rock cliff of the outer region of the same bay. These rates are high compared to other estimates based on erosion by organisms but are far lower than rates obtained in broad scale studies. Temporal variations would be attributed to local oceanographic conditions, particularly extreme tidal range, strong sea currents and intensity of wave action. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Benthic fauna, bioerosion, rocky cliff retreat, Tropical Eastern Pacific, zonation.

Patrones de bioerosión en las serranias de roca del Terciario en la costa Pacífica colombiana (Pacífico occidental tropical)

Resumen

El grado de Bioerosión interna de cinco acantilados sedimentarios terciarios fue estudiado en tres niveles de altura con respecto a la marea (alta, media y baja), ubicados en dos bahías de la región central de la costa del Pacífico de Colombia, en el Pacífico Oriental Tropical. El objetivo de la investigación fue estimar los patrones de bioerosión y comprender los principales factores que determinan las variaciones espaciales y temporales en sus tasas. Los acantilados están compuestos por capas de rocas sedimentarias blandas (limolitas, lodolitas) alternando con rocas sedimentarias duras (esquistos, areniscas). La tectónica de placas, el alto riesgo sísmico, y los procesos de sedimentación y erosión que ocurren en el litoral influyen fuertemente en la geología y la geomorfología de la región central de la costa del Pacífico de Colombia. Esta región está formada por sedimentos aluviales cuaternarios del Plioceno y acantilados terciarios de rocas sedimentarias (lodolitas, areniscas, lutitas y pizarras) de las formaciones Mayorquín y Naya. Debido a las altas pendientes y a la alta fracturación de la roca por movimientos de masas planas con caída de bloques en diferentes escalas. Los principales perforadores de rocas blandas fueron bivalvos de la familia Pholadidae: *Cyrtopleura crucigera, Pholadidea* spp. y los crustáceos *Upogebia* spp. Las rocas duras son perforadas por especies de mitílidos: *Lithophaga aristata, L. plumula* y por el sipuncúlido *Phascolosoma* sp.

Los principales factores que determinan los patrones de bioerosión en orden de importancia son, la dureza y naturaleza de las rocas, el nivel de las mareas, la abundancia y los patrones de distribución (zonificación) de

organismos, y la acción de las olas. Las tasas de bioerosión interna muestran valores altos en los niveles bajos de marea y en las rocas blandas de acantilados con una acción moderada del oleaje. La bioerosión es menor en las rocas duras situadas en la parte externa de las dos bahías, a pesar de la mayor exposición a las olas. Las densidades de población más altas de las especies de perforadores se registraron en los acantilados ubicados en las partes internas de las bahías y en los niveles de las mareas más bajas. El volumen removido fue significativamente diferente entre los niveles de marea, pero no entre las estaciones, estando correlacionado positivamente con el número de especies y de individuos. Las mediciones de pérdida de material rocoso durante el período de estudio de 12 meses mostraron que el retroceso del acantilado varió entre 4,2 cm año⁻¹, en un acantilado de roca dura situada en una isla en la región exterior de la bahía de Málaga, a 13,2 cm año⁻¹ en un acantilado de rocas mixtas de la región externa de la misma bahía. Estas tasas son altas en comparación con otras estimaciones sobre erosión por organismos, pero son mucho más bajas que las obtenidas en estudios de amplia escala. Las variaciones temporales se pueden atribuir a las condiciones oceanográficas locales, a la amplitud de la marea, a fuertes corrientes marinas y la intensidad de la acción de las olas. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: fauna bentónica, bioerosión, regresión de acantilados rocosos, Pacífico Oriental Tropical.

Introduction

The shape and landscape of coastlines are products of geological history, dominated by erosion processes in cliff areas (Naylor, et al., 2012) and sedimentation processes in depositional areas (sand beaches and mudflats areas) (Navlor, et al., 2010). Several authors believe physical factors (erosion by waves and weathering) play the main role in the destruction of rocky cliffs (Russell, 1962; Stephenson and Kirk, 2000a, 2000b; Trenhaile, 2002), particularly when they are located in areas with high hydrodynamics. This explanation has been based in the relationship between rock hardness and resistance, and the hydraulic action caused by the magnitude of wave energy (impact on the rock) and mechanical action of weathering. Others attribute the main action to hydrochemical processes (Kave, 1959). The action of borers should not be disregarded for it accelerates physical erosion of rocky coastlines, by destroying seafront cliffs, changing bay sizes and limits, and transforming old peninsulas into islands (Warme, 1970; Fischer, 1981a; Cantera, et al., 1998; Naylor, et al., 2012). On the shores near the cliffs, this process induces the formation of new sedimentary substrates (Cruz-Colin and Curul-Magaña, 1997) and may be responsible for the appearance of rocks on sandy beaches, mud flats and soft bottoms. Bioerosion may also result in structural changes in biological communities such as rock dweller loss or recruitment and changes in the proportion of various groups of organisms (Cantera, 1991).

The role of organisms in erosion processes has been studied extensively in some areas of the world. Bioerosion of rocky and sedimentary cliffs has been known since the beginning of the XXth century as an important agent of destruction of rocky coasts and one of the main processes that contributes to modify coastal geomorphology (Jehu, 1918; Lamy, 1921). Several papers have shown the role of different types of organisms in rock bioerosion. Microorganisms can cause important initial bioerosion (Viles, 2012; Schneider and

Corresponding author:

Jaime R. Cantera Kintz, jaime.cantera@correounivalle.edu.co Received: October 07, 2015 Accepted: May 19, 2016 Lecampion-Alsumard, 1999). Intertidal rocks are bored by grazing gastropods and echinoids (Kaye, 1959; MacLean, 1972). Erosion by sponges has been studied in calcareous substrates (Neumann, 1966) and there are many papers dealing with erosion on coral skeletons. Some papers deal with boring bivalve species (Kleemann, 1973; Cantera and Contreras, 1988: Cantera, et al., 1998): others cite crustaceans (Thiestle, 1973; Williams, 1986; Holthius, 1980) and Sipunculans (Rice, 1969). Comprehensive studies have been published by Hodgkin (1970), Schneider (1976), Torunski (1979), Fischer (1981a, b), Trenhaile (1987), Sunamura (1994), Radtke, et al. (1997), Naylor and Viles (2002), Spencer and Viles (2002), Naylor, et al. (2002, 2010 and 2012). Sunamura (1994) has developed a conceptual model of rock coast erosion, but this author underestimates the role of biological agents and gives more importance to the relation force of wave/resistance of rocks. As was demonstrated by Naylor, et al. (2012) most of geomorphologic processes are affected by organism, resulting in a new conceptual model that includes biological agents as important reducers of the resisting force of the rock.

Most authors point out that rock bioerosion is controlled by factors such as type of rocks (geological composition and hardness), wave intensity, tidal exposure, speed of currents (physical), cliff biotic community structure, abundance of grazing organisms, density of boring species and mechanisms of boring (biological). Bioerosion rates have been measured by **Robinson** (1977), **Torunski** (1979), **Fischer** (1981b), and **Cantera**, *et al.* (1998). Historically, most literature emphasizes on coral bioerosion and pays less attention to the destruction of rocky cliffs by boring organisms.

In the Pacific coast of Colombia, rock bioerosion has been described as an important cause of geomorphological instability of the coastline, frequently affecting areas occupied by human settlements. The appearance of several "arches" or "lines" of islands in different parts of the Colombian Pacific coast has been attributed to coastal erosion with important participation of organisms (Martinez, 1993). These organisms and their patterns of abundance and distribution have been only recently studied and mainly in

a descriptive or preliminary way (**Ricaurte**, 1995; **Cantera**, *et al.* 1998). Therefore, quantitative data on rates and patterns of rock destruction, their spatial and temporal variability and the environmental factors affecting them are scarce.

The main goals of this study were: (1) to estimate cliff wall loss (retreat) in 5 cliffs exposed to different environmental conditions in the central region of the Pacific coast of Colombia; (2) to compare them with relation to three tidal levels and to cliff rock composition; and (3) to determine the density and distribution of main boring species and their role in the loss of cliff rocky material.

Materials and Methods

Study area

The central zone of the Pacific Colombian coast has a high tectonic activity as result of the convergence of the Suramerican, Nazca and Caribe plates. The geomorphology of this area is diverse and the coastline presents Tertiary consolidated sedimentary rocks forming cliffs and shores, bordered by Quaternary mobile sediment platforms (Martinez, 1993; Cantera and Blanco, 2001). This coast has been highly influenced by historic high tectonic activity depending of movements and shocks (clashes) of South American, Nazca and Caribbean Plates and consequents frequent seismic movements. A smaller scale, geomorphology of the coast of the central region of Pacific coast of Colombia has been changed by subsidence, erosion and sedimentation processes. At present, the coast consists of consolidated Quaternary alluvial sediments and Tertiary cliffs of sedimentary rocks (mudstones, sandstones, and shales) of the Mayorquín and the Naya formations (Cardona, et al, 2015). Due to the high slopes and the high fracturing of the rock, erosion processes are caused primarily by seismic movements, runoff and waves, which produces planar mass movements and fall of the rocks in different scales leaving blocks on the feet of cliffs. Structurally, there are different sedimentary stratified layers with evidence of displacement (Malaga bay) and without these evidences (Buenaventura bay) and abundant fractures along the cliff (Montoya, 2003).

The dominant rocks are soft stones such as dark grey mudstones and siltstones, alternating with sandstones and conglomerates (**Galvis and Mojica**, 1993). The layers of soft rocks are well defined in stratified and homogeneous lawyers and are mainly composed of grey limestone deeply weathered, burrowed and with a wrinkled surface. Hard rocks are consolidated sandstones and shale dark and irregular.

The region is located within the Inter-Tropical Convergence Zone (ITCZ). This low-pressure belt and the orographic rain caused by the presence of the Western Chain of the Cordillera, influence the climate of the Pacific coast of Colombia. This area one of the most humid lowlands of the world, with a precipitation average of 6,500 mm y⁻¹, 228-298 days of precipitation by year, and a relative humidity of 80-95 % (**Lobo-Guerrero**, 1993).

Experimental design

1. Selection of stations

Five stations with rocky cliffs were selected in the estuarine bays of Buenaventura ($3^{\circ} 48' - 3^{\circ} 54'$ N and $77^{\circ} 05' - 77^{\circ}20'$ W) and Malaga ($3^{\circ} 56' - 4^{\circ} 05'$ N and $77^{\circ} 19' - 77^{\circ} 21'$ W) (Figure 1). Both bays present two rainy periods, with precipitations exceeding 567 mm mo⁻¹, interrupted by low precipitation periods with 374 mm mo⁻¹ (Eslava, 1993). As a result of high precipitations there are many freshwater sources and both bays present estuarine salinities varying depending of tides (Malaga: ranging from 20 to 33 (salinities in psu) at the mouth to 10-15 in the inner part; Buenaventura: ranging from 15 to 25 at the mouth to 4-5 in the inner part). Both bays have wide range (macrotidal), semidiurnal tides (3.5 to 4.2 m) generating strong surface currents, and variable action of waves on the cliffs, ranging from "exposed" in outer cliffs to "sheltered" in inner ones.

Selection of stations (Table 1) was made to obtain a representative diversity in rock composition and hardness, exposure to waves and tidal action, salinity of surrounding waters, cliff slope, and geographical location. Three stations were selected in Buenaventura Bay, two (St. 1 and 2) in inner parts of the bay (shelter cliffs) and one (St. 3) in outer



Figure 1. Stations on the Pacific coast of Colombia: A. Buenaventura Bay (St.1: Morro Pecas Point, MP: St. 2 Cangrejo Island, CI: St.3 Piangüita, PP). B: Malaga Bay (St.4: Juanchaco JP, St.5: Palma Island, PP).

Table 1. General features of the five cliffs studied in Malaga and Buenaventura Ba	.ys
------------------------------------------------------------------------------------	-----

Station	Bay	Distance to bay mouth	Geographical Position		Wave action	Geological composition	Tidal levels	
			Lat. N	Long. W				
Station 1 Morro Pecas (MP)	Buenaventura	19.8	3° 54'	77° 02'	Null, occasional waves, < 0,20 m	Soft rocks, mudstones Clay infiltrations	Supralitoral fringe Upper intertidal	
Station 2 Isla Cangrejo (CI)	Buenaventura	15.4	3° 53'	77° 06'	Weak, occasional waves, < 0,30 m	Soft rocks, mudstones intercalated with few hard rocks	Supralitoral fringe Upper intertidal	
Station 3 Pianguita (PP)	Buenaventura	0.5	3° 50'	77° 13'	Moderate to strong, frequent waves, between 0,30 and 1,50 m	Soft rocks, mudstones intercalated with some hard rocks (slabs)	Supralitoral fringe Upper intertidal Lower intertidal Infralitoral fringe	
Station 4 Juanchaco (JP)	Malaga	1.8	3° 55'	77° 21'	Very strong, frequent waves, between 1.50 and 2 m	Soft rocks, mudstones mixed with basic hard rocks	Supralitoral fringe Upper intertidal Lower intertidal	
Station 5 Isla Palma (PI)	Malaga	0	3° 53'	77° 21'	Very strong, permanent waves, between 1.0 and 3.0 m	Few soft rocks, mudstones, mixed with abundant very hard rocks	Upper intertidal Lower intertidal Infralitoral fringe	

part (mid-exposed) and two in Malaga Bay (St. 4 and 5) both in exposed areas. The order in hardness of the rocks (St. 1 to St. 5) was the same that in cliff exposition to waves.

2. Field and laboratory techniques

Different studies on bioerosion processes in Tertiary rocky cliffs of Malaga and Buenaventura Bays were conducted by two years in order to estimate densities of macroborers and patterns of loss of rocky material.

2.1. Sediment grain size distribution

We cut 5 cm cubic fragments of soft rocks at the five stations, disaggregated them with a press in laboratory, weighed the product and sieved it through meshes of 2, 1, 0.5, 0.250, 0.100, 0.063 and 0.050 mm. The fractions retained on each sieve were weighed to the closest milligram and these weights were expressed as percentage (%) of total weight. Grain size distribution was analyzed including determination of silt, clay, sand and their relative proportion (**Mahieu**, 1984).

2.2. Density of perforations and boring species

For each tidal level we selected three 0.0625 m^2 quadrats and counted the perforations appearing in them in two different manners. First, we introduced a stick inside each bore, and then counted the sticks. Secondly, we took a picture, counted the perforations and determined their total area using a program for digital image processing. For the quantification of boring species, we took an X-ray picture which was used to determine the species associated to a given type of cavity. A sample was then collected from each quadrat and crushed using a press. Boring macrofauna was extracted and all individuals of each species were counted. Volume was calculated multiplying estimated area by the length of the perforation. The percentage of perforation was determined using X-ray picture and digital image processing of the rock section under study. For each sample, the % of erosion was then calculated by dividing the volume of perforations by the total volume of the sample.

2.3. Determination of Bioerosion patterns

In order to estimate cliff material loss by the combined action of organisms and physical conditions, a 0.80 m (mmgraded) iron bar was stuck into the rocky wall of the five studied cliffs, trying to avoid loss of surface material. Wall retreat was determined every month during 12 months by measuring the exposed portion of the iron bar. Where it was not possible to introduce the whole iron bar, material loss was measured as from the initial surface mark. Three iron bar replicates were used for each of the three tidal levels.

3. Data analysis

3.1. Sediment grain-size distribution

Collected data allowed studying rock composition and hardness, and relationship between borers' density and bioerosion rate. Similarities between samples were analyzed using different similarity indices and aggregation methods for cluster analysis, calculated by STATISTICA[®] software package. Since similar results came out of all methods, percent disagreement was chosen as distance index, and unweighted pair-group average as cluster procedure.

3.2. Density of perforations and boring species

Data on perforation density, abundance of individuals and number of boring species were tested for normality using the probability plot procedure, and for homogeneity of variances using the Levene's and Bartlett's procedures. Results indicated that data on perforation density did not require
transformation. For number of species and individuals, an Ln transformation was necessary. A two-way ANOVA test was performed to check for differences between stations and tidal levels. Post ANOVA Newman-Keuls test was also performed to check for differences between stations.

3.3. Determination of Bioerosion rate

The *a priori* test revealed that the variable bored volume (in percentage), required transformation. After several attempts, this variable failed in the *a priori* tests and successive transformations. Therefore, the non-parametric Kruskal-Wallis ANOVA test was used to compare stations and zones of the cliff, using STATISTICA[®] software package. Relationships between bored volume and the main parameters were established by regression analysis.

Data obtained for cliff retreat with relation to time did not require transformation and were compared using two-way ANOVA and analyzed both for the instantaneous retreat rate per month and for the accumulated loss of material throughout successive months.

Results

Sediment grain size in soft cliff rocks

Grain size distribution of soft-rock sediments from the five cliffs showed that the two rock samples from the inner Buenaventura Bay (St. 1 and St. 2) were quite different from those of the outer Malaga Bay (Figure 2). All cliffs showed high percentages of 0.100 mm particles. Cluster analysis showed that there was no significant variation within the same cliff, except for St. 3, in which lower and medium zones were similar to hard-rock cliffs (St. 4 and St. 5) and the high zone was closer to soft-rock cliffs (St. 1 and St. 2).

Abundance and density of perforations and boring species

The number of perforations was significantly different among stations (F= 11.40, p< 0.001) as well as between tidal levels (F=25.97, p< 0.001). The interaction between stations and tidal levels was not significant (F= 1.88, p< 0.103). Newman-Keuls post ANOVA test showed differences between St. 2 and all other locations. St. 2 had significantly more perforations than the rest (Figure 3A).

In all cliffs, the lowest tidal level (L) presented the highest number of perforations (Figure 3B) except in St. 2, where there was no significant difference between densities of perforations at high and low tidal levels. In general, there are more perforations in the predominantly soft-rocks cliffs of inner wind-protected stations (St. 1 and St. 2) which extend into the whole intertidal surface of the cliff. Perforations density is higher in the lower parts of the three cliffs exposed to more intense hydrodynamic action.

There is a negative relationship between density of perforations and height on the cliff (Figure 4). However, the relationship is not statistically significant (perforations=121.38-32.68* height, r= -0.297, n=43, F=3.97, p=0.053).

Spatial variations in erosion rates

Stations 3 and 4 presented the highest number of boring species and St. 5 the lowest (Figure 5A). Number of individuals was not significantly different between stations (F=4.19, p= 006) but was lower in both cliffs of the outer Malaga Bay (Figure 5B). Also, perforations volume was not significantly different between stations ($H_{4,45} = 13.26$, P= 0.010), the highest volume of St. 2 (Figure 5C) being similar to those of the other two Buenaventura Bay cliffs but higher than St. 4 and St. 5.



Figure 2. Cluster analysis using percent disagreement and unweighted pair-group average of the grain size proportions of the soft rocks in the high (H), medium (M) and low (L) tidal levels of five stations in Buenaventura and Malaga Bays. For the meaning of CI, JP, MP, PP and PI: see caption of Figure 1.



Figure 3. Number of perforations in five stations (A) and three tidal levels (B).



Figure 4. Correlation between perforations and height on the cliffs.

Both species richness (F= 8.53, p< 0.001) and number of individuals (F= 19.23, p<0.001) as well as bored volume (H₂, $_{45}$, = 16.78, p<0.001) showed significant differences between tidal levels. Low tidal quadrats exceeded the other quadrats

in boring species number, in individuals and in percentage of bored volume (Figure 6). In Stations 1 and 2, the high tidal level exhibits a greater bored volume compared with other stations, with a uniform rock loss in its three tidal levels (H, M and L). St. 5 showed the lowest percentage of bored rock, coinciding with rock hardness and low density of perforations despite the stronger hydrodynamic action.

Species and number of individuals are significantly and positively correlated (higher for number of individuals) with bored volume (Figure 7A and 7B). In contrast, bored volume is negatively correlated with the height of the sample (Figure 7C). There is also a significant positive correlation between bored volume and perforation density. The species with the highest percentage of bored volume in the lower zone were *Lithophaga aristata* (St. 5: 45.2 ± 1.7 , St. 3: 35.2 ± 2.4 , St. 4: 33.1 ± 2.6 %; %; St. 2: 21.6 ± 5.3 %, St. 1: 15.8 ± 3.8 %) and



Figure 5. Number of species (A) and individuals of boring species (B), and bored volume (C) in five stations in Malaga and Buenaventura Bays.



Figure 6. Number of species (A) and individuals of boring species (B), and bored volume (C) in three tidal levels of five stations of Malaga and Buenaventura Bays. H = High, M = Medium, L = Low.

Upogebia spp. (St. 1: 62.3 ± 3.6 %, St. 3: 32.8 ± 2.8 %; St. 5: 21.3 ± 1.7 %; St. 2: 48.2 ± 6.9 %, St. 4: 17.2 ± 1.2 %). In the medium zone, *Cyrtopleura crucigera* (St. 2: 72.8 ± 27.2 %; St. 1: 85.7 ± 31.8 %, St. 3: 76.7 ± 12.5 %) is the species with highest percentage of bored volume. The remaining species are responsible for a small proportion of bored volume.

Temporal changes in average cliff retreat rate

The rate of cliff retreat varied significantly not only throughout the study (F= 12.78, p< 0.001) but also among stations (F= 9.52, p< 0.001). Interaction between months and stations was also significant (F= 2.48, p< 0.001). Newman-Keuls Post Hoc test showed significant differences between St. 5 and all the other stations. The analysis of retreat rate with relation to tidal levels showed no significant differences (F= 0.622, p= 0.538). Absolute retreat rate was very variable throughout the 12 months of the study (Figure 8). The three outer stations of the bays (St. 4, St. 5 and St. 3) had the highest rates during the first part of the study, reaching a



Figure 7. Correlation between number of species (A), number of individuals (B), and vertical height in the cliff (C), and the bored volume in the five stations in Malaga and Buenaventura and Bays.

maximum in September (St. 3: 4.5 cm; St. 4: 6.3 cm; St. 5: 4.2 cm) and strongly decreasing afterwards, particularly St. 4 and St. 5. St. 3 presented irregular variations. The inner cliffs of the Buenaventura Bay had their highest retreat in October (St. 1: 4.2 cm; St. 2: 5.8 cm) with a secondary peak in January.

Cumulative values of cliff retreat at the end of the study period were very different among localities, varying between 4.2 cm y⁻¹ (St. 5) and 13.2 cm y⁻¹ (St. 4). Other values were St. 1: 9.7 cm y⁻¹; St. 2: 10.5 cm y⁻¹; and St. 3: 10.8 cm y⁻¹ (Figure 9).

Discussion

A positive relationship was observed between number of perforations, and cliff surface retreat with lithology, species richness, macrofauna zonation and density of boring species.



Figure 8. Retreat (cm) of cliff wall in three tidal levels of the five stations of Malaga and Buenaventura Bays.

A negative correlation was observed with rock hardness and tidal level. Interaction between nature of substrate, tidal level and wave exposure were the main factors controlling bioerosion in the studied cliffs. As expected, stations with high proportion of soft rocks and fine sediments located in the lower zones of the most exposed cliffs showed the highest cliff retreat. Hard rock cliffs located at very exposed areas exhibited a small number of perforations and a low cliff retreat rate. Bored volume and number of perforations were higher in sheltered soft muddy cliffs, although cliff retreat was intermediate. Furthermore, there is a relationship between observed cliff retreat and the time-period of the study. Accordingly, we can reject the two null hypotheses that there are no significant spatial differences and temporal changes in number of perforations, bored volume and cliff retreat rate among the three selected tidal levels of the five studied cliffs in Málaga and Buenaventura Bays.

Cluster analysis separates the inner Buenaventura Bay rocks (softer, alluvium-rich and less basaltic and magmatic) from those of Málaga Bay (harder and mainly volcanic). The main characteristics of rocks which favor the bioerosion process are: chemical composition, texture, lithology, stratification and slabbing (Fisher, 1981a; Cruz-Colin and Curul-Magaña, 1997). Colombian Pacific sedimentary rocks, rich in silicified limestone and basaltic components (Martinez, 1993; Galvis and Mojica, 1993) facilitate colonization by Lithophaga. Conversely, their colonization by sponges and pholadid bivalves is limited by their low calcareous contents, and by sipunculans and polychaetes, due to their high basalt content (Fischer, 1981b). High percentages of fine sediments (less than 0.3 mm) in most cliff rocks facilitate the action by Lithophaga and pholadid bivalves, whereas the sediments between 0.3 and 0.8 mm found in higher proportions at PP, JP and PI favor crustaceans and sipunculans. Coarser fractions found mainly at PI limit all types of internal borers and are only subject to external abrasion by sea urchins. Except for some occasional individuals of Hespedocidaris asteriscus in low zones of PI, no sea urchins were observed in the studied cliffs.

Slab orientation inhibits deep boring by *Lithophaga* (in all cliffs) and *Upogebia* spp. (in MP and CI cliffs) but pholadids (*Cyrtopleura crucigera*) at MP, CI and PP are able to change the orientation of their boring to follow the main stratification axis.



Figure 9. Cumulative retreat (cm) of cliff wall in the three tidal levels of five stations of Buenaventura and Malaga Bays.

Density of boring organisms was positively correlated with bored volume. Lithophaga species (Lithophaga aristata, L. plumula, L. spatiosa and L. hancocki) present in all stations in medium and low levels are particularly abundant in JP and PP, where there is volcanic material mixed with mudstones. Average Lithophaga density varies between 3.15 Ind m⁻² (MP medium tidal level) and 93.2 Ind m⁻² (JP low tidal level). These figures are high compared to other cliffs of the world. At the Pacific coast of Costa Rica Lithophaga is restricted to calcareous substrata (Fischer, 1981a), and in the northern Adriatic to the subtidal zone of rocky cliffs where its bioerosion is insignificant compared to endolithic microorganisms and grazers (Torunski, 1979). Lithophaga plays an important role in hard rocks, where petricolid bivalves (Petricola paralela and P. denticulata) are present, but less abundant (densities between 0.08 Ind/m⁻² in JP's medium tidal level and 0.83 Ind m⁻² in JP's low tidal level). Instead, Pholadidae (Cyrtopleura crucigera, Pholas chiloensis, *Pholadidea* spp. and *Diplothyra curta*) are abundant in the medium tidal level of MP, CI and PP. Sipunculans (Phascolosoma sp.) are evenly distributed in all stations

296

with about one Ind m⁻² in the low tidal level. The boring crustacean *Upogebia* spp. is also present in all stations and is also more abundant in the low tidal level (11 to 53.8 Ind m⁻²). **Fischer** (1981b) recorded *Alpheus saxidomus* as the most important decapod in the bioerosion process of the Pacific coast of Costa Rica.

Temporal changes observed in this research could be attributed to local oceanographic conditions. In the coastal erosion literature, wave action and tidal range and action are considered the two oceanographic agents that cause retreat of rocky cliffs (**Schneider**, 1976; **Torunski**, 1979; **Fischer**, 1981b). Both factors varied during the study period as follows: between January 1997 and April 1998, eleven very high tides were recorded at the Pacific coast of Colombia, the highest corresponding to February 1997 and March 1998. Winds and wave action were stronger between August and November. We observed that the combination of very high tides ("extreme spring tides") and strong waves favor the deposition of sand at the bottom of the cliffs in St. 3, 4 and 5, thus changing the accessibility of these sections

of the cliff due to the action of the sea. Accumulated sand covered cavities, killing established borers while preventing hydrodynamic action and colonization by new borers.

Few published data on cliff retreat as a consequence of bioerosion are available for comparison. Previous studies are of very different nature and mainly refer to: (1) measurements related to superficial abrasion by gastropods (in their home scars), by sea urchins and by sponges; (2) different types of rocky material in cliffs or in rocky shores with little slope; (3) different borers' species or taxonomic groups: and (4) measurements made directly on cliffs, but through different methods regardless of the presence of organisms.

Studies related to abrasion by mollusks in home scars showed variable bioerosion rates: Littorina spp. in calcareous sandstone from Southern California (USA), 0.07 mm y⁻¹ (Emery, 1946) and 0.6 mm y⁻¹ (North, 1955). Nerita tesselata, in beachrock of reef areas in the Caribbean, 0.1 mm chitons in the same places 8-13 mm y⁻¹ (MacLean, 1972). Superficial erosion by sea urchins has been studied by Fischer (1981b) estimating a boring rate for Diadema mexicana of 0.005-0.16 mm y⁻¹ in basaltic cliffs of the Pacific coast of Costa Rica. Finally, Torunski (1979) reported a bioerosion rate of 0.02-0.98 mm y⁻¹ by sea urchins, and of 0.10-1.11 mm y⁻¹ caused by the benthic community at the Gulf of Trieste (Adriatic Sea). Sponges were studied by Neumann (1966) who determined boring rates of 1.4 cm y⁻¹ for *Cliona* lampa, in laboratory controlled experiments with submerged carbonate substrate from Bermuda (USA).

In geological studies using aerial photography and scales at the basis of cliffs, **Andrade**, *et al.*, (2002) estimated a cliff retreat of 0.14-8.2 cm y⁻¹ for the west limestone coast of Portugal. **Dias and Neal** (1992) recorded retreats of 1 to 2 m y⁻¹ (with a maximum value of 6.3 m) in southern Portugal Miocene-Quaternary friable cliffs resulting from joint environmental and anthropogenic factors. With aerial photography, **Cruz-Colin and Curul-Magaña** (1997) estimated a retreat rate of 0.8-0.97 m y⁻¹ for sandstone and shale cliffs and of 0.7 m y⁻¹ for basaltic cliff in Baja California (Mexico). None of these studies is any reference to the boring species participating in the process.

Specific data on bioerosion rates and retreat in cliffs with abundance of bivalves are scarce, outdated and not appropriate for comparisons. Limestone cliffs of the Pacific coast of USA were studied by **Evans** (1968), who estimated a bioerosion rate of 1.2 cm y⁻¹ caused by *Penitella penita* (Pholadidae). Pioneer studies (**Jehu**, 1918) reported a bioerosion rate of 2.5 and 1.3 cm y⁻¹ respectively for *Lithophaga*, in chalky subtidal benches of the coast of Norfolk in England. **Kleemann** (1973) reported a bioerosion rate of 0.016-0.16 mm y⁻¹ also by *Lithophaga* sp. Finally, in the Gulf of **Oman Vita-Finzi and Cornelius** (1973) reported a bioerosion rate of 0.25-0.9 cm y⁻¹ derived from the length of the cavities of *Lithophaga obesa* and *L. cumingiana*.

Despite the considerable variability in data, methods, species and material, we can hypothesize that our average rate of 4.2 cm y⁻¹ and maximum rate of 13.2 cm y⁻¹ are indicative of a bioerosion process, which is more intense in the Colombian Pacific tertiary cliffs than in most other cliffs. However it is significantly less intense than that of the basaltic (0.70 m y⁻¹) and sandstone and shale (0.8-0.97 m y⁻¹) cliffs of Baja California and of the Miocene-Quaternary friable cliffs of southern Portugal (1 to 2 m y⁻¹).

In conclusion, the complete process of rocky cliff destruction involves four main phases that interact with each other and the participation of different organisms, chemical corrosion and physical factors: (1) Micro-algae generating micro cavities, (2) Bio-abrasion by gastropods and crustaceans while feeding upon endolithic micro-algae. (3) Perforations by bivalves, sipunculans and crustaceans weaken the structure. (4) The mechanic action of breaking waves forms an abrasion cavity penetrating the lower part of the cliffs and the protruding upper cliff wall would then collapse, thus completing the falling of the rock blocks. This process is facilitated by vertical, subvertical and horizontal geologic fractures in the cliffs that cause the falling of the rock blocks acting combined or independently of the impact of material removed by the organisms.

Mudstones would continue their destruction on the sandy or muddy surface and the resulting tiny sediment particles would be washed away by currents. This process will contribute to the formation of mud planes in the inner side of bays or else to the muddy enrichment of sandy beaches. The coarser or thicker sedimentary material, such as sandstones, conglomerates and stone slabs will form intertidal or subtidal rocky substrates or hard rocky substrates in edge mangroves.

The whole process has also a major impact on the ecological structure of the biological communities associated to the Tertiary cliffs in the Colombian Pacific coast. Their populations present quantitative variations resulting from availability of new substrates for colonization, because of material loss. Specific cliff richness, which is close to zero immediately after the collapse of rocks, increases gradually as the colonization progresses and a new process of abrasion, boring and loss of material, begins. In the surrounding mudflats and sandy beaches diversity increases thanks to the species that colonize the new rocky substrates of various size disposed on the surface.

Acknowledgments

This study was conducted thanks to different research projects supported and funded by the Department of Biology of the Universidad del Valle, Biology Department, Marine Biology Section, and partially by internal funding of the Research Vice-rectory of the Universidad del Valle (CI 7980) "Biological erosion in cliffs of the Central part of the Colombian Pacific". The author thanks Henry von Prahl, Raul Neira O., Constanza Ricaurte and Alba Marina CoboViveros, who have collaborated in some parts along the research on bioerosion. Likewise, the author thanks Dr. Iván Correa (Department of Environmental Geology of EAFIT University), Daniela Cardona, Alejandra Diaz and Camila León for providing information and advice in geological aspects.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest of any kind.

Bibliography

- Andrade C., Marques F., Freitas M.C., Cardoso R. & Madeureira P. (2002) Shore platform downwearing and cliff retreat in the Portuguese west coast. In: EUROCOAST Littoral 2002, the changing coast, Eurocoast / EUCC, Portugal, 423-431.
- **Cantera J.R.** (1991) Etude structurale des mangroves et des peuplements littoraux des deux baies du Pacifique colombien (Málaga et Buenaventura). Rapport avec les conditions du milieu et les perturbations anthropiques. Thèse d'Etat Sciences. Université d'Aix-Marseille II. Marseille, France, 429 p.
- Cantera J.R. & Blanco J.F. (2001) The estuary ecosystem of Buenaventura bay, Colombia. In: Seeliger, U., Kjerve, B. (Eds.). Coastal marine ecosystems of Latin America. Ecological Studies. 144: 265-280
- Cantera J.R. & Contreras R. (1988) Bivalvos perforadores de corales escleractiniarios en la Isla de Gorgona, Colombia. Revista Biología Tropical. 36: 151-158.
- Cantera J.R., Neira R. & Ricaurte C. (1998) Bioerosión en acantilados del Pacifico colombiano. Santa fe de Bogotá, Fondo FEN, 160 p.
- Cardona D., Díaz A., León M.C. (2015). Bioerosion en acantilados de la costa central del Pacifico colombiano. Informe Geología, Universidad Eafit, 23 p.
- Cruz-Colin M.E. & Curul-Magaña L.A. (1997) Erosion and sediment supply of sea cliffs of Todos Santos, Baja California, from 1970 to 1991. Ciencias Marinas. 23: 303-315.
- Dias J.M. & Neal W.J. (1992) Sea cliff retreat in southern Portugal: profiles, processes and problems. Journal of Coastal Research. 8: 641-654.
- Emery K.O. (1946) Marine solution basins. Journal of Geology. 54: 209-228.
- Eslava J. (1993) Climatología. In: Leyva, P. (Ed.) Colombia Pacífico. Santafé de Bogotá, Fondo FEN-Proyecto Biopacífico, Tomo 1: 137-147.
- Evans J.W. (1968) The role of *Penitella penita* (Conrad, 1837) (Family Pholadidae) as eroders along the Pacific coast of North America. Ecology. 49: 156-159.
- Fischer R. (1981a). La bioerosion de la costa pacífica de Costa Rica. Anais II Congresso Latinoamericano Paleontología, Porto Alegre, 907-918.
- Fisher R. (1981b) Bioerosion of basalt of the Pacific coast of Costa Rica. Seckenbergiana maritima. 13: 1-41.

- Galvis J. & Mojica J. (1993) Geología. In: Leyva, P. (Ed.) Colombia Pacífico. Santafé de Bogotá, Fondo FEN-Proyecto Biopacífico. Tomo I: 80-96.
- Hodgkin E.P. (1970) Geomorphology and biological erosion of limestone coast in Malaysia. Geological Society Malaysia Bulletin. 3: 27-51.
- Holthuis L.B. (1980) Alpheus saxidomus new species; a rock boring snapping shrimp from the Pacific coast of Costa Rica, with notes on Alpheus simus Guérin-Méneville, 1856. Zoologische Mededelingen. 55: 47-58.
- Jehu T.J. (1918) Rock-Boring organisms as agents in coastal erosion. Scottish Geographical Magazine. 34: 1-10.
- Kaye C.A. (1959). Shore line features and Quaternary shoreline changes, Puerto Rico. U.S. Geological Survey professional paper. 317-B, 140 p.
- Kleemann K.H. (1973) *Lithophaga lithophaga* (L) (Bivalvia) in different limestone. Malacologia. **14:** 345-347.
- Lamy E. (1921) Les théories explicatives de la perforation par les mollusques lithophages et xylophages. Revue scientifique. 59: 423-432.
- Lobo-Guerrero A. (1993) Hidrología e hidrogeología. In: Leyva, P. (Ed.) Colombia Pacífico. Santafé de Bogotá, Fondo FEN-Proyecto Biopacífico. Tomo 1: 121-134.
- MacLean R.F. (1972) Nomenclature for rock destroying organisms. Nature. 240: 490.
- Mahieu G. (1984) Milieu et peuplements macrobenthiques littoraux du golfo Triste (Venezuela). Etudes expérimentales sur sa pollution. Thèse Doctorat Sciences Université Aix-Marseille 2, Marseille, France, 333 p.
- Martínez J.O. (1993) Geomorfología. In: Leyva, P. (Ed): Colombia: Pacifico. Santafé de Bogotá, Fondo FEN-Proyecto Biopacífico. Tomo 1: 111-119.
- Montoya, D.M. (2003). Geología de las planchas 240 Pichimá, 241 Cucurrupí, 259 Malaguita y 260 Aguas Claras. Ingeominas, Bogotá.
- Naylor L.A. & Viles H.A. (2002) A new technique for evaluating short-term rates of coastal bioerosion and bioprotection, Geomorphology. 47 (1): 31-44, http://dx.doi.org/10.1016/ S0169-555X(02)00139-3. No está citado.
- Naylor, L.A., Viles, H.A. and Carter, N.E.A., 2002. Biogeomorphology revisited: Looking towards the future. Geomorphology. 47: 3-14.
- Naylor L.A., Stephenson W.J. and Trenhaile A.S. (2010) Rock coast geomorphology: recent advances and future research directions, Geomorphology. 114 (1-2): 3-11, http://dx.doi. org/10.1016/j.geomorph.2009.02.004.
- Naylor L.A. Coombes M.A. and Viles H.A. (2012) Reconceptualising the role of organisms in the erosion of rock coasts: a new model, Geomorphology. **157-158:** 17-30, http://dx. doi.org/10.1016/j_
- Neumann C. (1966) Observations on coastal erosion in Bermuda and measurements of the boring rates of the sponge *Cliona*. Limnology and Oceanography. 11: 92-108.
- Radtke G., Hofmann K. & Golubic S. (1997) A bibliographic overview of micro- and macroscopic bioerosion. Courier Forschungsinstitut Senckenberg. 201: 307-340.

- Rice M.E. (1969) Possible boring structures of Sipunculids. American Zoologist. 9: 803-812.
- Robinson L.A. (1977) Erosive processes on the shore platform of northeast Yorkshire, England. Marine Geology. 23: 339-361.
- Russell R.J. (1962) Origin of beach rock. Zeitschrift für Geomorphologie. 6: 1-16.
- Schneider J. (1976) Biological and inorganic factors in the destruction of limestone coasts. Contributions to Sedimentology. 6: 112.
- Schneider J. & Le Campion-Alsumard T. (1999) Construction and destruction of carbonates by marine and freshwater cyanobacteria. European Journal of Phycology. 34: 417-426.
- Spencer T. & Viles H. (2002) Bioconstruction, bioerosion and disturbance on tropical coasts: coral reefs and rocky limestone shores, Geomorphology. 48 (1-3): 23-50, http:// dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00174-5.
- Stephenson W.J. and Kirk R.M. (2000a) Development of Shore Platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand, Part I The Role of Waves. Geomorphology. 32: 21-41.
- Stephenson W.J. and Kirk R.M. (2000b) Development of Shore Platforms on Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand, Part II The Role of Subaerial Weathering. Geomorphology. 32: 43-56.

- Sunamura T. (1994) Rock control in coastal geomorphic processes. Transactions Japanese Geomorphological Union. 15 (3): 253-272.
- **Thiestle D.** (1973) A taxonomic comparison of the American *Upogebia* (Decapoda: Thalassinidea) including to new species from the Caribbean. Breviora. **408**: 1-23.
- Torunski H. (1979) Biological erosion and its significance for the morphogenesis of limestone coasts and for nearshore sedimentation (Northern Adriatic). Senckenbergiana maritima. 11: 195-265.
- **Trenhaile, A. S.** (1987) The geomorphology of rocky coasts. Clarendon Press, Oxford, 384 p.
- Trenhaile, A. S. (2002): Rocky coasts, with particular emphasis on shore platforms. Geomorphology. 48: 7-22.
- Viles H. A. (2012) Microbial geomorphology: a neglected link between life and landscape. Geomorphology. 157-158: 6-16.
- Vita-Finzi, C. & Cornelius P.F.S. (1973) Cliff sapping by mollusks in Oman. Journal of Sedimentary Petrology. 43: 31-32.
- Warme J.E. (1970) Traces and significances of marine rock borers, In: Crimes, T.P., Harper, J.C. (Eds.) Trace fossils. Seel House Press, Liverpool, 515-525.
- Williams A.B. (1986) Mud shrimp, Upogebia from the eastern Pacific (Thalassinoidea: Upogebiidae). Memoirs of the San Diego Society of Natural History. 14: 1-60.

Original article

Holobiont assemblages of dominant coral species (Symbiodinium types and coral species) shape Caribbean reef community structure

Alejandro Grajales^{1,*}, Juan Armando Sánchez^{1,2,*}

¹Departamento de Ciencias Biológicas-Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia ²Laboratorio de Biología Molecular Marina – BIOMMAR, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Abstract

Research on coral reef community structure suggests that fine spatial-temporal stochasticity drives biodiversity patterns in this tropical marine ecosystem. The combination of a coral colony and its zooxanthella, or holobiont, should therefore be used as the community indivisible units to better understand this structure. Research in zooxanthellae (*Symbiodinium*) diversity has allowed the identification of specific or generalist host associations. The distribution of specific symbionts depends on both the host identity and the environmental conditions. This study determined the identity on these symbionts within hard corals communities (Scleractinia and Milleporina) at 27 sites on the upper slope habitat (mixed zone) in Cartagena, Colombia (Southwestern Caribbean Sea). Zooxanthellae identification was made with RFLPs analysis (18S, SSU, rDNA), DGGE, and DNA sequencing (ITS2, rDNA). Different combinations of coral species and their specific *Symbiodinium* types (holobionts) were determined as different ecological units. Taking each holobiont as a variable, a cluster community structure analysis was made and compared to the pattern obtained from using coral species alone. Different site groupings occurred for holobionts and species, where higher similarities were found using holobionts. *O. annularis* and *O. faveolata*, two dominant coral species, formed independently different *Symbiodinium* associations, depending on depth. Their symbiont preference can be under higher selection pressure than previously thought, if they act as different ecological units. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Zooxanthellae, community structure, holobiont, Caribbean Sea, coral reefs, Symbiodinium, Scleractinia.

Conjuntos de holobiontes de especies dominantes de corales (Tipos de *Symbiodinium* y especies de corales) moldean la estructura comunitaria en arrecifes coralinos del Caribe

Resumen

Investigaciones de la estructura de comunidades coralinas sugieren que escalas espacio temporales cortas son responsables de patrones en ecosistemas marinos tropicales. La combinación coral y su zooxantela, u holobionte, puede ser la entidad ecológica modificada por estos factores. La estructura de la comunidad de corales podría ser mejor entendida usando el holobionte como unidad indivisible de la comunidad. Investigaciones recientes en diversidad de zooxantelas (Symbiodinium spp.) han revelado asociaciones de tipo específicas, así como generalistas dependiendo del hospedero. Su distribución depende tanto del hospedero como de las condiciones ambientales. Este estudio determino la identidad molecular de estos simbiontes en comunidades de corales duros (Scleractinia y Milleporina) en 27 localidades en el talud arrecifal superior (zona mixta) en Cartagena, Colombia. La identificación de zooxantelas se realizó mediante análisis de RFLPs (18S, SSU, rDNA, por sus siglas en inglés), DGGE y secuenciación de ADN (ITS2, rDNA). Se encontró variación intra e intercolonial, dependiendo de la especie del hospedero. Se determinaron diferentes holobiontes, como diferentes unidades ecológicas. Estas unidades correspondían a una minoría en la diversidad de especies, pero dominantes (p.ej., Orbicella spp.). Tomando cada holobionte como variable, se realizó un análisis de la estructura comunitaria y fue comparado con un análisis tomando solamente las especies de coral. Mayores similitudes entre estaciones se encontraron cuando se usaron los holobiontes. Las especies dominantes O. annularis y O. faveolata formaron en cada caso diferentes holobiontes, dependiendo de la profundidad. La preferencia hacia un tipo específico de zooxantela podría estar bajo mayor presión selectiva de lo que anteriormente se pensaba. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: zooxantelas, estructura de comunidad, holobionte, Mar Caribe, arrecifes de coral, *Symbiodinium*, Scleractinia.

Introduction

A fundamental question in biology is what governs species richness and abundance within communities. Since the seminal paper by Goreau (1959), Caribbean coral reef community structure is understood in terms of wave exposure and depth, a combination that makes reef zonation match geomorphological features (e.g., lagoon, back reef, reef crest, fore-reef terrace and slope). Landscape community structure studies based on either classification or ordination analyses show how coral reef sites are clustered in harmony to geomorphological features oftentimes exhibiting a continuum from shallow to deep or protected to exposed (e.g., Sánchez et al. 1997, 2005) as well as continental (neritic-siliciclastic) to oceanic (Velásquez and Sánchez, 2015). Prediction of coral community structure within a particular coral reef zone or habitat between two distant reefs is certainly a more difficult problem. The upper slope or mixed coral zone, for instance (Figure 1), shows very different community assemblages among different reefs in the Southwestern Caribbean Sea (e.g., Díaz-Pulido et al. 2004); the same happens when only sponges are taken into account (Zea, 2001). A likely explanation could be Hubbell's (2001) neutral theory, where local communities (e.g., particular reef sites) are stochastically more similar to each other depending on dispersal and connectivity links within the metacommunity. However, findings on Indopacific reefs suggest that this is not the case due to the low community structure similarity both within and among sites despite comparing the same upper slope habitat (Conolly et al. 2005, Dornelas et al. 2006), which suggest that finer spatialtemporal stochasticity drives biodiversity patterns in coral reefs. In other words, the differential species response to spatial stochastic heterogeneity seems to be structuring coral reefs within reef zones. Factors such as phylogenetic history, phenotypic plasticity (including specific symbiont preference) are possible factors driving this differential coral response.

The maintenance of hard corals in nutrient poor habitats is due to their symbiosis with zooxanthellae, *Symbiodinium* spp. (Dinophyceae: Suessiales), which are photosynthetic and provide corals with most of their nutrients (Muscatine & Porter1977, Muscatine, 1990). Inside the host, zooxanthellae could be found at very high concentration levels (several million per cm²). While these algae have also been found in the sediment and the water column, their concentrations are much lower (Littman 2008). The first studies, based on differences at physiological and biochemical levels, revealed high diversity of symbionts (Iglesias-Prieto et al. 1992). This has been confirmed by studies based on molecular markers

Alejandro Grajales, agrajales@amnh.org Juan Armando Sánchez, juansanc@uniandes.edu.co

Received: October 16, 2015

Accepted: May 24, 2016

(Rowan & Powers 1991, LaJeunesse 2002, McNally 1994, Santos et al. 2003). Different markers have been used to distinguish between different variants of symbionts at different resolution levels, and found that all belong to the genus Symbiodinium. RFLP analyses of the small subunit rRNA (18S) and partial chloroplast large subunit (23S)-rDNA regions (Rowan & Powers 1991, Santos et al. 2003) have revealed at least 8 clades of the genus, named A to H (Pochon et al. 2006). However, the diversification at this coarse level has shown little correlation in their presence among different hosts, e.g., clade C symbionts are found diverse anthozoan hosts including corals and sea anemones as well as octocorals (LaJeunesse 2001, Rowan & Knowlton 1995, Baker & Rowan 1997). The ITS2 (Internal Transcribed Spacer 2) region, applied in many phylogenetic studies of diverse organisms has shown better resolution, identifying different "types" within each clade (LaJeunesse 2002). The identification of types and subtypes has guided a rapid advance in the knowledge of ecology and evolution of dinoflagellate-coral partnership.

The studies on Symbiodinium diversity based on single coral species have revealed that depending on the host, the relation could be very conservative (e.g., one single type per coral species) at different regions or depths (Iglesias-Prieto et al. 2004), but the opposite is also true for other species (Rowan & Knowlton 1995). Information from symbiont identity in many hosts of different taxa has been available (hard corals, octocorals, anemones, bivalves). For instance, in the Caribbean clades A and B are more common at shallow depths, whereas clade C is found at greater depths (LaJeunesse 2002). In the Pacific Ocean, on the other hand, clade C is the dominant symbiont in both shallow and deep reefs (Baker 2003). A compelling finding to consider zooxanthellae as driving factors for coral community structure is that the same species of scleractinian as well as soft corals exhibit significant differences in growth rates according to the zooxanthellae type (Little et al. 2004). In soft corals, it has been shown that zooxanthellae play a key role in shaping their distribution (Fabricius & De'Ath 2008). If the holobiont is the ecological unit under selection and not the coral host and the zooxanthellae as single entities (see review in Blackall et al. 2015), coral reef community structure should be better understood using the holobiont as the community indivisible unit.

Caribbean coral reefs, with near 50 scleractinian coral species, are modest in terms of coral biodiversity compared to their Indopacific counterparts, with over 400 species. Nonetheless, Caribbean corals have less generic dominance (e.g., vs. *Acropora* or *Pocillopora* in the Pacific) and also include an overall phylogenetically more diverse assemblage of zooxanthellae (LaJeunesse 2003), which provides appealing coral-zooxanthella holobiont diversity. Caribbean reefs comprise certainly a simpler model of a coral community assemblage to examine the prediction that

^{*}Corresponding author:



Figure 1. Upper slope, mixed coral zone in Caribbean reefs. Left: Dominant corals in the Caribbean upper slope zone, *Orbicella faveolata* (far) and *O. annularis* (near) (Serrana Bank, Colombia). Right: 50 cm² quadrat on the upper slope at "La montañita" reef (Barú Island, Colombia).

coral community analyses based on holobionts provide better information on community structure. The objective of this study was to use the information of symbiont types and scleractinian species coral cover in the coral reefs at the vicinity of Cartagena (Colombia) to make a holobiontbased community analysis (i.e., holobiont = coral sp. + *Symbiodinum* type).

Materials and methods

The study area was located southwest of Cartagena, Colombia, with a 40 km north to south extent (10° 15' to 9° 35' N, 75° 47' to 75° 50' W). Most of the modern reefs of the area have developed over ancient tertiary reef platforms and on more recent mud diapirs eroded and regrown in a step-like pattern by the continuous processes of sea level transgression-regression forming several reef steps, which were colonized by modern reefs (e.g., Vernette et al. 1992). These reefs can be considered mixed siliciclastic-carbonate environments due to their closed proximity to river mouths and estuaries, where coral genera such as *Undaria*, *Agaricia*, *Porites* and *Orbicella* are dominant (see details in Camargo et al. 2009, Cáceres & Sánchez 2015). More or less separated coral reefs in the area are those of Barú peninsula, Salmedina Banks and Rosario islands.

During May and August of 2005, tissue samples (<1 cm²) of symbiotic corals were collected by SCUBA diving. The samples, limited to four per species at each site, were taken along 25 m length transects at 27 different sites in the upper slope or mixed corals zone (see Appendix 1 for exact locations). Tissue was removed from the edge of the colonies taking a pinch with metal tweezers <<1 cm³. At each site, the samples for each species were obtained from portions having different orientations towards the sun, to include possible light-related zonation patterns in zooxanthellae

types. The samples were kept in sealed bags with seawater and fixed after collection in 96% alcohol. Nucleic acids were extracted following the protocol by Coffroth et al. (1992) including some slight modifications. A small fraction from the tissue was transferred to a 1.5 ml Eppendorf tube and grounded. The cells were lysed using a buffer with a CTAB (cetyltrimethyulammonium bromide) and then incubated for 1 hour at 65° C with proteinase K. Then DNA was extracted by adding 300 µl mixture of FCIA (phenol, chloroform and isoamyl alcohol 25:24:1: 300 µL) and centrifuging 10 min at 12000 rpm. The supernatant was transferred to a second tube. Then, CIA (chloroform, isoamyl alcohol 24:1: 300 µL) was added to the original tube and a second centrifugation (10 min at 12000 g) with was carried out to complete the separation of the residues from the DNA. Again the supernatant was transferred to a third tube and DNA was precipitated with 800 µl of 95 % ethanol for 12 hrs at -20° C. After a centrifugation step of 30 min at 12000 rpm, the alcohol was discarded and a final wash-centrifugation step (10 min at 12000 rpm) was made with 500 μ l of 70 % ethanol. After discarding the alcohol, the DNA pellet was air dried and re-suspended in 30 µl of TE buffer.

To identify zooxanthellae, the primers SS3Z (5'GCACTG CGGCAGTCCGAATAATTCACCGG 3'), and SS5 (5'GG TTGATCCTGCCAGTAGTCATATGCTTG 3') (Rowan & Powers 1991) were used to amplify the nuclear small subunit ribosomal DNA (SSU 18S rDNA). The obtained fragments were digested with *Taq1* restriction enzyme. Digestion products were analyzed in a 5 % 1X TBE (Tris Borate EDTA) polyacrilamyde gel. The obtained patterns were compared with the *Taq1* standards for each clade (e.g. Santos et al. 2003). In addition, amplification of the ITS2 region were performed using the forward primer, "ITSintfor2" (5'GAATTGCAGAACTCCGTG-3'), which

anneals to a conserved region of the 5.8 ribosomal gene and the reverse primer "ITS2CLAMP" (5'GGGATCCATAT GCTTAAGTTCAGCGGGT-3'), modified with a 39 bp GC clamp (LaJeunesse & Trench 2000). The PCR was carried using a touchdown amplification protocol (LaJeunesse 2001). Samples of each species at different depths were loaded onto an 8 % polyacrylamide Denaturing Gradient Gel Electrophoresis-DGGE (45 %-80 % urea-formarmide gradient; 100 % consists of 7 mol L⁻¹ urea and 40 % deionised formamide) and separated by electrophoresis for 9 hrs at 150 V at a constant temperature of 60° C (LaJeunesse 2002). Standard types were also loaded to compare them to the tested types. The gel was stained with ethidium bromide (2 µl, 10 mg ml⁻¹) and then visualized in a BioRad Chemidoc XRS and the software Quantity One 4.0. Prominent bands from denaturing gels were excised and placed separately into 1.5 ml Eppendorf tubes containing 50 µl TE (Tris EDTA) buffer and heated 10 min at 60° C and stored at -20° C. Reamplification was later performed with 2.5 µl of sample using the "ITSintfor2" forward primer, and the conserved flanking reverse primer lacking the GC clamp (Coleman et al. 1994). The PCR protocol was similar to the mentioned above, but no touchdown was used. Cycle sequencing was accomplished in both directions using 3.2 pmol of the forward and reverse amplification primers separately. Reagents and reaction conditions were as specified in the ABI Prism Big Dye Terminator Cycle Sequencing ready reaction kit (PE Applied Biosystems, Foster City, CA, USA). Reaction products were analyzed on an Applied Biosystems 310 genetic analyzer (Division of Perkin Elmer, Foster City, CA, USA).

Chromatograms were checked, edited, and sequences aligned using the software ClustalW under default settings to construct the alignment, included in the BIODEIT package (Hall 1999) and deposited in Genbank (Accession numbers EF542836-EF542845). To assess phylogenetic relationships to the sequences, maximum parsimony (MP) and maximum likelihood (ML) phylogenetic analyses were conducted on aligned data sets using PAUP 4.0b8 software under default settings (Swofford 2002). Under maximum parsimony, sequence gaps were designated as a fifth character state. A bootstrap re-sampling was conducted for 1000 replicates to assess relative branch support (Felsenstein 1985). In addition, Bayesian inference of phylogeny was done using MrBayes (Huelsenbeck & Ronquist 2001) with 1,000,000 generations. ML and Bayesian analyses were carried out with the best-fit model obtained respectively from ModelTest and Mrmodeltest (Posada & Crandall 1998) based on the Akaike Information Criterion (AIC).

In the same 27 transects, a set of photo belt quadrats of 0.25 m^2 was taken to analyze the live coral cover for each sampled community (Figure 1). To ensure that all quadrat pictures had an area of 0.25 m^2 , photographs were adjusted to this area using the quadrat picture as a scale, using the software

Photoshop 7.0. Coral cover of each species was estimated using the software ImageJ (NIH). The resulting matrix contained the relative cover of each species in percentage from the total cover for each site. For each species in the analysis, information of the symbiont type was cross-corroborated using the molecular techniques explained above. Two groups of data were assembled, the first one containing the raw coral cover data (coral species), and a second one including a new holobiont variable when a coral presented symbiotic associations with different Symbiodinium types. This was performed only when differences in symbiont type were clear at the DGGE-sequence level. A cluster analysis using the software PRIMER 5 version 5.2.9 (Clarke & Warwick 2001) was performed to each dataset (using a Bray Curtis similarity matrix and fourth root data transformation) to compare the assemblage groupings of raw coral cover vs. holobionts. A 1000 replicates bootstrap was performed on each cluster to assess the degree of statistical significance of the associations, using the software BOOTCLUS (McKenna 2003). Finally, a grouping of species was made depending on the membership to a nested or group of nested clusters (also called inverse analysis, Kaandorp 1986). The characteristic species or holobiont of each nested cluster were determined by calculating substrate cover for each cluster and then marking those which contained at least 70% of the species' total abundance (e.g., Sánchez et al. 2005). Additionally, a non-metric multidimensional scaling (nMDS) was performed with the software PRIMER 5 to each kind of data to compare the obtained grouping with environmental variables (depth, exposure - windward/ leeward and distance to the coastline).

Results

Zooxanthellae identification.

A total of 41 scleractinian species were included in the analysis. The identification of the Symbiodinium clades showed in some cases more than one RFLP pattern, an indicative that in a single colony more than one clade was present simultaneously (see Electronic Supplementary material B). Within a given species, coral colonies also presented different clades at different depths and locations. A total of 15 coral species (36.5 %) presented more than one zooxanthellate clade, both within and/or between colonies (Table 1). A total of 280 samples of coral species were analyzed; from 41 coral species, four Symbiodinium clades and at least 10 types were identified. Only one symbiont type was found in clade A (A4a) in the species Porites astreoides, Type B1 in Millepora complanata and M. alcicornis, it was presumably present in more species (Eusmilia fastigiata, Siderastrea siderea, Pseudodiploria clivosa, and Diploria labyrintiformis) A different type within clade B was detected for Porites furcata (Appendix 3b), but it was not possible to identify due to the lack of resolution of the phylogenetic tree. In terms of prevalence, clade C was present in most scleractinian species, either as a

Table 1. Scleractinian hosts sampled and genetic identity of *Symbiodinium spp.* The identification of the symbionts types was made by RFLPs of the 18S rRNA region. Identification of symbiont subtypes was made by and PCR-DGGE and ITS2 sequencing. Samples were taken in Cartagena de Indias' reefs on October 2005. For *O. annularis* and *O. faveolata*, two different associations were found at 8 - 12 m and 12 - 25 m.

Host	Nr. of	Geneti	Depth	
	samples	18S	ITS2	(m)
Acropora cervicornis	2	А	A3	8-10 m
Acropora palmata	1	А		10 m
Agaricia fragilis	2	С		20 m
Agaricia undata	2	С		8-22 m
Colpophyllia natans	8	С, В		7- 22 m
Dichocoenia stokesii	1	С		22 m
Diploria labyrinthiformis	5	С		7-22 m
Eusmilia fastigiata	6	С		8 - 22 m
Favia fragum	2	С		7 - 22 m
Isophyllastrea rigida	2	С		10 m
Isophyllia sinuosa	2	В		10 m
Leptoseris cucullata	17	С	C3	8- 23 m
Madracis decactis	2	С		8 m
Meandrina meandrites	5	С	C3	8-12 m
Meandrina meandrites	10	C B	C3, B1	12- 36 m
Millepora alcicornis	20	ABCD	A4, B1, C1	8 - 22 m
Millepora complanata	1	А		8 m
Mussa angulosa	2	C B		10 m
Mycetophyllia aliciae	5	C B		8 - 22 m
Mycetophyllia lamarckiana	5	С		10 m
Orbicella annularis	25	А		8- 12 m
Orbicella annularis	25	С		12- 22 m
Orbicella faveolata	20	А		8- 12 m
Orbicella faveolata	20	СE		12 - 22 m
Porites astereoides	20	A B C	A4, B1, C3	8- 36 m
Porites colonensis	10	С		8-22 m
Porites porites	5	С		8- 22 m
Pseudodiploria c1ivosa	5	В	B1	7- 22 m
Pseudodiploria strigosa	9	С		8- 22 m
Scolymia cubensis	2	С		20 m
Scolymia lacera	2	С		20 m
Siderastrea siderea	10	C, B		8- 22 m
Solenastrea bournoni	2	В		20 m
Solenastrea hyades	5	C,B		20 m
Stephanocoenia intercepta	5	В		20 m
Undaria agaricites	20	С	C 3	8-22 m
Undaria tenuifolia	15	С	C3	8-36 m

single symbiont or making combinations with other clades, mainly B. The identification of specific types within clade C was difficult, due to the high number of types that differed in only a few base pairs or INDELS (Appendix 2). For clade C, different responses were observed, from a single symbiont type preference, to intra and intercolony variation.

The most polymorphic coral species was *Porites astreoides* (clades A, B, and C) followed by *Millepora alcicornis* (A, C, and E) and *Orbicella faveolata* (A, C, and E). Symbiont type determination was done for the most prevalent coral species (n=20). The ITS2 identification was based on the genetic identity of prominent bands that were excised, sequenced and reloaded in consequent DGGE profiles. In some cases more than one prominent band was present (e.g., Figure 2), indicative of more than one symbiont type in the sample (LaJeunesse 2002). For most of the studied species, more than one sample was loaded in gel so we could test the variability of the symbiont type. This was helpful in determining which bands were going to be excised and sequenced. If two different bands were present in a species, both were analyzed; the same was applied if two or more



Figure 2. Examples of *Symbiodinium* depth zonation.

Shift over a depth gradient of DGGE profiles at various depths (m) for a coral species with and without symbiont. **a.** In *Meandrina meandrites*, the symbiont type B1 is present at depths greater than 12 m. A different symbiont appears at 36 m, but could not be identified at the type level. **b.** *Millepora alcicornis* profile, in which distinctive bands of different types and clades were present, but were not correlated to a depth gradient. C3 and B1 types were present in the same colony while A3 type appears as single symbiont. Hd. Heteroduplexes.

bands were consistently repeated through the gel. The overall results were consistent with 18S analysis in terms of specificity.

Three coral species showed a pattern of association to a specific symbiont depending on depth. Meandrina meandrites presented a single type, C3, in depths above 12 m, and a combination of types C3 and B1 below that depth (Figure 2a). A different type was identified at 36 m, but was not identified to the type level. The other two species, O. annularis and O. faveolata presented clade A at shallow depths, while clade C was present at greater depths (Table 1). Even if more than one band was present, different associations were observed with increasing depth. Other species, such as Millepora alcicornis (Figure 2b), presented high variability in symbiont type, but it was not correlated with depth. In this case, combinations of two types of symbionts, B and C, were observed, but whenever clade A was present it was as a single symbiont, indicating a possibility of competitive exclusion.

Phylogenetic analyses were carried out separately for each Symbiodinium clade, to assess the identity and relatedness of types for each sequenced sample. However, the rapid radiation of symbiont types in clades B and C made difficult the identification of some types, even at the ITS2 resolution (see also LaJeunesse et al. 2005). Clade A topology (Appendix 3a), showed the sequence of Porites astreoides symbiont closely related to type A4, but in other cases, the relatedness was not clear. The phylogenetic analysis of clade B showed a core descending from type B1, which contains the *Diploria labyryntiformis* sequenced type (Appendix 3b), but it was not possible to assess a precise identity. Likewise, the topology of clade C grouped most of the sequences of this clade within a large polytomy. This included all the species from Undaria and Agaricia, Orbicella annularis and other *Porites* species in which appeared the clades C1 and C3 (Appendix 3c). This was indicative that a single type was present in all these species, as seen in other studies (LaJeunesse 2002). Other types present in O. faveolata and P. furcata were distant from this core, related to types C7 and C4/5, also present in the area. It the case where the topologies were not resolved, DGGE similarity was the only criterion for type determination.

Coral community structure.

A total of 41 hard coral species were found at the sampled sites and coral cover varied from 42.2 to 1.5 % (Appendix 4a) and the species number varied from six to twenty five. Some sites with high coral cover or species number were outside the limits of the protected area (Appendix 1). The most prevalent species in the area were *Orbicella faveolata*, *Undaria tenuifolia*, *Porites astreoides*, *O. annularis* and *U. agaricites*. Cluster analysis (Figure 3) showed different associations in the sampled sites. A total of 5 groups were retained as significantly similar in cluster A, including



Figure 3. Cluster analysis of coral cover and holobiont zonation. Cluster grouping the sampled sites using **A.** Coral cover information alone and **B.** Holobiont information. Blue quadrants represent groups of sites significantly similar, retained after 1000 bootstrap replicates (P > 0,05). Letters A to E on the left correspond to the retained groups in coral species cluster, while letters from A to H on the right correspond to the retained groups in the holobiont cluster. Two and three letter codes correspond to the sampled sites (Appendix 4a for detailed information).

15 of the 27 sampled sites. Cluster B retained 8 groups with at least 50 % similarity, including 22 of the 27 sampled sites. The composition of all retained group was identical between clusters.

The community assemblage analysis presented in Tables 2 and 3 show characteristic species of each retained group in the two datasets, A and B (Coral species only and holobiont based clusters, respectively), this is, species with >70 % of their total abundance in one of the resulting groups. Cluster A retained 5 groups, in which only two species appeared as characteristic, *Acropora cervicornis* and *Stephanocoenia intersepta*, with a 100 % presence (not found on other sites). Cluster B retained a total of 11 characteristic species, with abundances ranging from 85 to 100 %. Most of the species defining each group in cluster A were uncommon species with low cover percentages (Appendix 4b), in assemblages formed by specialist species. *Meandrina meandrites* holobionts, however, were differentiated among groups. One of them (with C3 symbiont type only) appeared **Table 2.** Coral species community assemblages. Boxes mark all the species characteristic of each nested group according to the cluster on the figure 2A (Kaandorp inverse analysis, including the 70 % relative abundance of each species in a given cluster or group of clusters). In bold, species that are exclusive for each group (with 100 % of their relative abundance). The data is presented as coverage percentage for each species.

Coral species/ Group	Α	В	С	D	Е	
Acropora cervicornis	-	-	-	0.24	-	
Acrópora palmata	6.03	-	-	-	-	
Agaricia fragilis	0.04	-	0.40	0.05	0.01	
Agaricia humilis	-	0.01	-	0.10	-	
Agaricia lamarcki	-	-	1.08	0.44	-	
Agaricia undata	-	-	2.51	0.23	-	
Colpophyllia natans	4.32	2.00	-	5.19	1.41	
Dichocoenia stokesii	-	-	-	-	-	
Eusmilia fastigiata	-	0.15	0.09	0.10	-	
Favia fragum	0.01	0.02	-	-	-	
Isophyllastrea rigida	0.05	-	-	-	-	
Isophyllia sinuosa	-	-	0.01	-	-	
Leptoseris cucullata	-	0.50	3.29	0.37	1.37	
Mardacis decactis	0.01	-	0.69	0.27	-	
Madracis auretenra	-	-	-	-	-	
Meandrina meandrites	-	0.27	0.06	1.34	0.01	
Millepora alcicornis	0.66	2.13	0.20	0.51	0.19	
Millepora complanata	-	0.52	-	-	-	
Millepora striata	-	-	-	-	-	
Montastraea cavernosa	2.78	1.25	1.83	4.18	0.06	
Mussa angulosa	0.03	-	0.71	17.93	-	
Mycetphyllia aliciae	-	-	-	0.42	-	
Mycetophyllia lamarckiana	-	-	0.44	0.32	-	
Mycetophyllia ferox	-	-	-	0.10	-	
Orbicella annularis	9.84	0.48	-	1.36	-	
Orbicella faveolata	42.41	20.76	36.82	14.35	2.01	
Porites astreoides	0.28	0.05	0.15	0.06	-	
Porites colonensis	11.44	6.06	7.73	5.22	5.98	
Porites furcata	-	-	0.01	0.18	-	
Porites porites	2.10	0.09	0.03	-	1.96	
Pseudodiploria clivosa	2.01	0.99	-	2.56	-	
Diploria labrynthiformis	0.73	1.50	0.16	0.81	-	
Pseudodiploria strigosa	18.79	1.60	1.60	2.29	-	
Siderastrea siderea	0.11	0.20	0.10	-	-	
Scolymia cubensis	0.28	1.04	6.17	1.10	0.05	
Scolymia lacera	-	-	-	-	-	
Solenastrea bournoni	-	-	0.02	-	-	
Solenastrea hyades	-	-	-	0.34	-	
Stephanocoenia intersepta	-	-	-	0.69	-	
Undaria agaricites	4.08	5.63	18.01	6.60	0.28	
Undaria tenuifolia	14.70	9.68	1.00	0.44	21.13	

as characteristic species (94 % of its total cover) in one of the retained groups in the cluster analysis. In contrast, the second holobiont (composed by symbiont types C3 ad B1), was more spread over different groups.

All the sites were placed on upper slopes, or on mixed zones at bank plateaus, or on lower fore-reef terraces at fringing reefs, seeking the best conditions for coral growth at each site. Nonetheless, some environmental variables such as depth, wave exposure and relative water turbidity were different among sites. The nMDS ordination analysis showed no structure or correlation between grouped sites and the measured environmental variables in any of the assemblages (Appendix 5).

Discussion

The holobiont configuration was used to make an analysis of the coral community structure, which provided better resolution at a finer level (within upper slope habitat communities). The use of holobionts (coral species and specific zooxanthellae type) led to eight significantly similar groups with at least 50 % similarity. Even if only three species showed marked differences in the type of symbiont over a depth range, the high prevalence of two of them over most habitats was enough to change the similarity analysis among sites. It was evident that for the dominant reef-building corals at mixed zones, the differential species response to spatial stochastic heterogeneity was related to zooxanthellae type. Since O. annularis and O. faveolata are broadcast spawners (e.g. Sánchez et al. 1999), their larvae must acquire zooxanthellae from the environmental pool. Their Symbiodinium preference will determine their fitness (Mieog et al. 2009), depending on the availability of different free-living types of the symbionts (e.g., Porto et al. 2008). The ecological relevance of coral assemblages structured by holobionts together with the depth-related Symbiodinium preference observed in the dominant Orbicella spp. corroborates the idea on the holobiont as an ecological unit responding to environmental stochasticity. This provides a precedent for future studies, which may focus on how this unit can be a key factor driving ecological speciation via local adaptation to environmental conditions (Rowan & Knowlton 1997, Toller et al. 2001, 2001a, 2001b Leggat et al., 2007). Another example of ecological differentiation is given by the distribution of the holobionts of Meandrina meandrites. The first holobiont (M. meandrites + C3) was identified as a characteristic species/unit in one of the retained groups in the cluster analysis. The second holobiont (*M. meandrites* C3 + B1), was divided into different groups. These results could also suggest ecological differentiation, showing different patterns of distribution and specialization that might have been overlooked by using the information given by the coral species information alone. Since our field survey was done before the taxonomic revision of Meandrina (Pinzón and Weil, 2011), it is possible that these associations could correspond to the paler species M. jacksoni.

Table 3. Holobionts (Scleractinian coral species + *Symbiodinium* type) community assemblages. Boxes mark all the species characteristic of each nested group according to the clusters on the figure 2B (Kaandorp inverse analysis, including the 70 % relative abundance of each species in determinate clusters). In bold, species that are exclusive for each group (with 100 % of their relative abundance). The data is presented as coverage percentage for each species.

Holobiont/ Group	Α	В	С	D	Ε	F	G	н
Acropora cervicornis	0.24	-	-	-	-	-	-	-
Acrópora palmata	0.26	-	-	-	6.03	-	-	-
Agaricia fragilis	0.05	0.35	0.15	-	0.04	-	0.01	-
Agaricia humilis	0.03	-	0.02	0.01	-	0.73	-	-
Agaricia lamarcki	1.29	1.08	-	-	-	4.11	-	2.00
Agaricia undata	-	2.51	-	-	-	0.23	-	-
Colpophyllia natans	5.31	-	0.24	1.18	5.14	2.49	1.41	-
Dichocoenia stokesii	-	-	0.00	-	0.00	-	-	-
Eusmilia fastigiata	0.28	0.09	0.34	0.15	-	1.65	-	0.19
Favia fragum	-	0.00	-	0.02	0.01	-	-	-
Isophyllastrea rigida	-	-	-	-	0.05	-	-	-
Isophyllia sinuosa	-	-	-	-	-	0.17	-	-
Leptoseris cucullata	0.96	1.88	0.04	0.11	0.39	0.42	1.37	0.15
Mardacis decactis	0.27	0.64	0.11	-	0.01	0.25	-	0.01
Madracis auretenra	-	-	-	-	-	0.23	-	-
Meandrina meandrites + C3	0.50	-	-	-	-	0.02	0.01	-
Meandrina meandrites + C3 B1	1.32	-	0.46	0.27	-	-	-	-
Millepora alcicornis	0.51	0.08	1.20	1.68	1.11	-	0.19	-
Millepora complanata	-	-	-	0.52	-	-	-	-
Millepora striata	-	-	0.03	-	-	-	-	-
Montastrea cavernosa	5.09	1.56	1.58	2.27	1.76	5.09	0.06	0.44
Mussa angulosa	0.42	-	-	-	-	-	-	-
Mycetphyllia aliciae	1.24	0.23	-	-	-	0.34	-	0.28
Mycetophyllia lamarckiana	0.06	-	-	-	-	0.15	-	-
Mycetophyllia ferox	0.06	0.09	0.89	0.17	0.15	-	-	-
Orbicella annularis + A	1.01	-	-	-	2.67	0.27	-	-
Orbicella annularis + C	-	-	-	5.72	1.93	0.35	-	3.41
Orbicella faveolata +A	17.62	17.42	1.47	39.81	-	-	2.01	13.71
Orbicella faveolata + C	-	-	-	-	23.39	36.30	-	-
Porites astreoides	5.20	7.73	13.18	5.39	12.11	3.01	5.98	2.18
Porites colonensis	0.18	0.01	-	-	-	-	-	-
Porites furcata	-	0.03	0.14	0.61	1.58	-	1.96	-
Porites porites	-	0.10	-	0.22	0.08	-	-	-
Pseudodiploria clivosa	0.92	-	0.17	0.35	2.64	1.64	-	-
Diploria labrynthiformis	0.78	0.16	-	1.01	1.22	0.03	-	-
Pseudodiploria strigosa	4.73	0.11	-	2.26	18.14	-	-	-
Siderastrea siderea	0.96	0.38	0.22	1.03	0.29	3.08	0.05	0.82
Scolymia cubensis	-	-	0.01	-	-	-	-	-
Scolymia lacera	-	0.02	-	-	-	-	-	-
Solenastrea bournoni	-	-	-	-	-	1.03	-	-
Solenastrea hyades	0.69	-	-	-	-	0.56	-	0.15
Stephanocoenia intersepta	0.63	-	0.06	-	-	0.26	-	-
Undaria agaricites	6.91	13.45	8.72	6.24	3.47	13.06	0.28	0.37
Undaria tenuifolia	12.25	1.00	0.19	7.74	16.64	3.12	21.13	0.03

The distribution of *Symbiodinium* spp. types in a particular landscape is given by host identity and environmental variation, mainly sun irradiance (Warner et al. 2006, Finney et al. 2010). It is expected that more species present a marked shift in symbiont type at shallower locations (below 6 m), because of higher light intensities and radiation could exclude some symbiont types (LaJeunesse 2002, Finney et al. 2010), or holobionts as a whole. Variation in symbiont type within a depth gradient has been reported in great detail for Orbicella annularis (Rowan et al. 1997). In contrast, Pocillopora verrucosa and Pavona gigantea, two dominant species in the eastern Pacific, harbor a distinctive symbiont that is adapted to a determined light regimen, which is likely responsible for the distribution of its respective coral host in a depth gradient (Iglesias-Prieto et al. 2004). Despite of some degree of tolerance at larval stages (e.g. Weiss et al. 2001) most coral species are adapted only to a single or few symbiont types at their adult stages. However, this specificity has been shown to be less absolute than previously thought (Silverstein, 2012), being variable depending of the local environmental conditions. Regional variation is also an important feature; the same coral species could be associated to different symbionts depending on the location and symbiont availability (LaJeunesse, 2002).

The survival of corals under different conditions is not the same for all the species. In the studied area, mono and polytypic coral-zooxanthellae associations were well represented, which suggest flexibility of some species for switching symbionts (Baker 2003). Coral species with more than one symbiont are capable of type switching if transplanted, or exposed to environmental stress (Baker et al. 2001). Even if this change is transient over a long time period (Thornhill et al. 2006, McGinley, 2012), the diversity of interaction and strategies of association of Symbiodinium supports the idea of greater ecological and evolutionary potential in flexibility. The worldwide pattern of monopolytypic species ratio shows that most coral species are associated to a single symbiont (Goulet, 2006). This scenario is alarming, since these species are, at least in the flexibility of their symbiont association, more fragile and susceptible if ocean conditions change (Baker, 2003, Putnam, 2012, Silverstein 2012). A clear prevalence of clade C was found, present in 80 % of the sampled species, a common pattern for scleractinians corals in other Caribbean locations (LaJeunesse, 2003). The proportion of scleractinian species sampled that harbor more than one symbiont was 35 % (with a common pattern of having clade C and other symbiont when polytypic association was present), which is higher than any if compared to other locations in the Caribbean, with a maximum of 25 % (Goulet 2006). This finding could be due to differences in sampling. Most species were sampled at various depths and different locations of the same area, a main difference with other sampled areas in the Caribbean. Other factors, such as the unique conditions of the Southwestern Caribbean reefs, e.g., high sediment loads

coming from Cartagena Bay (Restrepo et al. 2006, Velásquez et al. 2011, López-Angarita et al. 2013), could also be responsible for this divergent pattern. Finally, recent studies have shown that other microorganisms such as archaea and bacteria also play a key role in the ecological dynamics on coral communities (Ainsworth et al. 2010, Kimes et al. 2010, Littman et al. 2010); however, we were not able to characterize this microbial community at the time.

The analysis of species assemblages presented two and eleven species as specialists, depending on the cluster analyzed (coral species vs. holobiont as units). In both cases this species were uncommon and presented low cover. This is a general ecological pattern (e.g., Marrugan & Henderson, 2003), which was also found in other Southern Caribbean coral communities (e.g., Sánchez et al. 2005, López-Angarita et al. 2013). The most prevalent species such as Undaria tenuifolia, U. agaricites, Orbicella spp. and Porites astreoides did not appear as characteristic in any retained group. The imposition of environmental variables to the identified groups showed that the assemblages were not affected by a specific variable. Complementary studies including additional variables affecting coral preferences at small scale (rugosity, inclination) and time might more realistically correlate to the obtained clusters. This is the first study in which holobionts were used as units in the evaluation of coral reef assemblages. This approach resulted in greater resolution in the coral community structure, which can have important considerations on coral reef biodiversity and conservation policies.

Acknowledgments

We want to thank our sponsors *Facultad de Ciencias* and Department of Biological Sciences (Universidad de los Andes, Bogota, Colombia) and COLCIENCIAS (Grant #120409-16825, J.A. Sánchez). We appreciate assistance and helpful discussions from M. P. Rozo, I. Torres, L. Lima, C. Camargo, S. Santos, T. LaJeunesse, N. Ardila and S. Restrepo. This was a joint effort and at all stages it would have been very difficult to develop without their support. Special thanks to the members of the marine molecular biology laboratory (BIOMMAR), UniAndes, who helped developing this work. The authors acknowledge the participation of local communities during the field surveys.

Conflict of interests

The authors declare no having any conflict of interest in publishing this article.

Bibliography

- Ainsworth, T. D., Thurber, R. V., & Gates, R. D. 2010. The future of coral reefs: a microbial perspective. Trends in Ecology & Evolution, 25 (4): 233-240.
- Baker AC. 2003. Flexibility and specificity in coral–algal symbiosis: diversity, ecology and biogeography of *Symbiodinium*. Annual Reviews of Ecology and Systematics. 34: 661-689.

- **Baker AC, Rowan R.** 1997. Diversity of symbiotic dinoflagellates (zooxanthellae) in scleractinian corals of the Caribbean and Eastern Pacific. Proceedings of the Eighth International Coral Reef Symposium. **2:** 1301-1306.
- Blackall LL, Wilson B, & van Oppen MJ. 2015. Coral-The World's Most Diverse Symbiotic Ecosystem. Molecular Ecology (in press).
- Cáceres SM, & Sánchez JA. 2015. Growth strategies of an abundant reef-building coral in the southern Caribbean (Undaria tenuifolia). Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 39 (152): 348-357.
- Camargo C, Maldonado J, Alvarado E, Moreno-Sánchez R, Mendoza S, Manrique N, Mogollón, A, Osorio J, Grajales A, Sánchez JA. 2009. Community involvement in management for maintaining coral reef resilience and biodiversity in southern Caribbean marine protected areas. Biodiversity & Conservation. 18: 935-956.
- Clarke KR, Warwick RM. 2001. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. 2nd edition. PRIMER-E: Plymouth.
- Coffroth MA, Lasker, HR, Diamond ME, Bruenn, JA, Bermingham E. 1992. DNA fingerprints of a gorgonian coral: A method for detecting clonal structure in a vegetative species. Marine Biology. **114:** 317-325.
- **Coleman AW, Suarez A, Goff LJ.** 1994. Molecular delineation of species and syngens in volvocacean green algae (Chlorophyta). Journal of Phycology. **30:** 80-90.
- Connolly SR, Hughes TP, Bellwood DR, Karlson RH. 2005 Community Structure of Corals and Reef Fishes at Multiple Scales. Science. 2005; **309** (5739): 1363-5. doi: 10.1126/ science.1113281 PMID: 16123298
- Díaz-Pulido G, Sánchez JA, Zea SE, Garzón Ferreira J. 2004. Esquemas de distribución espacial en la comunidad bentónica de arrecifes coralinos continentales y oceánicos del Caribe colombiano. Revista de la Academia de Ciencias-Colombia. **108:** 337-347.
- Dornelas M, Connolly SR, Hughes TP. 2006. Coral reef diversity refutes the neutral theory of Biodiversity. Nature. 440: 80-82.
- Fabricius KE, De'ath G. 2008. Photosynthic symbionts and energy supply determine octocoral biodiversity in coral reefs. Ecology. 89 (11): 3163-73. ISI:000261053500020.
- Finney JC, Pettay DT, Sampayo EM, Warner ME, Oxenford HA, & LaJeunesse TC. 2010. The relative significance of host-habitat, depth, and geography on the ecology, endemism, and speciation of coral endosymbionts in the genus *Symbiodinium*. Microbial Ecology. **60** (1): 250-263.
- Felsestein J. 1985. Confidence limits on phylogenies: an approach using the bootstrap. Evolution. **39**: 783-791.
- Goreau TF. 1959. The ecology of Jamaican coral reefs: 1. Species composition and zonation. Ecology. **40:** 67-90.
- Goulet TL. 2006. Most coral may not change their symbionts. Marine Ecology Progress Series. **321:** 1-7.

- Hall TA. 1999. BioEdit: a user-friendly biological sequence alignment editor and analysis program for Windows 95/98/NT. Nucleic Acids Symposium Ser. 41: 95-98.
- Hubbell SP. 2001. The unified neutral theory of biodiversity and biogeography, Princeton University Press.
- Huelsenbeck JP, Ronquist F. 2001. MrBAYES: Bayesian inference of phylogeny. Bioinformatics. 17: 754-755
- Iglesias-Prieto R, Beltran VH, LaJeunesse TC, Reyes- Bonilla H, Thome PE. 2004. Different algal symbionts explain the vertical distribution of dominant reef corals in the eastern Pacific. Proceedings of the Royal Society London B. 271: 1757-1763.
- Iglesias-Prieto R, Matta JL, Robins WA & Trench RK. 1992. Photosynthetic response to elevated temperature in the symbiotic dinoflagelate *Symbiodinium microadriaticum* in culture. Proceedings of the National Academy of Science. USA 89: 10302-10305.
- Kaandorp JA.1986 Rocky substrate communities of the infralitoral fringe of the Bulonnais coast, NW France. A quantitative survey using cluster analysis. Marine Biology. 92: 255- 265.
- Kimes NE, Van Nostrand JD, Weil E, Zhou J, & Morris PJ. 2010. Microbial functional structure of *Montastraea faveolata*, an important Caribbean reef-building coral, differs between healthy and yellow-band diseased colonies. Environmental microbiology. **12** (2): 541-556.
- LaJeunesse TC. 2005 Species radiations of symbiotic dinoflagellates in the Atlantic and Indo-Pacific since the Miocene-Pliocene transition. *Molecular Biology and Evolution*. 22: 570-581.
- LaJeunesse TC, Loh WKW, van Woesik R, Hoegh-Guldberg O, Schmidt GW, Fitt WK. 2003 Low symbiont diversity in southern Great Barrier Reef corals relative to those of the Caribbean. *Limnology and Oceanography*. **48**: 2046-2054.
- LaJeunesse TC, Loh WKW, van Woesik R, Hoegh-Guldberg O, Schmidt GW, Fitt WK. 2003 Low symbiont diversity in southern Great Barrier Reef corals relative to those of the Caribbean. *Limnology and Oceanography*. 48, Table supplement.
- LaJeunesse TC. 2002 Diversity and community structure of symbiotic dinoflagellates from Caribbean coral reefs. *Marine Biology.* 141: 387-400.
- LaJeunesse TC. 2001. Investigating the biodiversity, ecology, and phylogeny of endosymbiotic dinoflagellates in the genus *Symbiodinium* using the ITS region: In search of a "species" level marker. *Journal of Phycology*. 37: 866-80.
- LaJeunesse TC, Trench RK. 2000 The biogeography of two species of *Symbiodinium* (Freudenthal) inhabiting the intertidal sea anemone, *Anthopleura elegantissima* (Brandt). *Biological Bulletin.* **199:** 126-134
- Leggat W, Ainsworth T, Bythell J, Dove S, Gates, R, Hoegh-Guldberg O, Iglesias-Prieto R, and Yellowlees D. 2007. The hologenome theory disregards the coral holobiont. Nature Reviews Microbiology. 5 (10).

- Little AF Van Oppen JH, Willis BL. 2004 Flexibility in Algal Endosymbioses Shapes Growth in Reef Corals Science. 304: 1492-1494
- Littman RA, van Oppen MJ, Willis BL. 2008. Methods for sampling free-living Symbiodinium (zooxanthellae) and their distribution and abundance at Lizard Island (Great Barrier Reef). Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2008 Sep 12; **364** (1): 48-53.
- Littman RA, Bourne DG, & Willis BL. 2010. Responses of coral-associated bacterial communities to heat stress differ with *Symbiodinium* type on the same coral host. Molecular Ecology. **19** (9): 1978-1990.
- López-Angarita J, Moreno-Sánchez R, Maldonado J, JA Sánchez. 2013. Evaluating linked social-ecological systems in Marine Protected Areas. Conservation Letters. 7: 241-252. DOI: 10.1111/conl.12063
- Marrugan AE, Henderson PA. 2003 Exploring the excess of rare species in natural species abundance distributions. Nature 422: 714-716.
- McGinley MP, Aschaffenburg MD, Pettay DT, Smith RT, LaJeunesse TC, & Warner ME. 2012. Symbiodinium spp. in colonies of eastern Pacific Pocillopora spp. are highly stable despite the prevalence of low-abundance background populations. Marine Ecology Progress Series. 462: 1-7.
- McKenna Jr JE. 2003. An enhanced cluster analysis program with bootstrap significance testing for ecological community analysis. Environmental Modelling & Software. 18: 205-220.
- McNally KL, Govind NS, Thome PE, Trench RK. 1994 Small subunit ribosomal DNA sequence analyses and a reconstruction of the inferred phylogeny among symbiotic dinoflagellates (Pyrrophyta). Journal of Phycology. **30**: 316-329.
- Mieog JC, Olsen JL, Berkelmans R, Bleuler-Martinez SA, Willis BL, van Oppen MJ. 2009 The roles and interactions of symbiont, host and environment in defining coral fitness. PLoS One. 4 (7): e6364.
- Muscatine L. 1990. The role of symbiotic algae in carbon and energy flux in reef corals. Coral Reefs. 25: 1-29.
- Muscatine L, Porter JW. 1977. Reef corals: mutualistic symbioses adapted to nutrient-poor environments. Bioscience. 27: 454-460.
- Pinzón JH., Weil E. 2011. Cryptic species within the Atlantic-Caribbean genus *Meandrina* (Scleractinia): a multidisciplinary approach and description of the new species *Meandrina jacksoni*. Bulletin of Marine Science. 87 (4): 823-853.
- Pochon X, Montoya-Burgos JI, Stadelmann B, Pawlowski J. 2006. Molecular phylogeny, evolutionary rates, and divergence timing of the symbiotic dinoflagellate genus *Symbiodinium*. Molecular phylogenetics and Evolution. 38 (1): 20-30.
- **Porto I, Granados C, Restrepo JC, Sánchez JA.** 2008. Macroalgal-associated dinoflagellates belonging to the genus *Symbiodinium* in Caribbean Reefs. PLoS ONE. **3**: e2160.

- **Posada D, Crandall KA.** 1998. Modeltest: testing the model of DNA substitution. Bioinformatics. **14** (9): 817-818.
- Putnam HM, Stat M, Pochon X, & Gates RD. 2012. Endosymbiotic flexibility associates with environmental sensitivity in scleractinian corals. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, rspb20121454.
- Restrepo JD, Zapata P, Díaz JM., Garzón-Ferreira J, García CB. 2006 Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. Global and Planetary Change. 50: 33-49.
- Rowan R, Knowlton N, Baker AC, Jara J. 1997. Landscape ecology of algal symbiont communities explains variation in episodes of coral bleaching. Nature. **388:** 265-269.
- Rowan R, Knowlton N. 1995. Intraspecific Diversity and Ecological Zonation in Coral-Algal Symbiosis. Proceedings of the National Academy of Science USA. 92: 2850-2853.
- **Rowan R & Powers DA.**1991. A molecular genetic identification of zooxanthellae and the evolution of animal-algal symbioses. Science. **251:** 1348-1351.
- Sánchez JA, Pizarro V, Acosta AR, Castillo P, Herron P, Marines JC, Martines P, Orozco C. 2005. Evaluation coral ref. Benthic communities in remote Caribbean atolls (Quitasueño, Serana and Roncador banks) to recommend marine-protected areas for the seaflower biosphere reserve. Atoll Research Bulletin. 531: 1-65.
- Sánchez JA, Zea S & Díaz JM. 1997. Gorgonian communities of two contrasting environments from oceanic Caribbean atolls. Bulletin of Marine Science. 61 (2): 61-72.
- Santos SR, Kinzie III RA, Sakai CK & Coffroth MA. 2003. Molecular Characterization of Nuclear Small Subunit (18S)-rDNA pseudogenes in a symbiotic dinoflagellate (Symbiodinium, Dinophyta). Journal of Eukaryote Microbiology. 50: 417-421.
- Silverstein RN, Correa AM, Baker AC. 2012. Specificity is rarely absolute in coral–algal symbiosis: implications for coral response to climate change. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences. 279 (1738): 2609-2618.
- Swofford, DL. 2002. PAUP*. Phylogenetic Analysis Using Parsimony (*and Other Methods). Version 4. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts.
- Thornhill DJ, LaJeunesse TC, Kemp DW, Fitt WK, Schmidt GW. 2006. Multi-year, seasonal genotypic surveys of coralalgal symbioses reveal prevalent stability or post-bleaching reversion. *Marine Biology*. 148: 711-722.
- Toller WW, Rowan R, Knowlton N. 2001a Zooxanthellae of the *Montastrea annularis* species complex: patterns of distribution of four taxa of Symbiodinium across different reefs and across depths. Biological Bulletin. **201:** 348-359.
- Toller WW, Rowan R, Knowlton N. 2001b. Repopulation of zooxanthellae in Caribbean corals *Montastrea annularis* and *Montastrea faveolata* following experimental and disease induced bleaching. Biological Bulletin. 201: 360-373.

- Velásquez J, López-Angarita J, JA Sánchez. 2011. Benthic foraminifera as indicators of ecosystem resilience in protected and non-protected coral reefs of the Southern Caribbean. Biodiversity & Conservation. 20: 3591-3603. doi: 10.1007/s10531-011-0152-7
- Velásquez J, Sánchez, JA. 2015. Octocoral Species Assembly and Coexistence in Caribbean Coral Reefs. PloS ONE. 10: e0129609
- Vernette G, Mauffret A, Bobier C, Briceno L, Gayet J. 1992. Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian margin. Tectonophysics. 202: 335-349.
- Warner ME, LaJeunesse TC, Robinson JD, Thur R.M. 2006. The ecological distribution and comparative photobiology

of symbiotic dinoflagellate from reef corals in Belize: Potential implications for coral bleaching. Limnology and Oceanography **51** (4): 1887-1897.

- Weiss, VM, Reynolds WS, Deboer MD, Krupp DA. 2001. Hostsymbiont specificity during onset of symbiosis between the dinoflagellates *Symbiodinium* spp. and planula larvae of the scleractinian coral *Fungia scutaria*. Coral reefs. **20** (3): 301-308
- Zea S. 2001. Patterns of sponge (Porifera, Demospongiae) distribution in remote, oceanic reef complexes of the southwestern Caribbean. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 25 (97): 579-592.

Variaciones en el estilo estructural relacionado con anisotropias de basamento en el Valle Medio del Magdalena

Giovanny Jimenez^{1,2,*}, Oscar López², Leonardo Jaimes², Ricardo Mier Umaña^{2,3}

¹Escuela de Geología, Grupo de Investigación GIGBA, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
 ²Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
 ³Grupo de investigación GIGHC, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia

Resumen

Con base en una revisión cartográfica en la zona central-este de la Cuenca VMM, la colección de datos estructurales y la elaboración de 3 cortes estructurales, se definieron 3 dominios estructurales en el área de estudio. El dominio este, dominio central y dominio oeste. El dominio este se caracteriza por la presencia de fallas inversas de alto ángulo y vergencia este, que involucran rocas Jurásicas. Los dominios central y oeste se caracterizan por la presencia de fallas inversas vergencia al oeste que involucran de manera general rocas del Cretácico inferior y rocas del Paleógeno-Neógeno. El corte regional muestra que las fallas del dominio este corresponden a estructuras con inversión tectónica evidenciadas por los cambios de espesor de la Formación Girón; estas estructuras se definen como un estilo estructural dominado por una deformación tipo *thick-skinned*. Las estructuras de los dominios central y oeste muestran fallas inversas con despegues y rampas en las unidades Cretácicas y Paleógenas dominadas por una deformación tipo *thin-skinned*. El modelo regional planteado muestra un estilo estructural divergente y difiere del modelo estructural reportado en estudios previos. En el presente trabajo se propone una zona transversal para explicar las variaciones en el estilo estructural del Valle Medio del Magdalena de sur a norte. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: estilo estructural, Valle Medio del Magdalena, inversión tectónica, dominios estructurales.

Structural style variation related with basement anisotropies in the Middle Magdalena Valley

Abstract

Based on a cartographic review of the central- eastern zone of the MMV Basin, the collection of structural data and 3 structural cross sections, it was possible to define three structural domains in the study area: The eastern domain, central domain and western domain. The eastern domain is characterized by east vergent and high angle reverse faults, involving the Girón Formation. Central and western domains are characterized by west vergent reverse faults involving Lower Cretaceous to Paleogene and Neogene rocks. A regional cross section shows that faults in the eastern domain correspond to tectonic inversion structures evidenced by changes in thickness of the Girón Formation. These structures are defined as a structural style dominated by thick-skinned deformation type. Structures of the central and western domains are characterized by flat-ramp reverse faults in the Cretaceous and Paleogene units dominated by thin-skinned deformation type. The regional model proposed shows a divergent structural style and differs from the structural model reported in previous studies. In this paper we propose a transverse zone to explain variations in the structural style of the Middle Magdalena Valley from south to north. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Structural style, Middle Magdalena Valley, tectonic inversion, structural domains.

Introducción

El Valle Medio del Magdalena (VMM) es una cuenca sedimentaria que se caracteriza por registrar diferentes fases de deformación, que incluye eventos de extensión, compresión y transcurrencia (**Cooper**, *et al.*, 1995; **Taboada**, *et al.*, 2000; **Sarmiento-Rojas**, *et al.*, 2006). Estudios previos en el sector Central-Sur de la Cuenca del VMM muestran un estilo estructural predominante con vergencia al Oeste y proponen una zona transversal hacia el norte (**Restrepo-Pace**, *et al.*, 2004). Durante etapas de deformación en ambientes distensivos es posible originar anisotropías del basamento, las cuales en fases de deformación posteriores controlan y afectan el estilo estructural (**Jiménez**, *et al*, 2012). Teniendo en cuenta la geología de superficie es posible reconocer terminaciones abruptas de fallas, cambios en el rumbo de fallas y pliegues o cambios en la vergencia de la estructuras (**Thomas**, 1990; **Thomas y Bayona**, 2002; **Jiménez**, *et al*, 2012). En otros sistemas orogénicos, como

*Correspondencia:

Giovanny Jimenez, gjimenezd@gmail.com Recibido: 15 de octubre de 2015 Aceptado: 1 de junio de 2016 el cinturón sur de los Apalaches (Thomas, 1990; Thomas **v Bavona**, 2002), la terminación abrupta de pliegues y fallas o el cambio de vergencia de estructuras han sido relacionados con la presencia de estructuras transversales del basamento que controlan la deformación de la cobertera sedimentaria y causan variaciones en el estilo estructural. Las alineaciones de las terminaciones o de los cambios de vergencia tienen una dirección oblicua a perpendicular respecto al rumbo preferencial de las estructuras regionales. Estas alineaciones se agrupan en un área denominada zona transversal (Jiménez, et al, 2012). Estas zonas transversales se asocian a zonas de transferencia de cuencas de rift, como las definidas en el Rift de Suez y del Mar Rojo (Moustafa, 2002). El propósito principal de este artículo es realizar un control cartográfico, proponer un estilo estructural y evaluar la hipótesis de presencia de zonas transversales en el sector central - oriental del Valle Medio del Magdalena (Figura 1), como lo sugieren estudios previos (Restrepo-Pace, et al., 2004).

El estudio de zonas transversales es fundamental debido a que son un control fundamental en la cinemática de estructuras recientes y definen el estilo estructural regional de una cuenca. Para el caso del VMM estas zonas trasversales podrían ser un factor determinante en la localización y diferenciación de bloques con alto y/o bajo potencial petrolífero.



Figura 1. Modelo de Elevación Digital (DEM) donde se muestran los límites estructurales del Valle Medio del Magdalena y las cordilleras Oriental y Central. El área de estudio está representada por el recuadro CVMM = Cuenca Valle Medio del Magdalena, SFLS-B = Sistema de Fallas La Salina-Bituima, SFES= Sistema de Fallas Espíritu Santo, SFBS = Sistema de Fallas Bucaramanga Santa Marta.

Marco geológico del Valle Medio del Magdalena

Las rocas de los Andes del Norte en Colombia han experimentado diversas fases de deformación tectónica debidas a los movimientos e interacción entre las placas Nazca, Caribe y Suramericana (Cooper, et al., 1995; Taboada, et al., 2000; Sarmiento-Rojas, et al., 2006). La evolución tectónica de la Margen NW de Suramérica durante el Triásico-Jurásico Cretácico temprano, inicia con una fase de extensión con fallas normales que definen un hemigraben con el paleo-alto Macizo de Santander - Floresta el cual divide dos subcuencas: Tablazo-Magdalena al oeste y Cocuy al este (Cooper, 1995). Durante este periodo la extensión está dominada por una subsidencia tectónica (Fabre, 1987, Cooper, 1995), que permite la acumulación de los sedimentos continentales a marinos (Mojica y Franco, 1990). El Cretácico temprano es dominado por la subsidencia tectónica en una cuenca back arc (Fabre, 1987; Cooper, et al., 1995; Sarmiento-Rojas, et al., 2006). El Cretácico tardío es definido como un periodo dominado por una subsidencia termal y una subducción continúa al oeste (Cooper, et al., 1995; Sarmiento-Rojas, et al., 2006). La secuencia post rift o back arc en la Subcuenca Tablazo Magdalena está caracterizada por rocas marinas ricas en calizas, lodos orgánicos y areniscas (Cooper, et al., 1995; Sarmiento-Rojas, et al., 2006). Las fases de compresión inician en el Maastrichtiano – Paleoceno temprano (Gomez, et al., 2003). Durante este periodo, la actual Cordillera Oriental se define como una cuenca segmentada y rellenada con depósitos synorogénicos y con pequeños bloques levantados (Bayona, et al., 2013; Parra, et al., 2012). Según Bayona, et al, (2013) En el Maastrichtiano a Paleoceno Medio la inclinación de la Cordillera Central favoreció la reactivación del borde oeste de la cuenca Cretácica. De acuerdo a Parra, et al, (2012) la exhumación del flanco oeste de la Cordillera Oriental inició en el Paleoceno.

Finalmente durante el Oligoceno Temprano – Mioceno se presenta la fase de inversión tectónica de la definiendo la configuración actual del VMM y la Cordillera Oriental (**Colletta**, *et al.*, 1990; **Cooper**, *et al.*, 1995; **Mora**, *et al.*, 2010), (Figura 1).

Geología estructural

El VMM es definido como una depresión tectónica asimétrica y limitada por dos frentes cabalgantes de vergencia opuesta, (**Córdoba**, *et al.*, 1996, Figura 1). Los límites estructurales del VMM los constituyen: al Norte, el sistema de fallas de Espíritu Santo (S.F.E.S); al Noreste, el sistema de fallas Bucaramanga-Santa Marta (S.F.B.S.M); al Sureste, el sistema de fallas Bituima y La Salina (S.F.B.S) y al Oeste, la Serranía de San Lucas y la Cordillera Central (**Barrero**, *et al.*, 2007) (Figura 1).

El VMM está basculado hacia el este, afectado por pliegues y fallas (**Pérez y Valencia**, 1977, **Mojica y Franco**, 1990). La deformación incrementa hacia el Sureste definiendo un

frente de deformación netamente compresional (**Taborda**, 1965). El límite Oeste del VMM puede ser definido como un límite con poca deformación suprayaciendo la Cordillera Central. La geometría de este límite se caracteriza por acuñamientos de las formaciones Cretácicas y Cenozoicas que buzan hacia el este (**Mojica y Franco**, 1990). Según **Córdoba**, *et al.*, (2001) el VMM es definido estructuralmente en tres sectores. El sector oriental, el cual se caracteriza por estructuras con dirección NE-SW, que predominantemente corresponden a sistemas de cabalgamientos con vergencia Oeste. El sector central se encuentra poco deformado, donde se encuentran fallas normales fosilizadas. El sector occidental se caracteriza por la presencia de fallas inversas con componente transpresivo y vergencia Este.

Estratigrafía

Los primeros estudios estratigráficos que definen la nomenclatura estratigráfica del VMM, son reportados en **Morales**, *et al.*, (1958) y modificados por **Etayo-Serna y Laverde**, (1985). De manera general la estratigrafía del VMM consiste de un basamento ígneo metamórfico de edades desde el Precámbrico al Paleozoico Inferior. Este basamento se encuentra suprayacido por una secuencia de rocas sedimentarias que van desde el Jurásico Tardío hasta el reciente (**Schamel**, 1991, **Moreno**, *et al.*, 2011, *Sarmiento L.F Rolón*, 2004). Las principales características de la secuencia sedimentaria se pueden resumir como:

Rocas de edad Jurásico- Cretácico Inferior (Berriasiano): Corresponden a rocas volcano-sedimentarios en un sistema fluvial estructuralmente controlado (formaciones Girón, Arcabuco-Los Santos) (**Etayo-Serna**, 1968; **Fabre**, 1983). Estas unidades están siendo suprayacidas por depósitos de rocas sedimentarias siliciclásticas y calcáreas del Cretácico temprano en una plataforma marina somera, que fue más amplia que el actual VMM (Grupo basal conformado por las formaciones Cumbre, Rosablanca, Paja y Tablazo). Rocas de edad Albiano a Maastrichtiano: Corresponden a rocas de ambientes marinos someras acumuladas en una plataforma afectada por los cambios del nivel del mar (formaciones Simití y La Luna, (**Rolón**, 2004,). Rocas de edad Cretácico Superior a Paleoceno: Corresponden a rocas siliciclásticas marinas a paludales (formaciones Umir y Lisama) depositadas en ciclos regresivos-transgresivos (**Rolón**, 2004). Rocas de edad Paleógeno- Neógeno: Corresponden a rocas continentales depositadas en un ambiente fluvial y rocas clásticas lacustres (formaciones La Paz, Esmeraldas, Mugrosa, Colorado y Real) (**Caballero, et al.,** 2010; **Rolón**, 2004).

Metodologia

La metodología usada en el presente trabajo consistió en la revisión cartográfica del sector SW del cuadrángulo H12 (Ward, et al., 1977a, 77b), donde se colectaron datos estratigráficos y estructurales con los cuales se generó el mapa regional (Figura 2). Se identificaron características litológicas y se controlaron los contactos litológicos de las formaciones Mesozoicas y Cenozoicas aflorantes. Se realizó una colección de datos estructurales (Rumbos y buzamientos de planos de estratificación, diaclasas, estrías y zonas de falla). Los datos estructurales se sometieron a la corrección por declinación magnética de 8º Oeste (ocho grados), según los datos obtenidos de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Se generó un mapa regional integrando los datos a la información disponible de mapas regionales (Ward, et al., 1973; Ward, et al., 1977a, 1977b; Royero y Clavijo, 2001; Beltrán y Quintero, 2008; Zafra, 2013). Finalmente se realizaron tres (3) cortes estructurales



Figura 2. Mapa geológico del área de estudio donde se resaltan las estructuras geológicas principales y la localización de las líneas de cortes estructurales. Tomado y modificado de **López y Jaimes**, (2015); **Ward**, *et al.*, (1977a, 1977b).

del área de estudio: dos cortes representan la estructuración local y el otro corresponde a un marco regional del área de estudio. Los tres cortes fueron elaborados con una orientación aproximada E-O perpendicular al rumbo de las capas y estructuras. La construcción de los cortes se llevó a cabo siguiendo principios geométricos (**Mitra**, 1992; **Suppe**, 1983).

Resultados

Cartografia

Al integrar la revisión cartográfica realizada y la información geológica disponible se reconocen unidades estratigráficas de edades del Jurásico a Cretácico Superior y Neógeno (Figura 2). En la zona se reconocen estructuras plegadas y fallas con orientación principal NNE-SSW (Figuras 2, 3, 4 y 5). Las características estratigráficas y estructurales permiten definir tres dominios estructurales: Dominio este, dominio central y dominio oeste. El dominio este, se caracteriza estratigráficamente por la exposición de rocas Jurásicas (Formación Girón) y del Cretácico Inferior (Formaciones Los Santos, Rosa Blanca, Paja y Tablazo). Estructuralmente este dominio está definido por dos fallas inversas con vergencia al Este que corresponden a la Falla del Suarez y Zapatoca y con los pliegues Anticlinal de Los Cobardes v Sinclinal de Zapatoca. El bloque vacente de la Falla del Suarez corresponde a la Mesa de los Santos dominada por buzamientos bajos ($< 30^{\circ}$), donde afloran las formaciones Girón, Los Santos, Rosa Blanca, Paja y Tablazo (Figura 2).

El dominio central se caracteriza estratigráficamente por la exposición local de rocas del Jurásico (Formación Girón) y del Cretácico Inferior a Superior (Formación Tablazo, Simití, La Luna y Umir predominantemente). Estructuralmente el dominio central se localiza entre las Fallas San Vicente y Las Flores y se caracteriza por fallas inversas con

vergencia Oeste. Los estratos en el bloque colgante de la Falla La Colorada buzan al este y en el bloque yacente buzan al oeste. Localmente en el dominio central se encuentran fallas con vergencia este (Figura 2).

El dominio oeste se caracteriza estratigráficamente por la pobre exposición de rocas, las cuales corresponden a rocas del Neógeno (Formaciones Colorado, Real y Mesa) así como depósitos aluviales recientes. Estructuralmente en este dominio se reconocen pliegues amplios y localmente se reconocen las fallas Arrugas, Cascajales y La Colorada (Figura 2).

Cortes estructurales

Cortes geológicos locales.

Los cortes geológicos locales A-A' y B-B' (Figura 3 y 4) se localizan en el dominio central. En el corte A-A' (Figura 3) se evidencia la vergencia Oeste de las fallas El Medio, San Vicente y Flores, las cuales tienen un despegue común y que sugiere una conexión con la Falla La Salina a profundidad. El Anticlinal de Los Cobardes y el Sinclinal de Nuevo Mundo en sus flancos oeste se encuentran afectados por dos fallas con vergencia al este. La falla que afecta al Anticlinal de Los Cobardes corresponde a un *back thrust* de las fallas El Medio. La falla que afecta al Sinclinal de Nuevo Mundo corresponde a la Falla La Putana que sería un *back thrust* de la Falla La Salina.

El corte B-B' (Figura 4) muestra una estructuración más sencilla con fallas con vergencia al oeste que corresponden a las fallas San Vicente y Flores con una falla menor localizada entre las dos anteriores y que localmente evidencia un *back thrust* asociado, afectando las unidades del Cretácico Inferior. Estas estructuras presentan un despegue común a profundidad y se evidencia una conexión con el frente de deformación de la Falla La Salina.



Figura 3. Corte estructural A-A' donde se muestra la estructuración local del dominio central del área de estudio. Las escalas vertical y horizontal son iguales. Leyenda y localización del corte: ver Figura 4. Tomado y modificado de López y Jaimes, (2015)



Figura 4. Corte estructural B-B' donde se muestra la estructuración local del dominio central del área de estudio. Las escalas vertical y horizontal son iguales. Leyenda y localización del corte: ver Figura 4. Tomado y modificado de **López y Jaimes**, (2015)



Figura 5. Corte estructural regional C-C' donde muestra la estructuración regional. Se incluyen los tres dominios, este, central y oeste del área de estudio. Las escalas vertical y horizontal son iguales. Leyenda y localización: ver Figura 4. Tomado y modificado de **López y Jaimes**, (2015)

Corte estructural regional.

El corte regional C-C' (Figura 5) corresponde a la integración de los tres dominios estructurales definidos en la cartografía. En el dominio este se resaltan las fallas del Suarez y Zapatoca, las cuales son fallas de alto ángulo y en el corte se marcan como fallas con inversión tectónica, debido a los cambios de espesor entre su bloque colgante y yacente. El dominio central se caracteriza por un despegue común en profundidad y otro más superior localizado en rocas del Cretácico Inferior (Formación Paja). El dominio estructural oeste en el corte C-C', se caracteriza por fallas con vergencia al oeste más espaciadas y causa pliegues más amplios. Los despegues en este dominio se localizan en el Cretácico Superior y Paleógeno.

Discusión y conclusiones.

De acuerdo a las características estratigráficas y estructurales se evidencia que el estilo estructural que define el sector este del VMM corresponde a un estilo de deformación tipo *thick-skinned* y que varía hacia sector central del VMM a un estilo de deformación tipo *thin-skinned* (Figuras 2, 3, 4 y 5). Los cortes estructurales evidencian que las fallas con vergencia este, corresponden *back thrust* asociados a fallas principales (Figura 5). Estos back thrust se encuentran tanto en los dominios de formación tipo *thin-skinned* y *thick-skinned* (Figuras 3, 4 y 5).

En el dominio este del área de trabajo se evidencia que las rocas Jurásicas (Formación Girón), se involucran en la dinámica de acortamiento (Figura 2 y 5). Los cambios de



Figura 6. Modelo estructural del Campo Escuela Colorado. Estructura anticlinal definida por la línea sísmica DM-1989-1440 y el modelo obtenido del Corte C-C' en Campo Colorado. Tomado y modificado de Chajín, *et al.*, (2013); López y Jaimes, (2015).

espesor registrados en la Formación Girón e incluso en la Formación Simití podrían relacionarse a la presencia de fallas normales. Los cambios de espesor definidos en los bloques, colgante y yacente de las fallas Suarez y Zapatoca permiten inferir que estas estructuras corresponden a estructuras de inversión tectónica (Figura 2 y 5).

Hacia el dominio central localmente se reconocen afloramientos de la Formación Girón, mientras que en el dominio oeste está ausente. Esto implica que los desplazamientos verticales de las fallas han de ser mucho menores y se encuentran despegues exclusivamente en rocas del Cretácico y Cenozoico (Figuras 3, 4 y 5).

Chajín, et al., (2013) con base en información de subsuelo proponen para el Campo Escuela Colorado un anticlinal asimétrico, con un eje N-S y cabeceo al norte (Figura 6). El anticlinal está asociado a la Falla Colorado, la cual presenta un *back thrust.* Por otro lado, con información de superficie estas estructuras se definen como fallas normales con componente sinestral (**Zafra**, 2013). El modelo presentado en el corte C-C' (Figura 6) es coherente con la geometría presentada por **Chajín, et al.,** (2013).

En general se reconoce una diferencia notable en el estilo estructural del sector este del VMM respecto al sector central y sur del VMM. El sector este del VMM se caracteriza por fallas de alto ángulo, con vergencia al este y que involucran rocas Jurásicas, con cambios de espesor en las unidades. Mientras que el sector central se caracterizan por la presencia de cabalgamientos y pliegues asociados con vergencia oeste similar al estilo estructural definido por (Restrepo-pace, et al., 2004). El estilo estructural definido para el sector sur del VMM involucra un sistema de cabalgamientos con vergencia al oeste con una zona de transferencia hacia el norte (Restrepo-Pace, et al., 2004). Con el fin de explicar los cambios en el estilo estructural de sur a norte se propone una zona de transferencia, como posible mecanismo responsable de la generación de estructuras con vergencia al este. Según Vauchez, et al, (1998) un modelo realista de la litosfera está representado por heterogeneidades mecánicas y anisotropías. De acuerdo a Soto, et al, (2003) el espesor de sedimentos pre tectónicos puede ser variable debido a 1) actividad de fallas normales, 2) presencia de altos de basamento 3) proximidad del área fuente y 4) compactación diferencial junto a cambios

litológicos y reológicos. Los cambios laterales de espesor junto una compresión oblicua controlan el desarrollo de cabalgamientos curvos o segmentados (**Soto,** *et al*, 2003).

Según el modelo las anisotropías de basamento asociadas a fallas normales originadas durante el Triásico-Jurásico a Cretácico temprano, causan variaciones laterales de espesores, como los reportados en la Formación Girón (Figuras 3, 4, 5). En las etapas posteriores de compresión las antiguas fallas normales se caracterizan por sufrir inversión tectónica e involucran una deformación tipo *thick-skinned* con cambios en la vergencia de las fallas y pliegues asociados.

Agradecimientos

El presente trabajo hace parte del Proyecto Modelo Geológico de Campo Escuela Colorado, los autores agradecemos a Campo Escuela Colorado y a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la UIS por el apoyo económico, administrativo y social para llevar a cabo esta y otras investigaciones relacionadas con el proyecto. También agradecemos a la continua colaboración de la escuela de Geología.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martínez, J. (2007). Colombian sedimentary basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos –ANH - Edited and compiled by: ANH and B&M Exploration Ltda. Bogotá.
- Bayona, G, Cardona. A, Jaramillo. C, Mora. A, Montes. C, Caballero. V, Mahecha. H, Lamus-Ochoa. F, Montenegro. O, Jimenez. G, Mesa. A, Valencia. A (2013), Onset of fault reactivation in the Eastern Cordillera of Colombia and proximal Llanos basin; response to Caribbean—South American collision in early Palaeogene time, in Thick-Skin-Dominated Orogens: From Initial Inversion to Full Accretion, edited by M. Nemčok, A. R. Mora, and J. W. Cosgrove, Geol. Soc. London, Spec. Publ., 377, doi:10.1144/ SP377.5.
- Beltrán, A., Quintero, C. (2008). Geología de la Plancha 119, Barrancabermeja. Escala 1: 100.000. Ingeominas. Bogotá.
- **Caballero, V., Parra, M., Mora, A.** (2010). Levantamiento de la Cordillera Oriental de Colombia durante el Eoceno tardío – Oligoceno temprano: proveniencia sedimentaria en el sinclinal de Nuevo Mundo, cuenca Valle Medio del Magdalena. Boletín de Geología Vol. 32, N°1, Enero-Junio de 2010. p 45-77.
- Chajín, P., Mier, R., Palmera, T. Delgado, L., Luna, J. (2013). Reinterpretación del Modelo Estructural del Campo Escuela Colorado, VMM, Colombia. En. XV Congreso Colombiano de Petrólero y Gas. Noviembre 20 al 22-Corferias. Bogotá.
- Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., and Rudkiewicz. J. (1990). Tectonic style and crustal structure

of the Eastern Cordillera (Colombia) from a balanced cross section, in Petroleum and Tectonics in Mobile Belts, edited by J. Letouzey, pp. 81-100, Technip, Paris.

- Cooper, M. A., Addison, F. T., Álvarez, R., Coral, M., Graham,
 R. H., Hayward, S. H., Martínez, J., Naar, J., Peñas, R.,
 Pulham, A. J., Taborda, A. (1995). Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia: American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, no. 10, p. 1421-1443.
- **Córdoba, F., Rolón, L., Buchelli, F., Suarez, M.** (1996). Provincia petrolífera del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL). p. 603-605. Santafé de Bogotá.
- Córdoba, F., López, C., Rolón, L., Buchelli, F., Sotelo, C. (2001). Proyecto evaluación regional del Valle Medio del Magdalena y Cordillera, Ecopetrol, informe interno: Bogotá.
- **Dengo, C. A., Covey, M.C.** (1993). Structure of the Eastern Cordillera of Colombia: implications for trap styles and regional tectonics. American Association of Petroleum Geologists Bulletin **77:** 1315-1337.
- **Etayo-Serna, F.** (1968). El sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas: Geología Colombiana, v. 5, p. 5-74.
- Etayo-Serna, F. y F. Laverde. (1985). Proyecto Cretácico. Publicaciones Especiales del INGEOMINAS, 16: 1-450. Bogotá.
- Fabre, A. (1983). La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario Inferior. Primera parte: Estudio cuantitativo de la subsidencia: Geología Norandina, v. 8, p. 22-27.
- Gomez, E., T. Jordan, R. Almandiger, K. Hegarty, S. Kelly, and M. Heizler (2003), Controls on architecture of the Late Cretaceous to Cenozoic southern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia, Geol. Soc. Am. Bull., 115: 131-147, doi: 10.1130/00167606(2003)115<0131:COAOTL> 2.0.CO;2.
- Ghiglione, Suarez. F, Ambrosio. A, Da Poian. G, Cristallini. E.O, Pizzio M.F y R. M. Reinoso (2009). Structure and evolution of the austral basin fold-thrust belt, Southern Patagonian Andes. Rev. Asoc. Geol. Argent. Vol. 65, n.1, p. 215-226.
- Jiménez, G., Rico, J., Bayona, G., Montes, C., Rosero, A., Sierra, D., 2012. Analysis of curved folds and fault/fold terminations in the souther Upper Magdalena Valley of Colombia. Journal of South American Earth Sciences, 39: 184-201.
- López. O. A y Jaimes. E. L. (2015). Contribución al conocimiento geológico del sector Sureste de la Plancha 120-II-C, Valle Medio del Magdalena. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander
- Mitra, S. (1992). Balanced structural interpretations in fold and thrust belts. En Mitra, S. Y Fisher, G. Structural geology of fold and thrust belt, Baltimore, USA, Johns Hopkins University, p: 53-77.

- **Mojica, J. y Franco, R.** (1990): Estructura y Evolución Tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena.- Geología. Colombiana 17, pp.41-64, 14
- Mora, A., M. Parra, M. R. Strecker, E. R. Sobel, G. Zeilinger, C. Jaramillo, S. Ferreira Da Silva, and M. Blanco (2010), The eastern foothills of the Eastern Cordillera of Colombia: An example of multiple factors controlling structural styles and active tectonics, Geol. Soc. Am. Bull., **122:** 1846-1864, doi:10.1130/B30033.1.
- Morales, L. G. (1958). General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia. In L. G. Weeks ed. A symposium conducted by A.A.P.G.: Habitat of Oil, p. 641-695.
- Moreno, C. J., Horton, B. K., Caballero, V., Mora, A., M., Sierra, J. (2011). Depositional and provenance record of the Paleogene transition from foreland to hinterland basin evolution during Andean orogenesis, northern Middle Magdalena Valley Basin, Colombia. Journal of South American Earth Sciences **32**: 246-263.
- Moustafa, A., 2002. Controls on the geometry of transfer zones in the Suez rift and northwest Red Sea: Implications for the structural geometry of rift system. AAPG Bulletin, Vol. 86, No.6, pp. 979-1002.
- Parra, M., A. Mora, C. López, L. E. Rojas, and B. K. Horton (2012), Detecting early shortening and deformation advance in thrust-belt hinterlands: Example from the Colombian Andes, Geology, 40: 175-178, doi:10.1130/ G32519.1.
- Pérez, G., Valencia, M. (1977). Evaluación geológica del Valle Medio del Magdalena.- Informe 588, Div. Explor. Depto. Geol., Ecopetrol, Bogotá.
- Restrepo Pace, P. A., F. Colmenares, C. Higuera, and M. Mayorga, (2004). A Fold and thrust belt along the western flank of the Eastern Cordillera of Colombia-Style, kinematics, and timing constraints derived from seismic data and detailed surface mapping, in K. R. McClay, ed., Thrust tectonics and hydrocarbon systems: AAPG Memoir 82, p. 598-613.
- Rolón, L., F. (2004). Structural Geometry of the Jura-Cretaceous Rift of the Middle Magdalena Valley Basin-Colombia. Department of Geology and Geography, Morgantown, WV.
- **Royero, J., Clavijo, J.** (2001). Mapa Geológico Generalizado Departamento de Santander. Bogotá: Ingeominas.
- Sarmiento-Rojas, L. F., J. D. Van Wess, and S. Cloetingh (2006), Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models, J. S. Am. Earth Sci., 21: 383-411, doi: 10.1016/j.jsames.2006.07.003.

- Schamel, S., (1991). Middle and Upper Magdalena Basins, Colombia: Chapter 10. M 52: Active Margin Basins, p. 283-301.
- Soto.R, Storti. F, Casas. A.M y C. Faccenna (2003). Influence of along-strike pre-orogenic sedimentary tapering on the internal architecture of experimental thrust wedges. Geological Magazine, 140 (3): 253-264.
- Suppe J. (1983). Geometry and kinematic of fault-bend-folding. en Foster N.H. y Beaumont E.A. (eds.) Structural concepts and techniques I. Basic concepts, folding and structural techniques. AAPG publicación especial Nº 9. P. 422-461.
- Taboada, A., Rivera, L. A., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., Bijwaard, H., Olaya, J., Rivera, C. (2000). Geodynamics of the northern Andes: subductions and intracontinental deformation (Colombia). Tectonics 19: 787-813.
- **Taborda, B.** (1965). The geology of the de Mares Concession in Geological Field Trips, Colombia. 1958 -1978: Colombian Society of Petroleum Geologists and Geophysicists, p. 119-159.
- Thomas, W. A., 1990. Control of locations of transverse zones in Thrust belts. Eclogae Helvetiae **83:** 727-744
- **Thomas. W., A., y Bayona, G.,** 2002. Palinspastic restoration of the Anniston transverse zone in the Appalachian Thrust Belt, Aabama. Journal of structural geology **24:** 797-826.
- Vauchez. A, Tommassi. A y G Barruol. (1998). Rheological heterogeneity, mechanical anisotropy and deformation of the continental lithosphere. Tectonophysics 296: 61-86.
- Ward, D. E., Goldsmith R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., Gómez, E. (1973). Mapa Geológico de Colombia Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. Panchas 109 Rionegro -120 Bucaramanga, Cuadrángulo H-13, Pamplona. Planchas 110 Pamplona - 121 Cerrito. Escala 1: 100.000. Memoria explicativa. Colombia: Colombia Ministerio de Minas y Petróleos, Inst. Nal. Inv. Geológico – Mineras.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., Gómez, E. (1977a). Geología de la Plancha 120, Bucaramanga. Ingeominas. Bogotá.
- Ward, D. E., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz J., Restrepo, H., Gómez E. (1977b). Mapa Geológico del Cuadrángulo H-12, Bucaramanga. Escala 1: Ingeominas.
- Zafra, E. (2013). Cartografía geológica del Campo Colorado a escala 1: 25.000. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

Artículo original

Nuevas evidencias que soportan la escisión de la formación Silgará y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia)

Luis Carlos Mantilla-Figueroa¹, Carlos Alberto García-Ramírez^{1,*}, Víctor A. Valencia²

¹Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia ²School of Environment, Washington State University, Pullman, WA, USA

Resumen

Estudios geocronológicos recientes realizados en la Formación Silgará (nombre original asignado a un grupo de esquistos y filitas aflorantes al SW del Macizo de Santander), han servido de base para proponer la escisión de ésta formación en las siguientes unidades: Esquistos del Silgará *s.s.*, Esquistos del Chicamocha y, Filitas de San Pedro. Estas unidades, se caracterizan por presentar diferentes litologías metamorficas y diferentes edades de depositación de su protolito.

En el contexto de ideas antes referido, el trabajo que aquí se presenta tiene como propósito aportar nuevas evidencias que apoyan la propuesta de escisión antes referida, a partir de análisis isotópicos del Hf en zircones detríticos presentes en cada una de las tres unidades ya referidas, y puntualmente a partir de análisis de geoquímica de roca total. Adicionalmente, con base en la información geológica acumulada, se plantea un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: Colombia, Macizo de Santander, Formación Silgará, zircones detríticos, geoquímica isotópica del Hf.

New evidence supporting the Silgara formation' split-off and proposal of a new stratigraphic framework for the metamorphic basement of the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera)

Abstract

The latest geochronological studies carried out in the Silgara Formation (an original name given to a group of schist and phyllites outcropping southwestern Santander Massif), has provided the basis for proposing this formation's split-off in the following units: Silgara Schist *s.s.*, Chicamocha Schist and San Pedro Phyllites. These units are characterized by its different metamorphic lithologies and by its different protolith deposition' ages.

In the context of the aforementioned ideas, the current work aims to provide new evidences supporting the referred proposal concerning the Silgara Formation' split-off, based on detrital zircons isotopic analysis from the already mentioned new three metamorphic units and on some whole rock geochemistry analysis as well. Likewise, based on the accumulated geological information, a new stratigraphic framework for the Santander Massif' metamorphic basement is here proposed. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Colombia, Santander Massif, Silgara Formation, detrital zircons, Hf isotope geochemistry.

Introducción

La existencia de un adecuado marco estratigráfico es fundamental para develar con mayor precisión la historia geológica de una región y es la base para cualquier trabajo cartográfico-geológico y de correlación. Cuando se trabaja a escala regional con rocas de un basamento metamórfico, por razones propias de escala o debido a la imposibilidad de contar con estudios de mayor detalle, es fácil caer en la tentación de agrupar en una sola unidad a un amplio conjunto de litologías con una historia gelógica muy diferente. Por esta razón, agrupar litologías en una sola unidad, con base en una supuesta afinidad de sus condiciones metamórficas no es una tarea sufiente; también se requiere estudiar más detalladamente sus protolitos, en términos de su composición, proveniencia, contexto tectónico y máxima edad de depositación.

*Correspondencia:

Carlos Alberto García-Ramírez, cgarciar@uis.edu.co Recibido: 5 de noviembre de 2015 Aceptado: 23 de mayo de 2016 En el contexto antes referido, el estudio de los zircones detríticos (por ejemplo: mediante geocronología U-Pb y geoquímica isotópica del Hf) surge como una herramienta predilecta y eficaz, capaz de develar varios aspectos de la historia geológica de los protolitos de las rocas metamórficas. Este tipo de datos, además de contribuir a determinar la edad de las rocas fuentes de sedimentos (fuentes del protolito) y la edad máxima de depositación de éstos, también ayudan a identificar antiguos ciclos de compresión-erosión y extensión-depositación. En lo referente particularmente a los estudios de la composición isotópica del Hf en zircones ígneos detríticos, es importante subrayar que éstos han alcanzado gran relevancia en los últimos años, gracias a que aportan información relacionada con la fuente o la afinidad de sus magmas asociados (por ejemplo: es posible establecer si los zircones fueron formados a partir de magmas generados por fusión parcial del manto empobrecido-depleted mantle-; etc.). La gran utilidad de éste método en análisis de proveniencia de sedimentos y también en estudios paleo-geográficos, entre otros muchos campos, esta ampliamente demostrada (Scherer, et al., 2001; Veevers, et al., 2006; Nebel, et al., 2014; Yang, et al., 2015). Todas estas fortalezas mencionadas para esos métodos, son fundamentales en el momento de definir un adecuado y coherente marco estratigráfico para una región concreta.

En el marco de las ideas anteriormente mencionadas, se desarrolló el presente estudio con base en análisis de geoquímica de isótopos estables de Hf en zircones detríticos (y puntualmente análisis de geoquímica de roca total), con el propósito de aportar nuevas evidencias que apoyen la propuesta de escisón de la Formación Silgará (propuesta formulada en **Mantilla**, *et al.*, 2016), en las siguientes tres unidades metamórficas: (a) Esquistos del Silgará (*s.s.*), (b) Esquistos del Chicamocha (nombre aún transitorio) y; (c) Filitas de San Pedro. Asimismo, en éste estudio se propone un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander, a partir de la información geológica disponible en la literatura especializada.

Antecedentes y contexto geológico

El Sistema Andino de Colombia (SAC), al igual que los Andes de Mérida y Ecuador, hacen parte del denominado Bloque Andino (en términos de **Pennington**, 1981) ó Andes del Norte (en términos de **Gansser, et al.**, 1973 y; **Alemán y Ramos**, 2000). El SAC se considera formado por la acreción de varios terrenos alóctonos, entre los cuales destaca (por su relación con el presente trabajo) el terreno Chibcha, por ser éste donde se localiza el Macizo de Santander (según **Toussaint y Restrepo**, 1976). Sin embargo, estudios recientes realizados por **van der Lilej, et al.**, (2016), señalan que no existen evidencias de la aloctonía del denominado terreno Chibcha, por lo que el debate sobre el tema quedaría abierto. En el sentido de **Cediel, et al.**, (2003), el Macizo de Santander se proyectaría en la Subplaca Maracaibo y parcialmente haría también parte del dominio de la Subplaca Continental Central (estos dos últimos, separadas por la Falla de Bucaramanga-Santa Martha).

Las rocas del basamento metamórfico del Macizo de Santander (MS), se han agrupado en las siguientes unidades litológicas: Gneis de Bucaramanga, Esquistos del Silgará (*s.s.*), Esquistos del Chicamocha (nombre interino o transitorio asignado preliminarmente a los esquistos aflorantes en la franja Pescadero-Aratoca), Ortogneis, y Filitas de San Pedro (**Ward**, *et al.*, 1973; **Clavijo**, 1994; **Royero y Vargas**, 1999; **Royero y Clavijo**, 2001; **Mantilla**, *et al.*, 2016). Todas estas litologías se consideran de edad pre-Devónico Medio, debido a que el registro sedimentario más antiguo del MS contiene fósiles de ésta edad, y es observado cubriendo localmente las unidades metamórficas citadas (**Boinet**, *et al.*, 1985).

Con el propósito de contextualizar mejor la problemática geológica abordada en el marco del presente estudio, a continuación se presenta de manera resumida una descripción muy general de las diferentes unidades que conforman el basamento metamórfico del MS.

Gneis de Bucaramanga

Esta unidad se compone principalmente de gneises pelíticos y máficos, cuarcitas, mármoles, anfibolitas y localmente migmatitas. Las máximas condiciones del metamorfismo alcanzadas por esta unidad, se proyectan en la facies anfibolita alta (zona de la sillimanita). Los estudios geocronológicos realizados en litologías paragneisicas de ésta unidad, han permitido establecer que su protolito tiene una máxima edad de depositación del Meso-Proterozoico (edad de depositación entre ~1200-1300 Ma; según edades U-Pb en zircones detríticos), y ha sido afectada por eventos metamórficos que guardan relación temporal con los reportados para el cinturón orogénico Grenvilliano que afectó al margen Este de Laurentia a finales del Meso-Proterozoico y comienzos del Neo-Proterozoico (entre ~1100 y ~980 Ma; **Cordani,** *et al.*, 2005).

Esquistos de Silgara (s.s.)

Esta unidad se compone principalmente de rocas metacuarzofeldespáticas (metaarensicas, cuarcitas, metagrauvacas) y metapelíticas (esquistos micáceos y filitas cloriticas), según ha sido documentada en **Ward**, *et al.* (1973) para su localidad tipo, localizada en la quebrada homónima (franja metamórfica Matanza-Cachirí). La máxima edad de depositación de ésta unidad (definida con base en muestras colectadas en inmediaciones a la localidad tipo), se considera de ~900 Ma (Neo-Proterozoico Temprano; según **Mantilla**, *et al.*, 2016). La edad del evento metamórfico principal que afectó a estas litologías (facies esquistos verdes, zona del granate), posiblemente se relacione con el evento Quetame-Caparonensis (según **Restrepo-Pace y Cediel**, 2010), también denominado Evento Orogénico Fammatiniano Principal (Mantilla, *et al.*, 2016), el cual tuvo lugar durante el Ordovício Temprano (~480-470 Ma; según van der Lilej, *et al.*, 2016). Sin embargo, no se descarta que ésta unidad haya sufrido otros eventos de metamorfismo de más bajo grado, anteriores al Evento Orogénico Fammatiniano Principal.

Esquistos de Chicamocha

La unidad Esquistos del Chicamocha es un nombre tentativo dado a una sucesión de rocas metacuarzofeldespáticas (cuarcitas), metapeíticas (esquistos micaceos con granate, estaurolita, cianita/andalusita y sillimanita) y metabasitas, aflorantes en el cañón del río homónimo (por la vía que comunica los Municipios de Piedecuesta y Aratoca). Las litologías y las edades de los zircones detríticos de ésta unidad son muy diferentes a las reportadas para la unidad Esquistos del Silgará (*s.s.*), llegando su protolito a tener una máxima edad de depositación del Cámbrico Medio (~500 Ma; **Mantilla, et al.,** 2016). El máximo pico de metamorfismo de éstas litologías (en facies anfibolita, zona de la sillimanita; según **Ríos, et al.,** 2013), se considera, como en el caso anterior, relacionado temporalmente con el Evento Orogénico Famatiniano principal.

Ortogneis

Esta unidad se compone principalmente de gneises cuarzofeldespáticos, localmente hornbléndicos; y algunos cuerpos lenticulares de anfibolitas. Estas litologías de origen fundamentalmente ígneo, se consideran que fueron emplazadas de manera sincrónica (sin-tectónica) con el desarrollo del metamorfismo que tuvo lugar durante el evento orogénico Fammatiniano Principal (hace 480-472 Ma, según **Restrepo-Pace y Cediel**, 2010; **Mantilla**, *et al.*, 2012; **Van der Lilej**, 2013).

Filitas de San Pedro

Las Filitas del San Pedro se consideraban antes como parte constituyente de la Formación Silgará ó unidad Esquistos del Silgará *s.l.* (Mantilla, *et al.*, 2016). La unidad Filitas de San Pedro es la unidad metamórfica más joven reconocida en el Macizo de Santander. La máxima edad de depositación de su protolito se considera en edad del Ordovícico Tardío (según edades U-Pb de los zircones detríticos más jóvenes presentes en sus litologías siliciclásticas » 450 Ma). La edad del evento de metamorfismo que afectó a esta unidad no ha sido aún determinado por métodos geocronológicos, pero se considera que esta relacionada temporalmente con el Evento Orogénico Fammatiniano Menor, el cual tivo lugar a finales del Ordovício Tardío (~450 Ma; en Mantilla, *et al.*, 2016).

Métodos analíticos

Con el propósito de identificar posibles nuevas diferencias (ó similitudes), en términos de edades y composiciones isotópicas iniciales del Hf en zircones detríticos, entre las unidades escindidas de la Formación Silgará (Esquistos del Silgará *s.s.*; Esquistos del Chicamocha y; Filitas de San Pedro, según **Mantilla**, *et al.*, 2016), se colectaron muestras de roca en las franjas Matanza-Cachirí (donde aflora la localidad tipo de la Formación Silgará; hoy denominda Esquistos del Silgará *s.s.*) y Piedecuesta-Aratoca (donde afloran las unidades Esquistos del Chicamocha y; Filitas de San Pedro).

Las extracción de zircones de las muestras colectadas (ver **Tabla 1**) se realizó utilizando los métodos tradicionales (resumidos en **Mantilla**, *et al.*, 2013) en el laboratorio ZirChron LLC (Tucson, AZ), y sus dataciones U-Pb fueron realizadas en el laboratorio de geoquímica isotópica de la

Tabla 1. Localización de las muestras del basamento metamórfico del Macizo de Santander, colectadas para el presente estudio.

Unidad estratigráfica/	Coorde	nadas*	Coor	denadas loca	ales **	Localización	Tipo de	Tipo de	
Muestra/Facies de Metamorfismo	Latitud Longitud X Y Z		Z (msnm)	Geográfica	roca	Análisis			
Unidad Esquistos del Silgará s.s. PS-7-1 (Facies Esquistos Verdes; zona de la clorita)	7°18'05.00''	73°03'00"	1.299.288	1.113.461	~ 1944	Vía Matanza-Santa Cruz-Rionegro	Cuarcita	U-Pb; Hf; GRT*	
Unidad Esquistos del Chicamocha PS-4-1 y PS-4-2 (Facies Anfibolita; zona de la estaurolita)	6°47'48.0''	73°00'47.1"	1.243.469	1.117.667	~887	Vía Bucaramanga- Aratoca (Cañón del Chicamocha)	Cuarcita Esquisto Pelíticos	U-Pb; Hf; GRT GRT	
Unidad Esquistos del Chicamocha PS-3-1 (Facies Esquistos verdes; zona de la biotita)	6°41'53.44"	73°.0'50.43''	1.232.575	1.117.594	~1767	Vía Bucaramanga- Aratoca	Esquisto Pelítico	GRT	
Unidad Filitas de San Pedro PS-1-1 (Facies sub- esquistos verdes)	6°43'20.1''	73°01'07.0"	1.235.238	1.117.074	~1770	Vía Bucaramanga- Aratoca (Sector Mesa de San Pedro)	Meta- arenisca	U-Pb; Hf; GRT	

* Coordenadas Datum WGS84 (EPSG 4326)

** Coordenadas Planas con Datum Bogotá (Bogotá 1975 / Colombia Bogotá zone (21897)

GRT*: Análisis de Geoquímica de roca total

Universidad Estatal de Washington (WSU, USA), utilizando la técnica LA-ICP-MS (*Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*). Estas dataciones se realizaron siguiendo los procedimientos analíticos descritos por **Chang**, *et al.* (2006) y sus resultados analíticos se presentan en **Mantilla**, *et al.*, (2016).

Los análisis isotópicos del Hf en los granos de zircones (objeto central del presente estudio), fueron realizados en la WSU (USA), usando un equipo tipo ThermoFinniganTM Neptune MC-ICP-MS. La ablación se realizó aproximadamente durante 30 segundos, para de esta manera evitar una profundización significativa del hueco realizado mediante la ablación (generalmente <30 pm de profundidad). Un detalle mayor sobre los equipos y los procedimientos seguidos durante estos análisis, se relacionan en **Vervoort**, *et al.*, (2004). Como es evidente, los granos de zircones analizados mediante geoquímica isotópica del Hf, previamente habían sido datados, tal como se indicó en el párrafo anterior.

Algunos análisis geoquímicos en roca total de muestras colectadas en cada una de las tres unidades ya referidas, también fueron llevados a cabo, con el propósito de explorar e identificar algunas diferencias preliminares entre las tres unidades antes referidas, desde el punto de vista de su composición geoquímica. Estos análisis, se realizaron en los laboratorios *Acme Analytical Laboratories Ltd.*, siguiendo las especificaciones ofrecidas en los paquetes analíticos con códigos 4AB1 (*Whole Rock Analysis of Majors and Trace Elements*). Las especificaciones de los procedimientos analíticos empleados, se documenta en la siguiente página web del mencionado laboratorio (http://acmelab.com/pdfs/Acme_Price_Brochure.pdf).

Resultados

Generalidades de las muestras analizadas

Las muestras de rocas metamórficas seleccionadas (según unidad estratigráfica) para el presente estudio, se relacionan a continuación.

(a) Esquistos del Silgará s.s.: muestra PS-7-1 (cuarcita), colectada a lo largo de la carreteable que comunica los municipios de Matanza y Rionegro (Franja Matanza-Cachirí); (b) Esquistos del Chicamocha: muestras PS-4-1 (cuarcita), PS-4-2 y PS-3-1 (esquistos pelíticos) y; (c) Filitas de San Pedro: muestra PS-1-1 (meta-arenisca). Las dos últimas muestras fueron colectadas a lo largo de la carretera que comunica la ciudad de Bucaramanga con Aratoca, donde afloran las rocas de la denominada franja metamórfica Aratoca-Pescadero (ver datos de localización en Tabla 1 y Figura 1).

En la franja de rocas Maranza-Cachirí (donde aflora la unidad Esquistos del Silgará *s.s.*, y donde se colectó la muestra PS-7-1), se observa una alternancia de rocas metasiliciclásticas, principalmente cuarcitas y metareniscas, y rocas metapelíticas aproximadamente en igual proporción. Estas

litologías son foliadas y finamente laminadas con bandas milimétricas. La foliación presenta una tendencia norte-sur, viéndose alterada por replegamientos. Mineralógicamente las rocas de esta franja constan de cuarzo, muscovita, clorita, biotita, granate, grafito, plagioclasa, feldespato potásico, y opacos como minerales principales. Como accesorios aparecen epidota, zircón, titanita y apatito. Las paragénesis reportadas en éstas rocas apuntan a que el metamorfismo de estas litologías alcanzaron condiciones de facies esquistos verdes (parte baja de la zona del granate, según **Villamizar y Rueda**, 2014).

En la franja de rocas Pescadero-Aratoca (donde aflora la unidad Esquistos del Chicamocha, y donde se colectaron las muestras PS-4-1, PS-4-2 y PS-3-1), se observan metapelitas, metapsamitas y metabasitas (esquistos anfibólicos y anfibolitas). Estos últimos, se presentan a manera de cuerpos intermitentes, intercalados hacia la parte media de la unidad con esquistos peliticos. La muestra de cuarcita muestreada (materiales metapsamíticos), presenta mayoritariamente cuarzo, plagioclasa, microclina, cantidades variables y subordinadas de muscovita, biotita y granate como minerales principales. Los minerales menores son grafito, ilmenita, magnetita. Accesorios comunes son zircón, apatito, turmalina y rutilo. Las paragénesis reportadas en éstas rocas (García y Ríos, 1999; Ríos, et al, 2003; García y Ríos, 2004), apuntan a que el metamorfismo de estas litologías alcanzó condiciones de facies esquistos verdes, transición epidota - anfibolita y anfibolita (zona estaurolita-cianita).

En la misma franja de rocas antes referida (donde también aflora la unidad Filitas de San Pedro, y donde se colectó la muestra PS-1-1), se observa una sucesión de filitas cloríticas con foliación continua y fina, intercaladas con metaareniscas y meta-limolitas con débil foliación espaciada. Las meta-areniscas estudiadas, constan de cuarzo, muscovita, clorita, plagioclasa y feldespato potásico como minerales principales. La textura predominante es lepidogranoblástica. Otros minerales presentes son opacos, zircón, apatito. Las paragénesis reportadas en éstas rocas apuntan a condiciones de facies sub-esquistos verdes (**Ríos,** *et al*, 2003; **García y Ríos**, 2004).

Datos de Geoquímica de Roca Total (GRT)

Cuatro (4) muestras de rocas metamórficas fueron colectadas y analizadas mediante GRT (**Tabla 2**), tal como ya se mencionó anteriormente.

Los estudios geoquímicos de todas las cuatro muestras analizadas (PS-1-1, PS-3-1, PS-4-2, PS-7-1), pertenecientes a las tres unidades escindidas de la Formación Silgará, muestran diferencias que podrían ser explicadas por el origen del protolito. El contenido de SiO₂ marca buena diferencia entre los esquistos pelíticos (PS-3-1 y PS-4-2; Unidad Esquistos del Chicamocha) y la metaarensica y cuarcita de las restantes dos unidades (PS-1-2 y PS-7-1). En las primeras



Figura 1. Esquema geológico del Macizo de Santander (Cordillera Oriental de Colombia), en el cual se resaltan las áreas muestreadas para análisis de isótopos de Hf en zircones detríticos en cuarcitas, y para estudios de geoquímica de roca total. Modificado de Goldsmith *et al.*, (1971). El recuadro 1 se proyecta en la franja de rocas metamórficas Matanza-Cachirí, y el recuadro 2 en la franja Pescadero-Aratoca.

éste varia de 59.64 a 64.7% en peso, mientras que en las ultimas es 70.49 a 76.92% en peso. Como es de esperarse, el Al_2O_3 es más alto en las metapelitas (esquistos): 18.62-19.7% en peso, en comparación con las metaarensicas: 11.17 - 13.69%. El contenido de MgO y CaO es bajo, variando entre 0.62-2.41 y 0.03-1.11% en peso. La relación K_2O/Na_2O es baja para todas las rocas 1-2.45, excepto la muestra PS-3-1 que es de 8.63, lo cual se evidencia mediante el alto contenido de muscovita y biotita en esta roca.

En lo referente al patrón de los Elementos de Tierras Raras (*REE: Rare Earth Elements*; diagramas no incluidos), normalizados al Manto Primitivo (según datos reportados en **Taylor y McLennan**, 1995), estos muestran ser prácticamente similares, con enriquecimiento de las LREE (*Light Rare Earth Elements*) y empobrecimiento progresivo de las

324

HREE (*Heavy Rare Earth Elements*). En todas las muestras es característica la anomalía negativa en Eu, siendo la relación Eu/Eu* de 0.17 para la muestra PS-1-1; 0.81 en la muestra PS-3-1; 0.59 en la muestra PS-4-2 y 0.68 en la muestra PS-7-1.

Se graficaron los contenidos de elementos traza y algunas ETR, usando el diagrama araña (también referido en la bibliografía como aracnigrama) con los contenidos normalizados a la composición media de la corteza (**Weaver y Tarney**, 1984). De acuerdo con esta normalización (ver Figura 2), se observa que los patrones de distribución y contenidos son muy similares en las muestras PS-4-2 y PS-7-1. La muestra PS-1-1 (Filitas de San Pedro) evidencia presencia de minerales o material ligeramente más máficos, en comparación con las muestras PS-4-2 y PS-7-1.

Muestra	PS-1-1	PS-3-1	PS-4-2	PS-7-1
Unidad	Filitas de San Perdo	Esquistos Chicamocha	Esquistos Chicamocha	Esquistos del Silgará
SiO ₂	76,92	64,7	59,64	70,49
TiO ₂	0,39	0,9	0,85	0,71
Al ₂ O ₃	11,17	18,62	19,17	13,69
Fe ₂ O ₃	3,98	5,38	3,21	2,61
FeO	1,66	0,94	5,2	2,64
MnO	0,02	< 0.01	0,22	0,11
MgO	0,71	0,62	2,41	1,39
CaO	0,13	0,03	0,67	1,11
Na ₂ O	1,57	0,56	1,52	2,51
K ₂ O	1,92	4,4	3,73	2,51
P_2O_5	0,07	0,16	0,12	0,13
LOI	1,2	3,3	3	1,9
Cr ₂ O ₃	0,006	0,009	0,015	0,008
Total	99,746	99,619	99,755	99,808
Мо	0,7	0,6	0,5	0,6
Ni	23	24	57	<20
Ni	27,9	21,3	54,5	17
Zn	92	67	109	85
Cu	7	22	42,5	25,8
As	<0.5	<0.5	16,3	<0.5
Cd	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sb	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Bi	<0.1	0,2	0,3	<0.1
Ag	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Au	0,5	<0.5	<0.5	<0.5
Hg	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
TI	< 0.1	<0.1	0,1	0,1
Se	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Ga	12,7	24,2	24,8	17,1
Sc	6	14	19	11
\mathbf{V}	53	106	125	63
W	0,9	2,2	3,1	0,8
Со	10,6	6,1	28,9	8,8
Cs	3	5,1	2,5	1,3
Ba	1004	1733	434	493
Be	<1	2	<1	1
Rb	68,1	144,5	116,7	83,9
Sn	<1	2	5	2
Th	7,7	12,7	14,4	14,9
Nb	7,9	16,5	15,8	14,4
Та	0.6	1.3	1	0.0

Tabla 2. Composición química de las rocas estudiadas.

Muestra	PS-1-1	PS-3-1	PS-4-2	PS-7-1
Unidad	Filitas de San Perdo	Esquistos Chicamocha	Esquistos Chicamocha	Esquistos del Silgará
Sr	48,3	183,4	92,4	134,5
Zr	165,7	273,1	158,2	364,6
Hf	4,2	7,4	4,3	10,5
Y	20,4	39,9	41,9	35,5
Pb	1,8	1,4	5,5	8,3
U	1,5	3,1	2,4	2,9
La	21,4	200,3	44,1	44,2
Ce	44,3	120,7	83,9	90,1
Pr	5,35	44,9	10,58	10,42
Nd	20,6	159,1	39,6	39,4
Sm	3,97	26,14	8,41	7,64
Eu	1,07	5,59	1,64	1,65
Gd	4,27	16,99	8,53	7,16
Тb	0,64	2,24	1,37	1,05
Dy	4,2	11,73	7,42	6,31
Но	0,8	1,59	1,49	1,29
Er	2,09	3,8	4,11	3,81
Tm	0,3	0,57	0,62	0,53
Yb	2,32	3,55	3,94	3,69
Lu	0,32	0,47	0,62	0,52



Figura 2. Diagrama Araña para las muestras estudiadas. Contenidos normalizados al promedio de la corteza de Weaver and Tarney (1984).

El enriquecimiento en ETR (La, Nd, Sm, Yb) en el esquisto biotitico analizado de de la unidad Esquistos del Chicamocha (muestra PS-3-1), podría explicarse a partir de la presencia de esfena y monazita. Los contenidos de los elementos menos móviles indican una procedencia de los sedimentos con fuerte aporte por erosión de una corteza continental bastante diferenciada. No obstante, la distribución de los diagramas araña relacionados en la Figura 2, distribuidos entorno a 1 (normalización respecto a la corteza terrestre), permiten señalar claramente que la fuente de éstos sedimentos proceden de la erosión de una corteza continental, cuya composición promedio es andesítica.

Aunque se requiere de una mayor densidad de muestreo, es posible resaltar en términos generales, que las rocas metamorficas agrupadas dentro de las Filitas de San Pedro (por ejemplo: muestra PS-1-1), indican algunos ligeros aportes de una fuente máfica (de una corteza comparativamente menos diferenciada). Por otro lado, la muestra PS-4-1 (Esquistos del Chicamocha), sugiere que su protolito deriva de una corteza continental bastante diferenciada, en comparación con la muestra PS-7-1 (Esquistos del Silagrá *s.s.*).

Datos isotópicos Lu-Hf en zircones detríticos

Un total de veinticinco (25) granos de zircones fueron seleccionados para el análisis de la composición isotópica del Hf, del total de las tres muestras colectadas: PS-7-1 (cuarcita de los Esquistos del Silgará), PS-4-1 (cuarcita de los Esquistos del Chicacmocha) y; PS-1-1 (metaarensica de la Filitas de San Pedro).

El número de granos seleccionados fue relativamente bajo, debido a que se intentó seleccionar aquellos cristales de zircones con los tamaños más adecuados, de tal manera que se pudiera realizar el punto de análisis isotópico para Hf, en proximidad (y en la misma zona) al punto de análisis hecho previamente para U-Pb. Los datos derivados de los análisis isotópicos de Lu-Hf, se resumen en la Tabla 3, y las graficas en las cuales estos datos fueron proyectados, se presentan en la Figura 3.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las unidades referidas.

Unidad Esquistos del Silgará s.s.

En la muestra PS-7-1 (cuarcita) de ésta unidad, se seleccionaron ocho (8) granos de zircones detríticos, y éstas fueron sus edades U-Pb obtenidas previamente (de más antigua a más joven): 1672 \pm 21,8 Ma, 1476 \pm 19,3 Ma, 1414 \pm 18,7 Ma, 1289 \pm 16,9 Ma, 1000 \pm 13,1 Ma, 975 \pm 12,8 Ma, 965 \pm 13,1 Ma y 881 \pm 22,5 Ma (ver Tabla 3; mayor detalle de dataciones en **Mantilla**, *et al.*, 2016). Las edades U-Pb aquí referidas, se proyectan en la concordia (**Mantilla**, *et al.*, 2016), lo que permite establecer que no presentan pérdidas de Pb (evidencia que el sistema ha permanecido cerrado desde su cristalización).

Tabla 3. Resultados analíticos Lu/Hf a partir de zircones detríticos presentes en muestras de metaareniscas y cuarcitas y sus respectivos valores epsilón (ɛHft). Macizo de Santander, Cordillera Oriental de Colombia.

Muestra PS-1-1. Metaarenisca de la unidad Filitas de San Pedro.																	
Duración (s)	Muestra	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁸ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁸⁰ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	Total HfBeam	Edad	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	eHf ₀	2SE	eHf _i
49,051	PS 1_1_1	0,281992	0,000032	0,00066	0,00002	0,01897	0,00050	1,467168	0,000036	1,886900	0,000130	20,86	1288	0,281976	-28,0	1,1	0,3
66,529	PS 1_1_2	0,282169	0,000026	0,00043	0,00000	0,01159	0,00014	1,467203	0,000030	1,886897	0,000090	18,37	993	0,282161	-21,8	0,9	0,2
71,603	PS 1_1_3	0,282187	0,000025	0,00042	0,00000	0,01204	0,00015	1,467176	0,000035	1,886862	0,000074	17,57	967	0,282179	-21,1	0,9	0,2
72,731	PS 1_1_4	0,282165	0,000028	0,00034	0,00001	0,00906	0,00019	1,467156	0,000032	1,886910	0,000100	21,14	1012	0,282159	-21,9	1,0	0,5
69,348	PS 1_1_5	0,282451	0,000025	0,00055	0,00002	0,01275	0,00057	1,467169	0,000037	1,886806	0,000087	20,08	482	0,282446	-11,8	0,9	-1,3
69,348	PS 1_1_6	0,282143	0,000023	0,00045	0,00001	0,01226	0,00026	1,467158	0,000026	1,886879	0,000074	21,31	999	0,282134	-22,7	0,8	-0,6
66,529	PS 1_1_7	0,282164	0,000036	0,00057	0,00002	0,01625	0,00039	1,467151	0,000034	1,886960	0,000120	18,49	967	0,282154	-22,0	1,3	-0,7
68,784	PS 1_1_8	0,282411	0,000021	0,00036	0,00000	0,00986	0,00010	1,467183	0,000030	1,886908	0,000077	16,6	460	0,282408	-13,2	0,7	-3,1
Muestra	PS-4-1. (Cuarcitas d	le la unida	d Esquist	os del C	hicamocha	a.										
Duración (s)	Muestra	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁸ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁸⁰ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	Total HfBeam	Edad	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	eHf ₀	2SE	е Нf i
47,413	PS 4-1_1	0,281465	0,000043	0,00052	0,00002	0,01333	0,00047	1,467086	0,000038	1,886980	0,000160	17,28	1867,3	0,281447	-46,7	1,5	-5,2
62,799	PS 4-1_2	0,282326	0,000038	0,00070	0,00003	0,01885	0,00081	1,467137	0,000042	1,887030	0,000140	14,03	560,0	0,282319	-16,2	1,3	-4,0
56,205	PS 4-1_3	0,282136	0,000052	0,00110	0,00004	0,03238	0,00094	1,467154	0,000042	1,887140	0,000190	18,4	812,1	0,282119	-23,0	1,8	-5,4
65,625	PS 4-1_4	0,281910	0,000043	0,00067	0,00003	0,01905	0,00093	1,467161	0,000035	1,886860	0,000130	19,21	1141,1	0,281896	-30,9	1,5	-5,9
46,785	PS 4-1_5	0,282182	0,000041	0,00075	0,00002	0,02314	0,00047	1,467174	0,000036	1,886940	0,000150	16,65	1045,6	0,282167	-21,3	1,5	1,6
36,109	PS 4-1_7	0,281496	0,000058	0,00065	0,00001	0,01571	0,00016	1,467118	0,000049	1,886890	0,000190	18,35	1322,0	0,281480	-45,6	2,1	-16,5
47,413	PS 4-1_8	0,282023	0,000048	0,00089	0,00000	0,02394	0,00016	1,467194	0,000030	1,886790	0,000180	22,61	615,3	0,282013	-26,9	1,7	-13,6
44,273	PS 4-1_9	0,282033	0,000063	0,00054	0,00006	0,01470	0,00170	1,467135	0,000046	1,887050	0,000230	18	1534,5	0,282017	-26,6	2,2	7,4
35,481	PS 4-1_10	0,280849	0,000095	0,00081	0,00003	0,02138	0,00048	1,467055	0,000077	1,887040	0,000320	14,6	2402,2	0,280812	-68,5	3,4	-15,4
Muestra	PS-7-1. C	uarcitas de	e la unidad	1 Esquisto	s del Sil	gará (s.s).											
Duración (s)	Muestra	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁷⁸ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	¹⁸⁰ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	Total HfBeam	Edad	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf _i	eHf ₀	2SE	eHf _i
67,509	PS 7_1_1	0,282007	0,000032	0,00079	0,00002	0,02251	0,00065	1,467151	0,000025	1,886940	0,000110	25	1289	0,281988	-27,5	1,1	0,8
68,451	PS 7_1_2	0,282130	0,000030	0,00066	0,00002	0,01876	0,00058	1,467122	0,000030	1,886872	0,000096	21,3	965	0,282118	-23,2	1,1	-2,0
67,195	PS 7_1_3	0,282126	0,000034	0,00036	0,00001	0,01046	0,00028	1,467172	0,000028	1,886830	0,000120	22,09	881	0,282120	-23,3	1,2	-3,8
66,881	PS 7_1_4	0,282127	0,000035	0,00052	0,00002	0,01411	0,00051	1,467180	0,000033	1,886850	0,000130	23,6	1000	0,282117	-23,3	1,2	-1,2
65,311	PS 7_1_5	0,282083	0,000031	0,00034	0,00003	0,00922	0,00083	1,467156	0,000036	1,886901	0,000099	20,67	975	0,282077	-24,8	1,1	-3,2
59,2	PS 7_1_6	0,281863	0,000040	0,00069	0,00003	0,01710	0,00110	1,467168	0,000029	1,886930	0,000130	25,4	1476	0,281844	-32,6	1,4	-0,1
67,093	PS 7_1_7	0,282019	0,000037	0,00121	0,00005	0,03350	0,00140	1,467156	0,000032	1,886920	0,000120	20,95	1672	0,281981	-27,1	1,3	9,3
65,402	PS 7_1_8	0,282191	0,000036	0,00054	0,00001	0,01548	0,00021	1,467156	0,000037	1,886900	0,000130	17,2	1414	0,282177	-21,0	1,3	10,3


Figura 3. Valores Épsilon Hf inicial (eHf_(inicial)) obtenidos a partir de zircones detríticos presentes en las unidades metamórficas del Macizo de Santander (La muestra PS-7-1 fue colectada en la Franja Matanza-Cachirí; y las muestras PS-4-1 y PS-1-1 en la franja Pescadero-Aratoca). Las líneas de evolución de la composición isotópica del Hf para las cortezas de las edades referidas se apoyan en datos resumidos en Turkina *et al.*, 2014

Los valores de las relaciones ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf en cada uno de los granos de zircones antes referidos (respecto a su correspondiente edad U-Pb), son los siguientes: 0,00121 (~1672Ma); 0,00069 (~1476 Ma); 0,00054 (~1414 Ma); 0,00079 (~1289 Ma); 0,00052 (~1000 Ma); 0,00034 (~975 Ma); 0,00066 (~965 Ma) y; 0,00036 (~881 Ma). Los correspondientes valores iniciales de ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf son respectivamente los siguientes: 0,281981 (~1672Ma); 0,281844 (~1476 Ma); 0,282177 (~1414 Ma); 0,281988 (~1289 Ma); 0,282117 (~1000 Ma); 0,282077 (~975 Ma); 0,282118 (~965 Ma) y; 0,282120 (~881 Ma). En este contexto, los valores eHf iniciales calculados para cada una de las edades de los zircones detríticos analizados, arrojaron valores tanto negativos, como positivos. Estos valores son los siguientes: $eHf_{1672 Ma} = +9.3$; $eHf_{1476 Ma} = -0.1$, $eHf_{1414 Ma} = +10.3$, $eHf_{1289 Ma} = -3.8$ (ver Tabla 3).

Unidad Esquistos del Chicamocha

En la muestra PS-4-1 (cuarcita) de ésta unidad, se seleccionaron nueve (9) granos de zircones detríticos, y éstas fueron sus edades U-Pb obtenidas previamente (de más antigua a más joven): $2402,2\pm10,7$ Ma; $1867,3\pm10,5$ Ma; $1534,5\pm11,1$ Ma; $1322\pm16,1$ Ma; $1141,1\pm12,5$ Ma; $1045,6\pm14,2$ Ma; $812,1\pm10$ Ma; $615,3\pm6,6$ Ma y; $560\pm6,6$ Ma (ver Tabla 3; mayor detalle de las dataciones en **Mantilla**, *et al.*, 2016). Las edades U-Pb aquí referidas, se proyectaron en la concordia, es decir, se concluye que estos no presentan pérdidas de Pb (**Mantilla**, *et al.*, 2016).

Los valores de las relaciones ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf en cada uno de los granos de zircones antes referidos (respecto a su correspondiente edad U-Pb), son los siguientes: 0,00081

(~2402,2 Ma); 0,00052 (~1867,3 Ma); 0,00054 (~1534,5 Ma); 0,00065 (~1322 Ma); 0,00067 (~1141,1 Ma); 0,00075 (~1045,6 Ma); 0,00110 (~812,1 Ma); 0,00089 (~615,3 Ma) y; 0,00070 (~560 Ma). Los correspondientes valores iniciales de ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf son respectivamente los siguientes: 0,280812 (~2402,2 Ma); 0,281447 (~1867,3 Ma); 0,282017 (~1534,5 Ma); 0,281480 (~1322 Ma); 0,281896 (~1141,1 Ma); 0,282167 (~1045,6 Ma); 0,282119 (~812,1 Ma); 0,282013 (~615,3 Ma) y; 0,282319 (~560 Ma). Los valores eHf iniciales calculados para cada una de las edades de los zircones detríticos analizados, arrojaron valores tanto negativos, como positivos. Estos valores son los siguientes: $eHf_{2402,2 Ma} =+15,4$; $eHf_{1867,3 Ma} =-5,2$; $eHf_{1534,5 Ma} =+7,4$; $eHf_{1322 Ma} =+16,5$; $eHf_{1141,1 Ma} =-5,9$; $eHf_{1045,6 Ma} =+1,6$; $eHf_{812,1 Ma} =-5,4$; $eHf_{615,3 Ma} =+13,6$; $eHf_{560 Ma} =-4,0$ (ver Tabla 3).

Unidad Filitas de San Pedro

En la muestra PS-1-1 (metaarensica) de ésta unidad, se seleccionaron ocho (8) granos de zircones detríticos, los cuales presentan las siguientes edades (de más antigua a más joven): 1288,5±9,6 Ma, 1012,3±13,4 Ma, 999,4±14,6 Ma, 993,1±14,25 Ma, dos granos con edades de 966,5±20,6 Ma, 481,5±6,5 Ma y, 457?±6,9 Ma (ver Tabla 3; mayor detalle de las dataciones en **Mantilla**, *et al.*, 2016). Las edades U-Pb aquí referidas, al igual que en los anteriores casos, se proyectan en la concordia (**Mantilla**, *et al.*, 2016).

Los valores de las relaciones 176Lu/177Hf en cada uno de los granos de zircones antes referidos (respecto a su correspondiente edad U-Pb), son los siguientes: 0,00066 (~1288 Ma), 0,00034 (~1012 Ma), 0,00045 (~999 Ma), 0,00043 (~993 Ma), 0,00042 (~967 Ma), 0,00057 (~967 Ma), 0,00055 (~482 Ma) y, 0,00036 (~460 Ma). Los correspondientes valores iniciales de 176Hf/177Hf son respectivamente los siguientes: 0,281976 (~1288 Ma), 0,282159 (~1012 Ma), 0,282134 (~999 Ma), 0,282161 (~993 Ma), 0,282179 (~967 Ma), 0,282154 (~967 Ma), 0,282446 (~482 Ma) v, 0,282408 (~460 Ma). Los valores εHf iniciales calculados para cada una de las edades de los zircones detríticos analizados, arrojaron valores tanto negativos, como positivos. Estos valores son los siguientes: $\begin{array}{l} \text{eHf}_{1288 \text{ Ma}} = +0,3; \quad \text{eHf}_{1012 \text{ Ma}} = +0,5; \quad \text{eHf}_{999 \text{ Ma}} = -0,6; \quad \text{eHf}_{993} \\ \text{Ma} = +0,2; \quad \text{eHf}_{967 \text{ Ma}} = +0,2; \quad \text{eHf}_{967 \text{ Ma}} = -0,7; \quad \text{eHf}_{482 \text{ Ma}} = -1,3; \quad \text{eHf}_{460} \\ \end{array}$ _{Ma}=-3,1 (ver Tabla 3).

Consideraciones previas y significado de los valores isotópicos del Lu-Hf

Los zircones son minerales adecuados para estudios de isótopos de Hf en rocas antiguas. Estos tienen alta concentraciones de Hf, bajas relaciones Lu/Hf, y pueden ser datados de manera precisa mediante técnicas U-Pb. Esos datos son importantes, dado que ayudan a determinar si el mineral se ha mantenido como un sistema abierto o cerrado. Por otro lado, el zircón es un mineral muy resistente, lo que le da la particularidad de sobrevivir a la erosión o el metamorfismo, los cuales pueden destruir o modificar las

rocas que lo hospedan. Por esta razón, los zircones han sido usados exitosamente en muchos estudios de isótopos de Hf (Amelin, *et al.*, 1999; Andres, *et al.*, 2004; Siebel y van den Haute, 2007; Restrepo-Moreno, 2009; Hoang, *et al.*, 2009; Zeh, *et al.*, 2009; Arvizu y Iriondo, 2011; Zeh, *et al.*, 2013; Turkina, *et al.*, 2014).

El valor de la notación épsilon Hf inicial (eHf_i) , se determina mediante la siguiente relación:

 $eHf_{(t)} = ({}^{176}Hf/{}^{177}Hf_{muestra(t)}/{}^{176}Hf/{}^{177}Hf_{CHUR(t)} - 1) x 10^4 (Scherer, et al., 2001),$

donde (t) es la edad geológica de la muestra y, ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf_{CRUR(t)} es la composición isotópica del CHUR (*Chondritic Uniform Reservoir*) en un tiempo *t*. El CHUR se asume como el material primitivo del sistema solar en su etapa temprana (**Blichert-Toft y Albarède**, 1997; **Machado y Simonetti**, 2001; **Scherer**, *et al.*, 2001; **Albarède**, *et al.*, 2006; **Bouvier**, *et al.*, 2008). Según **Blichert-Toft y Albarède** (1997) y **Machado y Simonetti** (2001), la variación temporal en la relación ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf_{CHUR(t)} a través del tiempo geológico, esta definida por el valor ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf= 0.0332 ±2; y un valor presente ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.282772±29 (valor inicial para el material del sistema solar a los 4.56 Ga de ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf = 0.279742±29).

Debido a las particularidades antes referidas, la sistemática Lu-Hf en zircones es una herramienta de gran utilidad para entender el desarrollo de la diferenciación Manto/Corteza. Según Siebel v van den Haute (2007), los zircones con valores Epsilo Hf(t) positivos indican que estos fueron cristalizados a partir de magmas de afinidad juvenil (por ejemplo: magmas silicatados originados en el manto empobrecido). Contrariamente, aquellos zircones con valores Epsilo Hf(t) negativos, pueden ser interpretados como derivados de la cristalización de magmas con una afinidad propia de la refusión de arcos corticales antiguos (re-trabajados) ó debido a procesos de contaminación de magmas juveniles con material cortical, a consecuencia del ascenso-estancamientoascenso de estos fundidos durante su paso por la corteza (Amelin, et al., 1999; Kemp, et al., 2005; Siebel y van den Haute, 2007; Koglin, et al., 2010; Turkina, et al., 2014). Sin embargo, es importante tener presente que existen varios problemas de carácter interpretativo sino se tiene en cuenta las diferentes particularidades de los circones al momento de ser datados y al momento de ser analizados mediante geoquímica de Hf (Vervoort and Kemp, 2016).

En el contexto antes referido, se evidencia que los zircones ígneos detríticos presentes en las cuarcitas analizadas de la unidad Esquistos del Silgará (*s.s.*), aflorantes en la franja de rocas metamórficas Matanza-Cachirí (muestra PS-7-1), proceden del desmantelamiento (erosión) de arcos magmáticos (o por la re-depositación, durante un segundo ciclo o más) formados principalmente por magmas de afinidad juvenil; los cuales debieron formarse durante el Paleo-Proterozoico Tardío y Meso-Proterozoico, más concretamente durante el Estatérico (eHf_{1672 Ma} = +9.3;

Paleo-Proterozoico Tardío), Calímico (eHf_{1414 Ma}=+10.3; Meso-Proterozoico) y parcialmente (?) también aquellos del Ectásico (eHf_{1289 Ma}=+0.8; Meso-Proterozoico); y también por arcos magmáticos formados posiblemente a partir de magmas inicialmente de afinidad juvenil, aunque afectados por contaminación cortical (o simplemente a partir de magmas con una afinidad de arcos magmáticos antiguos retrabajados); eHf_{1000 Ma}=-1.2, eHf_{975 Ma}=-3.2, eHf_{965 Ma}=-2.0, eHf_{881 Ma}=-3.8), formados principalmente durante el Tónico (Neo-Proterozoico Temprano).

Los valores (eHf) de los zircones ígneos detríticos presentes en las cuarcitas aflorantes en la franja Pescadero-Aratoca (denominada de manera interina como unidad Esquistos del Chicamocha), permiten sugerir que éstos también evidencian una proveniencia de arcos magmáticos formados principalmente por magmas de afinidad juvenil (*Depleted Mantle-Related*), relacionados con el desmantelamiento de arcos magmáticos de edad Paleo-Proterozoico (Sidérico; eHf_{2402.2 Ma}=+15) y Meso-Proterozoico (Calímico: eHf_{1534.5} _{Ma}=+7,4; Ectásico: eHf_{1322 Ma}=+16,5 y eHf_{1045.6 Ma}=+1,6; Esténico: eHf_{615.3 Ma}=+13,6); y nuevamente por magmas inicialmente de afinidad juvenil, aunque afectados por contaminación cortical (o simplemente con afinidad de arcos magmáticos antiguos re-trabajados) con edades tanto del Paleo-Proterozoico (Orosírico: eHf_{1867.3}=-5.2), como del Meso- (Esténico: eHf_{1141.1 Ma}=-5,9) y Neo-Proterozoico (Criogénico-Ediacárico : eHf_{812,1 Ma}=-5,4; eHf_{560 Ma}=-4,0).

Finalmente, los valores (eHf) de los zircones ígneos detríticos presentes en las meta-areniscas aflorantes en la franja Pescadero-Aratoca (unidad Filitas de San Pedro, según Mantilla, et al., 2015), apuntan a que estos minerales detríticos proceden igualmente del desmantelamiento de arcos magmáticos, en su momento formados posiblemente por magmas de afinidad juvenil (eHf_{1288 Ma}=+0,3; eHf₁₀₁₂ $_{Ma}$ =+0,5; eHf_{993 Ma}=+0,2; eHf_{967 Ma}=+0,2), los cuales temporalmente también se relacionan con eventos del Meso-Proterozoico, concretamente Ectásico (eHf_{1288 Ma}=+0,3), Esténico ($eHf_{1012 \text{ Ma}} = +0,5$) y Tónico ($eHf_{993 \text{ Ma}} = +0,2$; eHf_{967} _{Ma}=+0,2; Neo-Proterozoico Temprano). Adicional a la presencia de estos zircones referidos, también se reconoce la presencia de zircones posiblemente derivados inicialmente de magmas de afinidad juvenil, aunque afectados por contaminación cortical (o simplemente con una afinidad de arcos magmáticos antiguos re-trabajados; eHf_{999 Ma}=-0,6; $eHf_{967 Ma}$ =-0,7; $eHf_{482 Ma}$ =-1,3; $eHf_{460 Ma}$ =-3,1), temporalmente relacionados con el límite Esténico-Tónico (Meso-/Neo-Proterozoico), pero a diferencia de las unidades anteriores, también contiene zircones ígneos de de edad Ordovícico (Temprano y Medio).

Las anteriores interpretaciones se consideran de carácter preliminar, teniendo en cuenta que se requiere un numero mayor de análisis para fines de poder establecer si existen familias de circones detríticos de una misma edad, pero con diferentes valores épsilon Hf (ϵ Hf>0 ó ϵ Hf<0).

Apoyados en los datos anteriormente referidos, es posible subrayar que existen evidentes diferencias entre las tres unidades metamórficas propuestas en **Mantilla**, *et al.*, (2016) a cambio de la originalmente propuesta Formación Silgará (referida inicialmente en **Ward**, *et al.*, 1973). En este contexto, una vez más se corrobora que las tres unidades propuestas (Esquistos del Silgará *s.s.*; Esquistos del Chiocamocha y; Filitas de San Pedro) no pueden continuar haciendo parte de una misma formación o unidad, debido a sus diferencias litológicas, grado de metamorfismo, máxima edad de depositación y proveniencia de sus protolitos (incluido por supuesto también sus zircones detríticos).

Propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander

Consideraciones preliminares

La unidad metamórfica más antigua del Macizo de Santander, el Gneis de Bucaramanga (la cual esta por fuera del alcance del presente estudio), ha sido considerada por Cordani, et al., (2005) como un remanente del Cinturón Grenvilliano de Laurentia. Los zircones detríticos presentes en ésta unidad tienen edades que oscilan entre »1600 y »1200 Ma. Esto ha permitido indicar que la máxima edad de depositación del protolito del Gneis de Bucaramanga es de ~1200 Ma (límite entre el Estásico-Esténico). Los zircones detríticos con edades entre ~1300 y ~1600 Ma (Calímico-Ectásico), son considerados por los autores como derivados de las provincias geocronológicas del Cratón Amazónico, denominadas Rio Negro Juruena, Rondonian y Sunsás. Los eventos metamórficos que han afectado esta unidad (al igual que al Complejo de Garzón, y a los Gneises de Dibulla y Jojoncito), tuvieron lugar principalmente a los ~1190-1140 Ma, y ~1000-950 Ma. Una edad de metamorfismo más reciente también reportada para el Gneis de Bucaramanga por estos autores, entorno a los 864±66 Ma (»Criogénico), podría estar relacionada con un evento de metamorfismo prácticamente desconocido en el Macizo de Santander. De corroborarse éste evento de metamorfismo, éste debió haber afectado también al protolito de la unidad esquistos del Silgará s.s. (?), con anterioridad a la depositación del protolito de la unidad Esquistos del Chicamocha (ver Figura 4).

Un modelo contrario a la afinidad Grenvilliana propuesto por **Cordani**, *et al.* (2005) para el rango 1.3-0.95 Ga, se documenta en **Ibáñez**, *et al.*, (2011). Según estos últimos autores, la proveniencia de los zircones detríticos ígneos presentes en los Macizos de Garzón y Las Minas, al igual que las edades de metamorfismo (»1.15-0.98 Ga), se relacionan con la evolución del Orógeno del Putumayo (Orogenia Putumayense), el cual se interpreta como el resultado de la interacción colisional entre la Amazonía y la provincia Sveconorwegian del Báltico (contrario a la interacción colisional Amazonía-Laurentia propuesta en **Cordani**, *et al.*, 2005). Aunque el estudio de **Ibáñez**, *et al.*, (2011) no

330

analizó muestras del Macizo de Santander, se infiere que éste (particularmente la unidad Gneis de Bucaramanga) también sería otra exposición aislada en los Andes del Norte de esa corteza propuesta (de edad Esténico-Tónico; »1200-1000 Ma), debido a su gran similitud con el Complejo de Garzón (Macizo de Garzón), es decir, también debió hacer parte de los terrenos Colombo-Oaxaqueños en los cuales se desarrolló la franja de arco magmático (*fringing arc*) Pericratónica que tuvo lugar principalmente a los ~1.15 Ga (**Ibáñez, et al.,** 2011).

Extrapolando los datos reportados **Ibáñez**, *et al.*, (2011) para el Macizo de Garzón (y de algunos afloramientos similares del basamento de las cuentas *foreland* de los Andes del Norte), la máxima edad de depositación del protolito del Gneis de Bucaramanga sería algo similar, es decir, entre 1016 ± 5 Ma y la edad del metamorfismo a los 992 ± 8 Ma (Esténico-Tónico).

La corteza en la cual se desarrollaron los eventos Esténico-Tónicos antes referidos, se considera hace parte de la Provincia Rio Negro-Juruena, descrita en Tassinari y Macambira (1999). La presencia de gneises sienograníticos en el basamento del área de Araracuara (Amazonía Colombiana) con edades de 1756 \pm 18 Ma v 1732 \pm 24 Ma; granitoides en los ríos Apaporis y Vaupés (con edades entre 1530 y 1588 Ma (Calímico), y la presencia ocasional de zircones heredados en algunos de estos cuerpos ígneos Meso-Proterozoicos con edades que oscilan en el rango de ~1600 a ~2000 Ma (y granos puntuales de zircones tan antiguos como ~2.5 Ga; según Ibáñez, et al., 2011), apuntan en ese mismo sentido. Un aspecto muy importante en éstas zonas referidas del escudo (tal como se resalta en el estudio citado), es la ausencia de evidencias de eventos magmáticos o metamórficos más jóvenes que ~1.5 Ga (evidencias de no perturbación de la provincia Rio Negro-Juruena, la cual hace parte del cratón Amazónico (de edad 1.8-1.55 Ga).

Provenciencia de los zircones detríticos y propuesta de un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del MS

Apoyados en los aspectos geológicos referidos en el apartado anterior, es posible por consiguiente sugerir que los zircones detríticos presentes en la Unidad Esquistos del Silgará (s.s.); relacionados con magmas de afinidad juvenil del Estatérico (eHf_{1672 Ma}=+9.3), Calímico (eHf_{1414 Ma}=+10.3) y tal vez también aquellos del Ectásico ($eHf_{1289 Ma}^{1-1-10M}$ =+0.8); se relacionan muy posiblemente con el desmantelamiento de rocas ígneas como las descritas en la Serranía de la Macarena (Ibáñez, et al., 2011) o por procesos de re-depositación (por ejemplo: erosión del Gneis de Bucaramanga? y redepositación de sus materiales que ahora constituirían el protolito de la Unidad Esquistos del Silgará s.s.). Los eventos magmáticos de afinidad juvenil que dieron origen a éstos zircones referidos, debieron estar estrechamente relacionados en el momento de su cristalización con eventos ígneos propios de la evolución de las provincias Rio Negro-



Figura 4. Columna estratigráfica generalizada para el basamento metamórfico del Macizo de Santander (la escala vertical del tiempo es arbitraria). La Formación Floresta correspondería a la primera unidad sedimentaria que cubre el basamento metamórfico del MS. El signo + representa el magmatismo sin-tectónico que tuvo lugar durante el desarrollo del Evento Orogénico Fammatiniano Principal (dando origen a la denominada unidad Ortogneis; de edad Ordovícico Temprano). * Según Modelo de Ibáñez *et al.*, (2011); ** Según Modelo de Cordani *et al.*, (2005); ***Según Mantilla, *et al.* 2015. A la derecha de la columna se señala la afinidad de los magmas (con base en los datos isotópicos de Hf) a partir de los cuales cristalizaron los zircones analizados (rojo: juveniles; naranja: corticales). El rango de edad de los zircones detríticos ígneos de la unidad Gneis de Bucaramanga, se apoya en datos de Cordani *et al.*, (2005). Esquema elaborado con base en estudios previos (Ward *et al.*, 1973; Clavijo *et al.*, 1994; van der Lilej *et al.*, 2015; Spikings *et al.*, 2015; Mantilla *et al.*, 2015 y 2016, entre otros). Las unidades Esquistos del Silgará (*s.s.*), Chicamocha y Filitas de San Pedro, conformaban la denominada Formación Silgará (en términos de Ward *et al.*, 1973) ó unidad Esquistos del Silgará (en términos de Clavijo, 1994).

Juruena y Rondonian (descritas en **Tassinari y Macambira**, 1999). Sin embargo, los zircones detríticos con una afinidad propia de una componente cortical importante, de edad Tónico ($eHf_{1000 Ma}$ =-1.2, $eHf_{975 Ma}$ =-3.2, $eHf_{965 Ma}$ =-2.0,), se

interpretan como derivados del magmatismo que tuvo lugar en las etapas finales de la Orogenia Putumayo (propuesta por **Ibáñez**, *et al.*, 2011), aunque no se descarta la presencia de otra fuente ligeramente más joven ($eHf_{ss1 Ma} = -3.8$?). Respecto a los zircones detríticos presentes en la unidad Esquistos del Chicamocha (franja Pescadero-Aratoca), es posible sugerir que aquellos zircones relacionados con magmas de afinidad juvenil del Paleo-Proterozoico (Sidérico; eHf_{2402 2 Ma}=+15) y magmas con afinidad cortical también del Paleo-Proterozoico (Orosírico: eHf_{18673 Ma}=-5,2), proceden del desmantelamiento de las rocas más antiguas del NW del Cratón Amazónico, al parecer localizadas en territorio de Venezuela y Surinam, en donde también se han reportado eventos magmáticos y metamórficos de edad Orosírico (De Roever, et al., (2010), e incluso eventos magmáticos y metamórficos aún mas antiguos (USGS v CVG, 1993; De Avelar, et al. 2003; Delor, et al. 2003; Tassinari, et al., 2004; Hildebrand, 2005; Da Rosa-Costa, et al. 2006). Respecto a las zircones formados principalmente por magmas de afinidad juvenil (Depleted Mantle-Related) de edad Calímico (eHf_{1534.5 Ma}=+7,4) y Ectásico (eHf_{1322 Ma}=+16,5), es posible nuevamente sugerir que estos están relacionados en el momento de su cristalización, también con eventos ígneos propios de las provincias Rio Negro-Juruena v Rondonian (descritas en Tassinari y Macambira, 1999). Sin embargo, los zircones detríticos con una componente magmática, de afinidad tanto juvenil como cortical, del Esténico (eHf_{1045.6} $_{Ma}$ =+1,6; eHf_{1141.1 Ma}=-5,9), al igual que en el caso anterior, se interpretan como derivados del magmatismo que tuvo lugar en las etapas finales de la Orogenia Putumavense (propuesta por Ibáñez, et al., 2011). Finalmente, los zircones detríticos del Ediacárico (finales del Neo-Proterozoico), con afinidades de magmas tanto juveniles (eHf_{615 3 Ma}= +13,6) como corticales (eHf $_{560 Ma}$ =-4,0), resultan ser muy coincidentes temporalmente con la orogenia Brasilinao/ Pan-Africana (Neo-Proterozoico). Por esta razón, éstos zircones estarían relacionados con el desmantelamiento de un antiguo cinturón magmático de esta edad, actualmente enterrado debajo de la cuenca del Amazonas y cubierto durante el Eoceno-Oligoceno (según Chew, et al., 2007 y 2008). La presencia puntual de zircones detríticos en la unidad Esquistos del Chicamocha con magmas de afinidad cortical del Criogénico (eHf_{8121 Ma}=-5,4), no esta muy clara, aunque se sospecha que podría estar relacionado con algún evento ígneo que tuvo lugar con posterioridad a la Orogenia Grenvilliana (en términos de Cordani, et al., 2005) ó Orogenia Putumayense (en el sentido de Ibáñez, et al., 2011) e inicios de la depositación del protolito de la Unidad Esquistos del Chicamocha (Cámbrico Temprano a Medio, según Mantilla, et al., 2015).

Con relación a los zircones ígneos detríticos presentes en la unidad Filitas de San Pedro, con afinidad propia de magmas juveniles (eHf_{1288 Ma}=+0,3; eHf_{1012 Ma}=+0,5; eHf_{993 Ma}=+0,2; eHf_{967 Ma}=+0,2) del Ectásico (eHf_{1288 Ma}=+0,3), Esténico (eHf_{1012 Ma}=+0,5; Meso-Proterozoico) y Tónico (eHf_{993 Ma}=+0,2; eHf_{967 Ma}=+0,2; Neo-Proterozoico Temprano); y de afinidades corticales también del Tacónico (eHf_{999 Ma}=-0,6; eHf_{967 Ma}=-0,7); nuevamente se sugiere que estos podrían estar relacionados con los eventos magmáticos sintectónicos

(simultaneos con el desarrollo del metamorfismo regional) que tuvieron lugar durante la evolución de la Orogenia Putumayense (propuesta por Ibáñez, et al., 2011; Weber, et al., 2010; Van der Lilej, 2015). A diferencia de las unidades anteriores, se resalta también la presencia de zircones ígneos de afinidad cortical de edad Ordovícico (Temprano y Medio; con valores $eHf_{482 Ma}$ =-1,3; $eHf_{460 Ma}$ =-3,1), los cuales al parecer están relacionados con el desmantelamiento de los granitos sin-tectónicos representados en la unidad Ortogneis (aflorantes en el Macizo de Santander). Esto, se basa en el hecho que estas rocas presentan características tanto de magmas con afinidad juvenil, como de magmas posiblemente contaminados con materiales corticales (ver Mantilla, et al., 2012 y Van der Lilej, 2013). En este sentido, es posible señalar que la depositación del protolito de esta unidad, incorporó fuentes relativamente más cercanas (relativamente mas autóctonas, es decir, fuentes intra-Fammatinianas formadas durante el evento orogénico principal), en comparación con los protolitos de las anteriores dos unidades.

Apoyados en los datos anteriormente referidos, los autores señalan la necesidad de profundizar en la tarea de diferenciar la unidad esquistosa de la franja P-A (tentativamente denominada en estudios previos como unidad Esquistos del Chicamocha), de la unidad Esquistos del Silgará (*s.s.*) aflorante en la franja M-C. Teniendo en cuenta estas consideraciones y los recientes datos publicados en la bibliografía (**van der Lilej**, *et al*, 2015; **Mantilla**, *et al.*, 2015 y 2016, entre otros), se siguiere un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander, el cual se resume a manera de columna estratigráfica, como aquella referida en la Figura 4. En ésta última, adicionalmente también se señalan los posibles eventos de metamorfismo regional que se registran en el Macizo de Santander.

Conclusiones

El estudio de los zircones detríticos presentes en las rocas esquistosas aflorantes tanto en las franjas Matanza-Cachirí (M-C), como Piedecuesta-Aratoca (P-A), muestra poblaciones de zircones comunes, los cuales guardan relación con magmas de afinidad juvenil (eHf>0) de edades tanto del Paleo-Proterozoico Tardío (Estatérico), como del Meso-/Neo-Proterozoico (con poblaciones en el rango de edad Calímico-Ectásico y Esténico-Tónico). La presencia en ambas unidades de zircones ígneos con afinidad cortical también del rango Esténico-Tónico (comparativamente los más abundantes), permite sugerir una fuente de sedimentos relacionada con una corteza continental ligada a la evolución de la Orogenia Putumayense (según Modelo de Ibáñez, et al., 2011) o Grenvilliana (según Modelo de Cordani, et al., 2005 y Chew, et al., 2008). A pesar de éstos rasgos comunes, también es muy evidente la diferencia entre estas dos franjas metamórficas, especialmente debido a: (1) la presencia de poblaciones de zircones más antiguos (por ejemplo, zircones con afinidad mantélica de edad Sidérico; y con afinidad cortical de edad Orosírico; también hay presencia puntual de zircones Argueanos) y; (2) presencia de zircones más jóvenes (de afinidad cortical del Criogénico; y de afinidad mantélica de edad Ediacárico). Los zircones ígneos más antiguos, se relacionan con fuentes de sedimentos localizadas en las provincias Rio Negro-Juruena y Rondonia (o incluso Venturi-Tapajos). La fuente de sedimentos más jóvenes de edad Ediacárico (zircones de afinidad tanto mantélica, como cortical; y temporalmente coincidentes con la orogenia Brasiliano/Pan-Africana), se interpretan como procedentes del desmantelamiento de un antiguo cinturón magmático desarrollado durante el rompimiento del supercontinente Rodinia (actualmente enterrado debajo de la cuenca del Amazonas, el cual se encontraría cubierto por sedimentos del Eoceno-Oligoceno, según Chew, et al., 2007 y 2008).

Los contrastes referidos entre las dos franjas metamórficas antes mencionadas, apoyan la necesidad de diferenciar la unidad esquistosa de la franja P-A (tentativamente denominada en estudios previos como unidad Esquistos del Chicamocha), de la unidad Esquistos del Silgará (*s.s.*) aflorante en la franja M-C.

Finalmente, los zircones ígneos detríticos de la unidad Filitas de San Pedro, se caracterizan por presentar zircones ígneos del Ordovícico Temprano y Medio (además de las ya referidas poblaciones del Meso- y Neo-Proterozoico). La presencia de ésta población más joven de zircones con valores eHf<0, se relaciona con el desmantelamiento de los granitos sin-tectónicos representados en la unidad Ortogneis (aflorantes en el Macizo de Santander).

En el contexto de los nuevos datos reportados, se propone un nuevo marco estratigráfico para el basamento metamórfico del Macizo de Santander, representado a manera de columana estratigráfica en la Figura 4.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander (UIS), el apoyo financiero brindado a este trabajo mediante el proyecto 1799 "Condiciones y edad de metamorfismo de las metasedimentitas aflorantes en el área del municipio de Mogotes (Macizo de Santander, Colombia)." A la Escuela de Geología y al grupo GIGBA (Grupo de investigación en Geología Básica y Aplicada), por apoyar siempre las actividades encaminadas a generar nuevo conocimiento geológico de nuestro territorio nacional. A las autoridades civiles, militares y eclesiásticas de las áreas del Departamento de Santander visitadas durante el desarrollo del presente estudio, por la amabilidad y colaboración. Al Geólogo Camilo Arenas por su colaboración en la elaboración de la figura 1.

Un agradecimiento especial a los colegas Hernando Mendoza, Jairo Clavijo y Giovanny Jiménez, por sus valiosos comentarios y discusiones. Los autores expresan su profunda gratitud a los evaluadores anónimos del presente trabajo, cuyos valliosos comentarios ayudaron a mejorar este manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés

Bibliografía

- Albarède, F., Scherer, E.E., Blichert-Toft, J., Rosing, M.T., Simionovici, A., Bizzarro, M., 2006. Gamma-ray irradiation in the early solar system and the conundrum of the ¹⁷⁶Lu decay constant. Geochimica and Cosmochimica Acta, **70**: 1261-1270.
- Amelin, Y., Lee, D.Ch., Halliday, A. N., Pidgeon, R. T. (1999). Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. Nature, **399** (20): 252-255.
- Andres, M., Blichert-Toftb, J., Schilling, J. (2004). Nature of the depleted upper mantle beneath the Atlantic: evidence from Hf isotopes in normal mid-ocean ridge basalts from 79°N to 55°S. Earth and Planetary Science Letters, 225: 89-103
- Arvizu, H. E., Iriondo, A. (2011). Estudios isotópicos de Hf en zircones de granitoides pérmicos en el NW de México: Evidencia de mezcla de magmas generados a partir de la fusión de múltiples fuentes corticales. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 28 (3): 493-518.
- Bhatia, M.R., Crook, K.A.W. (1986). Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contributions to Mineralogy and Petrology, **92:** 181-193.
- Blichert-Toft, J., Albarède, F. (1997). The LueHf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantlecrust system. Earth and Planetary Science Letters, 148: 243-258.
- Blichert-Toft, J., Chauvel, C., Albarède, F. (1997). Separation of Hf and Lu for high- precision isotope analysis of rock samples by magnetic sector-multiple collector ICP-MS. Contributions to Mineralogy and Petrology, **127**: 248-260.
- **Bouvier, A., Vervoort, J.D., and Patchett, P.J.** (2008). The Lu– Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibriated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets: Earth and Planetary Science Letters, **273**: 48-57.
- Boinet, T., Bourgois, J., Bellon, H. y Toussaint, J. (1985). Age et repartition du magmatism Premesozoique des Andes de Colombie. Comptes rendus hebdomadaires des séaces de L'Académie des Sciences. Serie D: SciencesNaturalles, **300** (II): 445-450.
- **Botello, F., Mantilla, F. L.C., Colegial, G. J.** (2014). Edad U-Pb en zircones y contexto tectónico de formación del Granito de Durania (Macizo de Santander, Colombia). Memorias XI Semana Técnica de Geología y I Geosciences anual meeting. UIS. Bucaramanga, 11 al 15 de Agosto de 2014.
- Chang, Z., Vervoort, J.D., Knaack, C., and McClelland, W.C. (2006). U-Pb dating of zircon by LA-ICP-MS. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 7 (5): 1-14.

- Chew, D.M., Schaltegger, U., Košler, J., Whitehouse, M.J., Gutjahr, M., Spikings, R.A., Miškovíc, A. (2007). U-Pb geochronologic evidence for the evolution of the Gondwanan margin of the north-central Andes. Geological Society of America Bulletin, 119: 697-711.
- Chew, D.M., Magna, T., Kirkland, C.L., Miskovic, A., Cardona, A., Spikings, R., Schaltegger, U. (2008). Detrital zircon fingerprint of the Proto-Andes: evidence for a Neoproterozoic active margin? Precambrian Research, 167: 186-200.
- **Clavijo, J.** (1994). Mapa geológico generalizado del Departamento de Norte de Santander, Memoria explicativa. Informe interno INGEOMINAS, 67p.
- Cordani, U., Cardona, A., Jimenez, D., Liu, D., Nutman, A. (2005). Geochronology of Proterozoic basement inliers in Colombian Andes: tectonic history of remnants of a fragmented grenville belt. in: terrane processes at margins of gondwana. Geological Society, London, Special Publications. Edited by Vaughan, A.; Leat, P.; Pankhurst, R., **246**: 329-346.
- Cordani, U.G., Sato, K., Teixeira, W., Tassinari, C.G., and Basei, M.A.S. (2000). In Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A., and Campos Neto, M.C., eds., Tectonic Evolution of South America: Rio de Janeiro, 31st International Geological Congress, Institut de Recherche pour le Développement, 19-40.
- **De Roever, E.W.F., Lafon, J-M., Delor, C., 3, Guerrot, C.** (2010). Orosirian magmatism and metamorphism in Surinam: new geochronological constraints. 45° Congresso Brasileiro de Geologia. Belém, 26 de Setembro a 01 de Outubro de 2010. Poster.
- Da Rosa-Costa, L., Lafon, J-M., Delor, C. (2006). Zircon geochronology and Sm–Nd isotopic study: Further constraints for the Archean and Paleoproterozoic geodynamical evolution of the southeastern Guiana Shield, north of Amazonian Craton, Brazil. Gondwana Research, 10: 277-300.
- De Avelar, V. G., Lafon, J-M, Delor, C., Guerrot, C., Lahondére, D. (2003). Archean cristal remmants in the easternmost part of the Guiana Shield: Pb-Pb and Sm-Nd geochronological evidence for Mesoarchean versus Neoarchean signatures. Géologie de la France, (2-3-4), 83-99.
- Delor, C., Roever, E. W. F., Lafon, J-M., Lahondére, D., Rossi,
 Ph., Cocherie, A., Guerrot, C., Potrel, A. (2003). The Bakhuis ultrahigh-temperature granulite belt (Suriname):
 II. implications for late Transamazonian crustal stretching in a revised Guiana Shield framework. Géologie de la France, (2-3-4), 207-230.
- Fralick, P. W., Kronberg, B. (1997). Geochemical discrimination of clastic sedimentary rock sources. Sed. Geol., 113, 111-124.
- García, C., Ríos, C. (1999). Metamorfismo y metalogénia asociada del Macizo de Santander, Cordillera Oriental, Colombia. Informe final Proyecto de Investigación 102-05-083-95 Colciencias-Universidad Industrial de Santander (Bucaramanga), 191p.

- **García-Ramírez, C., Ríos, C.** (2004). Occurrence and significance of the polymorphs of Al_2SiO_5 in metamorphic rocks of the Santander Massif, Eastern Cordillera (Colombian Andes). Boletin de Geología, **26** (43): 23-38
- Goldsmith, R., Marvin, R.F., Mehnert, H.H. (1971). Radiometric ages in the Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombian Andes. U.S. Geological Survey Professional. Paper 750-D, D44-D49.
- Hildebrand, R. S. (2005). Autochthonous and allochthonous strata of the El Callao greenstone belt: Implications for the nature of the Paleoproterozoic Trans-Amazonian orogeny and the origin of gold-bearing shear zones in the El Callao mining district, Guayana shield, Venezuela. Precambrian Research 143: 75-86.
- Ibanez-Mejia, M., Ruiz, J., Valencia, V.A., Cardona, A., Gehrels, G.E., and Mora, A.R. (2011). The Putumayo Orogen of Amazonia and its implications for Rodinia reconstructions: New U–Pb geochronological insights into the Proterozoic tectonic evolution of northwestern South America: Precambrian Research, **191** (1): 58-77.
- Hoang, L. V., F.-Y. Wu, P. D. Clift, A. Wysocka, and A. Swierczewska (2009). Evaluating the evolution of the Red River system based on in situ U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 10 (11). doi:10.1029/2009GC002819.
- Kemp, A.I.S., Wormald, R.J., Whitehouse, M.J., Price, R.C. (2005). Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia. Geology, **33** (10): 797-800.
- Koglin, N., Zeh, A., Frimmel, H. E., Gerdes, A. (2010). New constraints on the auriferous Witwatersrand sediment provenance from combined detrital zircon U–Pb and Lu– Hf isotope data for the Eldorado Reef (Central Rand Group, South Africa). Precambrian Research, 183: 817-824.
- Machado, N., Simonetti, A. (2001). U-Pb dating and Hf isotopic composition of zircon by Laser Ablation-MC-ICP-MS. In: Laser Ablation-ICPMS in the Earth Sciences: Principles and Applications, pp. 121-146 (Chapter 9).
- Mantilla, Figueroa. L. C., Bissig, T., Valencia, V., Craig, H. (2013). The magmatic history of the Vetas-California mining district; Santander Massif, Eastern Cordillera, Colombia. Journal of South American Earth Sciences, **45**: 235-249.
- Mantilla, Figueroa. L. C., Bissig, T., Cottle, J. M., Hart, C. 2012. Remains of early Ordovician mantle-derived magmatism in the Santander Massif (Colombian Eastern Cordillera). Journal of South American Earth Sciences **38**: 1-12.
- Mantilla-Figueroa, L., García-Ramírez, C., Ríos-Reyes, C., Castellanos, O., Valencia, V., Camacho, D. (2015). Geocronología U-Pb en circones detríticos de rocas metasedimentarias del Macizo de Santander (Cordillera Oriental, Colombia): Implicaciones estratigráficas. Memorias XV Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Agosto 31 a Septiembre 5 de 2015, p.p. 444-450.

- Mantilla, Figueroa. L. C., García, C. A., Valencia, V. (2016). Propuesta de escisión de la denominada 'Formación Silgará' (Macizo de Santander, Colombia), a partir de edades U-Pb en zircones detríticos. Boletín de Geología, 38 (1): 33-47.
- Moreno-Sánchez, M., Gómez-Cruz, A. d. J., y Castillo-González,
 H. (2005). La Formación Floresta Metamorfoseada (sensu Ward et al., 1973) no es la Formación Floresta sin metamorfosear. Memorias X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá, pp. 1-7.
- Nebel, O., Rapp, R. P., Yaxley, G. M. (2014). The role of detrital zircons in Hadean crustal research. Lithos, **190:** 313-327.
- Neves, S. P., Alcantara, V. C. (2010). Geochemistry of orthogneisses and metasedimentary rocks across a proposed terrane boundary in the Central Domain of Borborema Province, NE Brazil: Geodynamic implications. Journal of South American Earth Sciences, 29: 498-511
- Ramos, V.A. (2010). The Grenville-age basement of the Andes: Journal of South American Earth Sciences, **29** (1): 77-91.
- Restrepo-Moreno, S. (2009). Long-term morphotectonic evolution and denudation chronology of the Antioqueño plateau, Cordillera Central, Colombia. Ph.D thesis, University of Florida, 233p
- Restrepo-Pace, P.A., Cediel, F. (2010). Northern South America basement tectonics and implications for paleocontinental reconstructions of the Americas. Journal of South American Earth Sciences, **29:** 764-771.
- Ríos, C., García-Ramírez, C., Takasu, A. (2003). Tectonometamorphic evolution of the Silgara Formation metamorphic rocks in the southwestern Santander Massif, Colombian Andes. Journal of South American Earth Sciences, 16: 133-154
- Roser, B.P., Korsch, R.J. (1986). Determination of tectonic setting of sandstone– mudstone suites using SiO2 content and K2O/Na2O ratio. J. Geol., 94.
- Royero, J., Vargas, G. (1999). Geología del Departamento de Santander. Ingeominas.
- Royero, G.J.M., Clavijo, J. (2001). Mapa Geológico generalizado departamento de Santander. Escala 1: 400.000. Informe Ingeominas, 92 p.
- Scherer, E., Münker, C., Mezger, K. (2001). Calibration of the lutetium-hafnium clock. Science **293:** 683-687.
- Siebel, W., Van den haute, P. (2007). Radiometric dating and tracing. In: Radiochemistry and Nuclear Chemistry, [Ed. Sandor Nagy]. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford UK, [http://www.eolss.net]
- Spikings, R. Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winklerf, W. Beate, B. (2015). The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75 Ma). Gondwana Research, 27 (1): 95-139.

- Tassinari, C. C.G., Munhá, J. M. U., Teixera, W., Palacios, T., Nutman, A. P., Sosa S. C., Santos, A. P., Calado, B. O. (2004). The Imataca Complex, NW Amazonian Craton, Venezuela: Crustal evolution and integration of geochronological and petrological cooling histories. Episodes, 27 (1): 3-12.
- Tassinari, C., and Macambira, M. (1999). Geological provinces of the Amazonían Craton. Episodes, **22**: 173-182.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M. (1985). The Continental Crust, its Composition and Evolution (Blackwell Scientific, Oxford).
- Turkina, O. M., Lepekhina, E. N., Berezhnaya, N. G., Kapitonov, I. N. (2014). U–Pb age and Lu–Hf Isotope Systematics of Detrital Zircons from Paragneiss of the Bulun Block (Sharyzhalgai Uplift of the Siberian Craton Basement). Doklady Akademii Nauk, 458 (5): 582-589.
- U.S Geological Survey and Corporación Venezolana de Guayana, Técnica Minera C. A. (1993). Geology and Mineral Resource Assessment of the Venezuelan Guayana Shield. U.S. Geological Survey Bulletin 2062. 128 p.
- Van Der Lelij, R. (2013). Reconstructing north-western Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: a geochronological, thermochronological and geochemical study. Thèse de doctorat, Univ. Genève, no. 4581, 248p. http://archive-ouverte.unige.ch/unige:31653.
- Van Der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M., Mora, A. (2015). Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rh..., Gondwana Research.doi. org/10.1016/j.gr.2015.01.011
- Veevers J. J., Belousova E. A., Saeed A., Sircombe K., Cooper A. F. and Read S. E. (2006). Pan-Gondwana detrital zircons from Australia analysed for Hf-isotopes and trace elements reflect an ice-covered Antarctic provenance of 700–500 Ma age, TDM of 2.0–1.0 Ga, and alkaline affinity. Earth Sci. Rev., 76: 135-174.
- Villamizar, D., Rueda, L. (2014). Petrografía de los Esquistos del Silgará en la franja Matanza.Cachirí-Turbay. Trabajo de grado. Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, 129p.
- Vervoort, J.D., Patchett, P.J., Soderlund, U., Baker, M. (2004). The isotopic composition of Yb and the precise and accurate determination of Lu concentrations and Lu/Hf ratios by isotope dilution using MC-ICP-MS. Geochem. Geophys. Geosyst. 5. doi:10.1029/2004GC000721.
- Vervoort, J. and Kemp, A. (2016). Clarifying the zircon Hf isotope record of crust–mantle evolution. Chemical Geology, 425: 65-75
- Ward, D., Goldsmith, R., Cruz, B., Jaramillo, C., Restrepo, H. (1973). Geología de los Cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. U.S. Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, XXI (1-3): 1-132.
- Weaver, B., Tarney, J. (1984). Empirical approach to estimating the composition of the continental crust. Nature, 310: 575-577

- Weber, B., Scherer, E.E., Schulze, C., Valencia, V.A., Montecinos, P., Mezger, K., and Ruiz, J. (2010). U–Pb and Lu–Hf isotope systematics of lower crust from centralsouthern Mexico– Geodynamic significance of Oaxaquia in a Rodinia Realm: Precambrian Research, **182** (1): 149-162.
- Yang, Z. N., Yang, K. G., Xu, Y., Deng, X., Cheng, W., Long, Z. Y. (2015). Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopic composition, and geological implications of the Neoproterozoic meta-sedimentary rocks in Suizhou-Zaoyang area, the northern Yangtze Block. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-015-5073.
- Zeh, A., Gerdes, A., Barton, J. (2009). Archean Accretion and Crustal Evolution of the Kalahari Cratonçthe Zircon Age and Hf Isotope Record of Granitic Rocks from Barberton/ Swaziland to the Francistown Arc. Journal of Petrology, 50:933-966, doi:10.1093/petrology/egp027
- Zeh, A., Gerdes, A., Heubeck, C. (2013). U-Pb and Hf isotope data of detrital zircons from the Barberton Greenstone Belt: constraints on provenance and Archaean crustal evolution. Journal of the Geological Society, 170: 215-223. doi:10.1144/jgs2011-162

Original article

Topological properties of spaces of projective unitary representations

Jesús Espinoza¹, Bernardo Uribe^{2,*}

 ¹ Licenciatura en Matemáticas Aplicadas, Universidad del Papaloapan, Av. Ferrocarril s/n. 68400 Ciudad Universitaria. Campus Loma Bonita, Oaxaca, México
 ² Departamento de Matemáticas y Estadística, Universidad del Norte, Km 5 Vía Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia

Abstract

Let *G* be a compact and connected Lie group and $PU(\mathcal{H})$ be the group of projective unitary operators on an infinite dimensional separable Hilbert space \mathcal{H} endowed with the strong operator topology. We study the space $\hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$ of continuous homomorphisms from *G* to $PU(\mathcal{H})$ which are stable, namely the homomorphisms whose induced representation contains each irreducible representation an infinitely number of times. We show that the connected components of $\hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$ are parametrized by the isomorphism classes of *S*¹-central extensions of *G*, and that each connected component has the group $\hom(G, S^1)$ for fundamental group and trivial higher homotopy groups. We study the conjugation map $PU(\mathcal{H}) \to \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H})), F \mapsto F\alpha F^{-1}$, we show that it has no local cross sections and we prove that for a map $B \to \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$ with *B* paracompact of finite paracompact dimension, local lifts to $PU(\mathcal{H})$ do exist. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Unitary Representation, Projective Unitary Representation.

Propiedades topológicas del espacio de representaciones unitarias proyectivas.

Resumen

Sea *G* un grupo de Lie compacto y conexo y $PU(\mathcal{H})$ el grupo de operadores proyectivos e unitarios en un espacio de Hilbert separable e infinito dimensional \mathcal{H} , provisto de la topología fuerte de operadores. Estudiamos el espacio hom_{st}(*G*, *PU*(\mathcal{H})) de homomorfismos continuos desde *G* a *PU*(\mathcal{H}) que son estables, es decir homomorfismos cuyas representaciones inducidas contienen cada representación irreducible un número infinito de veces. Demostramos que las componentes conexas del espacio hom_{st}(*G*, *PU*(\mathcal{H})) están parametrizadas por las clases de isomorfía de extensiones centrales de *G* por el grupo *S*¹, y que cada componente conexa tiene por grupo fundamental al grupo hom(*G*, *S*¹) y sus grupos de homotopía superiores son triviales. Estudiamos la aplicación conjugación $PU(\mathcal{H}) \rightarrow \text{hom}_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$, $F \mapsto F\alpha F^{-1}$, demostramos que no tiene secciones locales y demostramos que para cualquier aplicación continua $B \rightarrow \text{hom}_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$ con *B* paracompacto de dimensión paracompacta finita, los levantamientos locales a $PU(\mathcal{H})$ sí existen. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: Representación Unitaria, Representación Proyectiva Unitaria.

Introduction

The motivation to study the topological properties of the space $\hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$ of stable homomorphisms from a compact Lie group *G* to the group of projective unitary operators on a Hilbert space \mathcal{H} endowed with the topology of pointwise convergence, comes from realm of equivariant K-theory.

By a theorem of Atiyah and Jänich **Jänich** (1965) the *K*-theory groups of a topological space *X* may be obtained as the homotopy groups of the space

$$map(X, Fred(\mathcal{H}))$$

of continuous maps from *X* to the space $Fred(\mathcal{H})$ of Fredholm operators on \mathcal{H} . Given any projective unitary bundle over *X*, namely a $PU(\mathcal{H})$ -principal bundle $PU(\mathcal{H}) \rightarrow P \rightarrow X$, we may define a twisted version of the K-theory groups by taking the homotopy groups of the space of sections of the associated $Fred(\mathcal{H})$ bundle

$$P \times_{PU(\mathcal{H})} \operatorname{Fred}(\mathcal{H}) \to X.$$

*Corresponding author:

Bernardo Uribe, bjongbloed@uninorte.edu.co Received: November 11, 2015 Accepted: June 7, 2016 These groups are called the twisted K-theory groups and they define a parametrized cohomology theory in the sense of **May and Sigurdsson** (2006) whenever we consider the category of pairs (X, f) with X a topological space and $f : X \rightarrow BPU(\mathcal{H})$ a map which recovers the $PU(\mathcal{H})$ bundle P.

In the equivariant setup, namely when we consider the category of spaces with *G* actions, the definition of the twisted equivariant K-theory is more intricate. We need to consider *G* equivariant projective unitary stable bundles, namely *G* equivariant $PU(\mathcal{H})$ -principal bundles $P \rightarrow X$, such that the induced local homomorphism $G_x \rightarrow PU(\mathcal{H})$ is stable for G_x the isotropy group of any $x \in X$, in order to define the twisted equivariant K-theory groups as the homotopy groups of the *G* invariant sections of the associated bundle

$$P \times_{PU(\mathcal{H})} \operatorname{Fred}(\mathcal{H}) \to X.$$

To prove that the twisted equivariant K-theory is a parametrized cohomology theory in the sense of **May** (1996) we would need to construct a universal G equivariant projective unitary stable bundle as it was done in the non-equivariant case. The construction of this universal space can be done using classifying spaces of families of subgroups as it was done in **Lück and Uribe** (2014), though the property of being locally trivial depends on the existence of cross local sections on the conjugation map

$$PU(\mathcal{H}) \to \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$$
$$F \mapsto F \alpha F^{-1}.$$

Unfortunately such local cross sections fail to exist in general, as we shown in Theorem 4.8, and therefore the universal space that we can construct using families of subgroups fails to be locally trivial. Nevertheless when we restrict ourselves to consider only maps

$$B \to \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))$$

with *B* paracompact, we prove in Theorem 5.6 that these maps have indeed local lifts to $PU(\mathcal{H})$. The previous result would imply that the universal space constructed using classifying spaces of families of subgroups done in **Lück and Uribe** (2014) would become a universal *G* equivariant projective unitary stable bundle for paracompact spaces, and hence, when restricted to paracompact spaces, the twisted equivariant K-theory would be a parametrized equivariant cohomology theory. We have not proven this last statement, but we believe it is true.

Besides the application of our results to K-theory, we also show the following facts. We study the space of stable unitary representations $\hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))$ on a Hilbert space \mathcal{H} and we generalize results of Dixmier-Douady on the infinite grassmannian $\operatorname{Gr}(\mathcal{H})$ to the space of unitary representations. We show in Corollary 4.10 that $\hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$ is weakly homotopy equivalent to a point for any choice of irreducible representations $\mathcal{C} \subset \operatorname{Irrep}(G)$, we show that the space $\hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$ has as many connected components as S^1 -central extensions of G and that each connected component has $\hom(G, S^1)$ for fundamental group and trivial higher homotopy groups.

The article is organized as follows. In Section 2 we recall the properties of the group of unitary operators endowed with the strong operator topology and we define the infinite grassmannian. In Section 3 we recall the definition of continuous field of Hilbert spaces done by Dixmier-Douady in **Dixmier and Douady** (1963) and we show the properties of the infinite grassmannian with respect to the existence of sections on the unitary group. In Section 4 we study the topological properties of the spaces

$$\hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))$$

of stable continuous homomorphisms from a compact Lie group to the group of unitary operators. In Section 5 we study the topological properties of the space

$$\hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))$$

of stable continuous homomorphisms from a compact Lie group to the group of projective unitary operators. Finally, in Section 6 we show some applications to twisted equivariant K-theory of the results of the previous sections and we conclude with some ideas for further research.

Acknowledgements: The first author acknowledges the support of a CONACyT postdoctoral fellowship and of the Centro de Ciencias Matemáticas of the UNAM. The second author acknowledges the financial support of the Max Planck Institute for Mathematics in Bonn and of COLCIENCIAS through contract number FP44842-617-2014.

Spaces of operators and the infinite grassmannian

Let \mathcal{H} be a separable and infinite dimensional complex Hilbert space and denote by $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ the vector space of bounded linear operators. The inner product \langle,\rangle on \mathcal{H} induces the norm $|x| := \sqrt{\langle x, x \rangle}$ for $x \in \mathcal{H}$, and we have the standard norm on the space of bounded linear operators

$$|T| = \sup_{|x| \le 1} |Tx|.$$

The space $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ can be endowed with several topologies, among them we have the *strong operator topology* and the *compact-open topology*. These topologies are of interest when studying principal bundles and therefore are the ones of interest in this paper.

Recall that in the strong operator topology, a subbasic open set is given by

$$V(T,\varepsilon;x) = \{S \in \mathcal{B}(\mathcal{H}) \mid |Sx - Tx| < \varepsilon\}$$

for any $T \in \mathcal{B}(\mathcal{H})$, $x \in \mathcal{H}$ and $\varepsilon > 0$. In this topology, a sequence of bounded operators $\{T_n\}$ converges to $T \in \mathcal{B}(\mathcal{H})$ if and only if $T_n x \to Tx$ for all $x \in \mathcal{H}$. On the other hand, a subbase for the compact-open topology on $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ is given by the family of sets

$$V(K,A) = \{ S \in \mathcal{B}(\mathcal{H}) \mid S(K) \subset A \},\$$

where $K \subset \mathcal{H}$ is a compact set and $A \subset \mathcal{H}$ is an open set. Note that in the compact-open topology a sequence of bounded operators $\{T_n\}$ converges to $T \in \mathcal{B}(\mathcal{H})$ if and only if $T_n|_K \to T|_K$ uniformly for every compact set $K \subset \mathcal{H}$.

Neither of the previous topologies on $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ are equivalent. However, if we restrict to the group of unitary operators on \mathcal{H} ,

$$U(\mathcal{H}) = \{ U \in \mathcal{B}(\mathcal{H}) \mid UU^* = U^*U = \mathrm{Id}_{\mathcal{H}} \},\$$

then we know that the strong operator topology and the compact-open topology agree on the group $U(\mathcal{H})$. Moreover, the group $U(\mathcal{H})$ endowed with any of these topologies is a Polish group, i.e. a completely metrizable topological group (see **Espinoza and Uribe** (2014)), and furthermore contractible (**Dixmier and Douady**, 1963, §11, Lem. 3). Let us recall the metric on $U(\mathcal{H})$ which recovers the strong operator topology since it will be needed in what follows.

Let $\{e_j\}_{j\in\mathbb{N}}$ be an orthonormal base of \mathcal{H} and consider the embedding $\Psi : U(\mathcal{H}) \to \mathcal{H}^{\mathbb{N}}$ with $\Psi(T) = (Te_j)_{j\in\mathbb{N}}$. Any metric on $\mathcal{H}^{\mathbb{N}}$ which induces the product topology induces also a metric on $U(\mathcal{H})$ compatible with the strong operator topology. Therefore for any pairs of operators $T, U \in U(\mathcal{H})$ we may define their distance by the equation

$$\langle T, U \rangle := \sup_{n \in \mathbb{N}} \left\{ \frac{\min\{|Te_n - Ue_n|, 2\}}{n} \right\}.$$
 (1)

Note that with this metric S^1 acts by isometries on $U(\mathcal{H})$, i.e.

$$\langle e^{it}T, e^{it}U \rangle = \langle T, U \rangle$$

and moreover we have that

$$\langle e^{it}T, e^{is}T \rangle = |e^{it} - e^{is}|.$$

From now and on we will assume that $U(\mathcal{H})$ is endowed with the strong operator topology and with the metric defined above. The first consequence of this choice is the following lemma.

Lemma 2.1. Let X be a topological space and let us consider $U(\mathcal{H})$ with the strong operator topology. Then a map $\Psi: X \to U(\mathcal{H})$ is continuous if and only if the map

$$\psi: X \times \mathcal{H} \longrightarrow \mathcal{H}$$

 $(x,h) \longmapsto \Psi(x)h$

is continuous.

Proof. Consider $(x_0, h_0) \in X \times \mathcal{H}$ and let

 $B(\Psi(x_0)h_0,\varepsilon)$

be an open ball in \mathcal{H} with center at $\psi(x_0, h_0) = \Psi(x_0)h_0$ and radius $\varepsilon > 0$. We will show that there exists an open set $A \subset X \times \mathcal{H}$ such that $\psi(A) \subset B(\Psi(x_0)h_0, \varepsilon)$.

Define $V(\Psi(x_0), \varepsilon/2; h_0) = \{T \in U(\mathcal{H}) \mid Th_0 \in B(\Psi(x_0)h_0, \varepsilon/2)\}$ which is an open set in the strong operator topology on $U(\mathcal{H})$. Then $U = \Psi^{-1}(V(\Psi(x_0), \varepsilon/2; h_0))$ is an open set in *X*.

Let us see that the open set

$$A = U \times B(h_0; \varepsilon/2) \subset X \times \mathcal{H}$$

has the desired properties. Indeed, for $(x, h) \in A$ we have

$$\begin{aligned} |\psi(x,h) - \psi(x_0,h_0)| \\ &= |\Psi(x)h - \Psi(x_0)h_0| \\ &\leq |\Psi(x)h - \Psi(x)h_0| + |\Psi(x)h_0 - \Psi(x_0)h_0| \\ &= |h - h_0| + |\Psi(x)h_0 - \Psi(x_0)h_0| < \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2}, \end{aligned}$$

and therefore $A \subset \psi^{-1}(B(\Psi(x_0)h_0,\varepsilon))$.

By (**Munkres**, 2000, Thm. 46.11) the reciprocal statement is true whenever $U(\mathcal{H})$ is endowed with the compactopen topology. Since the strong operator topology and the compact-open topology agree on $U(\mathcal{H})$ the lemma follows.

Recall that an orthogonal projector *P* on the Hilbert space consist of an operator $P : H \to H$ such that $P^2 = P$ with the property that ker(*P*) and Im (*P*) are orthogonal. Define the *infinite grassmannian* as follows

$$Gr(\mathcal{H}) := \{ P \in \mathcal{B}(\mathcal{H}) \mid P^2 = P, \ker(P) = \operatorname{Im}(P)^{\perp}, \\ \dim(\ker(P)) = \dim(\operatorname{Im}(P)) = \infty \}$$

and endow it with the strong operator topology.

Since the map

$$\operatorname{Gr}(\mathcal{H}) \to U(\mathcal{H}), \ P \mapsto 2P - 1$$

is an embedding, and $U(\mathcal{H})$ is a Polish group, then $Gr(\mathcal{H})$ is metrizable. Moreover, since $Gr(\mathcal{H})$ is closed in $U(\mathcal{H})$ we have that the infinite grassmannian $Gr(\mathcal{H})$ is a completely metrizable space.

Continuous fields of Hilbert spaces

The following is the definition of Dixmier and Douady **Dixmier and Douady** (1963) applied to the case of Hilbert spaces.

Consider *B* a topological space and denote by $\mathcal{O}(B)$ the algebra of continuous complex valued functions on *B*. Let $(E(z))_{z\in B}$ be a family of Hilbert spaces. For $Y \subset B$, an element in $\prod_{z\in Y} E(z)$, i.e. an assignment *s* defined on *Y* such that $s(z) \in E(z)$ for all $z \in Y$, will be called a *vector field* over *Y*. For *s* a vector field over *Y*, we will denote by ||s|| the map $z \mapsto ||s(z)||$ taking values in \mathbb{R} .

Definition 3.1. (Dixmier and Douady, 1963, Def. 1, pp 228) A *continuous field of Hilbert spaces* \mathscr{E} over the topological space *B* is a family $(E(z))_{z \in B}$ of Hilbert spaces, endowed with a set $\Gamma \subset \prod_{z \in B} E(z)$ of vector fields, such that:

- Γ is a sub- $\mathcal{O}(B)$ -module of $\prod_{z \in B} E(z)$.
- For all z ∈ B and all ξ ∈ E(z), there exists s ∈ Γ such that s(z) = ξ.
- For all $s \in \Gamma$, the map ||s|| is continuous.
- If $s \in \prod_{z \in B} E(z)$ is a vector field such that for all $z \in B$ and every $\varepsilon > 0$ there exists $s' \in \Gamma$ satisfying $||s s'|| \le \varepsilon$ on a neighborhood of z, then $s \in \Gamma$.

The elements of Γ will be called *continuous vector fields* of \mathscr{E} .

Let \mathcal{H} be a Hilbert space and Γ the space of continuous maps from B to \mathcal{H} . For every $z \in B$ define $E(z) := \mathcal{H}$. Then $\mathscr{E} = ((E(z))_{z \in B}, \Gamma)$ is a continuous field of Hilbert spaces and will be called the *constant field* over *B* defined by \mathcal{H} .

Following (**Dixmier and Douady**, 1963, §12), denote by \mathscr{D}_0 the constant field over $Gr(\mathcal{H})$ defined by \mathcal{H} and denote by \mathscr{D} the *canonical field* over $Gr(\mathcal{H})$ defined by the family of vector spaces $(P(\mathcal{H}))_{P \in Gr(\mathcal{H})}$, where Γ is the set of vector fields parametrized by the elements in \mathcal{H}

$$\Gamma = \{ \bar{\xi} \in \prod_{P \in \operatorname{Gr}(\mathcal{H})} P(\mathcal{H}) \mid \xi \in \mathcal{H} \}$$

with $\overline{\xi}(P) := P(\xi)$. Denote by \mathscr{D}^{\perp} the family of vector spaces $(P(\mathcal{H})^{\perp})_{P \in \operatorname{Gr}(\mathcal{H})}$ and note that both \mathscr{D} and \mathscr{D}^{\perp} are sub-fields of \mathscr{D}_0 and moreover $\mathscr{D} \oplus \mathscr{D}^{\perp} \cong \mathscr{D}_0$.

From Theorem 2 in (**Dixmier and Douady**, 1963, §12), it follows that the canonical field over the infinite grassmannian is trivial if $Gr(\mathcal{H})$ has the norm topology. Nevertheless whenever $Gr(\mathcal{H})$ is endowed with the strong operator topology, then the canonical field is not locally trivial (**Dixmier and Douady**, 1963, §16, Cor. 2).

The continuous field \mathscr{D} over $\operatorname{Gr}(\mathcal{H})$ is a universal continuous field for continuous fields of infinite dimensional Hilbert spaces over paracompact spaces. This fact follows from (**Dixmier and Douady**, 1963, §14, Cor. 1) which we quote here: Let \mathscr{E} be a continuous field of infinite dimensional and separable Hilbert spaces over the paracompact space *B*. Then there exist a continuous map $\phi : B \to \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$ such that $\mathscr{E} \cong \phi^* \mathscr{D}$.

Dixmier and Douady show this fact in (**Dixmier and Douady**, 1963, §13, Thm. 3) by constructing vector fields $\{\bar{s}_n\}_{n\in\mathbb{N}} \subset \Gamma$ which are orthogonal over $\phi(B)$ and such that for all $P \in \phi(B)$ the set $\{\bar{s}_n(P)\}_{n\in\mathbb{N}}$ is an orthonormal base for $P(\mathcal{H})$. With these sections at hand Dixmier and Douady furthermore show in (**Dixmier and Douady**, 1963, §15, Thm. 5) that \mathscr{E} is trivializable.

Lemma 3.2. Let *B* be a paracompact space of finite paracompact dimension and $\phi : B \to Gr(\mathcal{H})$ a continuous map. Take $b_0 \in B$ and define the conjugation map

$$\pi_{\phi(b_0)}: U(\mathcal{H}) \longrightarrow \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$$
$$F \longmapsto F\phi(b_0)F^{-1}$$

Then there exist a continuous map $\sigma : B \to U(\mathcal{H})$ such that the following diagram is commutative



Proof. Since $\phi^* \mathscr{D} \oplus \phi^* \mathscr{D}^{\perp} \cong B \times \mathcal{H}$ and $\phi^* \mathscr{D}$ is trivializable, in (**Dixmier and Douady**, 1963, §14, Thm. 4) it is shown that there exist sections $\{\bar{s}_n\}_{n \in \mathbb{N}}$, $\{\bar{t}_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ for $\phi^* \mathscr{D}$ and $\phi^* \mathscr{D}^{\perp}$ respectively which are pointwise orthonormal, i.e. $\{\bar{s}_n(b)\}_{n \in \mathbb{N}}$ is an orthonormal base for $\phi(b)(\mathcal{H})$ and $\{\bar{t}_n(b)\}_{n \in \mathbb{N}}$ is an orthonormal base for $(\mathrm{Id} - \phi(b))(\mathcal{H})$.

Define the map ψ : $B \times \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ by the assignment

$$\psi(b, \bar{s}_n(b_0)) = \bar{s}_n(b)$$
 and $\psi(b, \bar{t}_n(b_0)) = \bar{t}_n(b)$

and note that ψ is continuous. By Lemma 2.1 the map $\sigma : B \to U(\mathcal{H})$ defined by the equation $\psi(b, h) = \sigma(b)h$ is continuous and we have that

$$\sigma(b)\overline{s}_n(b_0) = \overline{s}_n(b)$$
 and $\sigma(b)\overline{t}_n(b_0) = \overline{t}_n(b)$.

Therefore

$$\begin{aligned} \sigma(b)\phi(b_0)\left(\bar{s}_n(b_0)\right) &= \sigma(b)\left(\bar{s}_n(b_0)\right) \\ &= \bar{s}_n(b) \\ &= \phi(b)(\bar{s}_n(b)) \\ &= \phi(b)\sigma(b)(\bar{s}_n(b_0)) \end{aligned}$$

and $\sigma(b)\phi(b_0)(\bar{t}_n(b_0)) = 0 = \phi(b)\sigma(b)(\bar{t}_n(b_0))$. Therefore $\sigma(b)\phi(b_0) = \phi(b)\sigma(b)$ and we have the desired equation $\sigma(b)\phi(b_0)\sigma(b)^{-1} = \phi(b)$.

We have just shown that over paracompact spaces we may construct sections of the conjugation map. But these sections fail to exist whenever the base is the infinite grassmannian.

Lemma 3.3. Let $Q \in Gr(\mathcal{H})$ be a projector. Then, the map

$$\pi_Q: U(\mathcal{H}) \longrightarrow \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$$
$$F \longmapsto FQF^{-1}$$

has no global sections.

Proof. Let us proceed by contradiction. Suppose that there exists a continuous map σ : Gr(\mathcal{H}) \rightarrow $U(\mathcal{H})$ such that $\sigma(P)Q\sigma(P)^{-1} = P$. By Lemma 2.1 we know that the evaluation map $(P,h) \mapsto \sigma(P)h$ is continuous. Hence the map $(P,h) \mapsto (P,\sigma(P)h)$ is also continuous, and its restriction

$$\begin{array}{rcl} \operatorname{Gr}(\mathcal{H}) \times \operatorname{Im}\left(Q\right) & \longrightarrow & \mathscr{D} \\ & (P,h) & \longmapsto & (P,\sigma(P)h) \end{array}$$

is continuous. This map trivializes the canonical field \mathscr{D} over $Gr(\mathcal{H})$ but this contradicts (**Dixmier and Douady**, 1963, §16, Cor. 2) where it is shown that \mathscr{D} is nowhere locally trivial.

The map π_Q is surjective in $Gr(\mathcal{H})$ since any two orthogonal projectors in $Gr(\mathcal{H})$ are conjugate. Therefore the map

 π_0 induces a continuous map

$$U(\mathcal{H})/U(\mathcal{H})_Q \longrightarrow \operatorname{Gr}(\mathcal{H}), \quad [F] \mapsto FQF^{-1}$$

where $U(\mathcal{H})_Q = \{T \in U(\mathcal{H}) \mid TQT^{-1} = Q\}$ is the isotropy group of Q, which is moreover bijective but which is not a homeomorphism. This last statement follows from (**Dixmier and Douady**, 1963, §16, Cor. 2) where it is shown that \mathscr{D} is nowhere locally trivial thus implying that the map π_Q is not a $U(\mathcal{H})_Q$ -principal bundle over $Gr(\mathcal{H})$.

Nevertheless, the existence of extensions that were shown in Lemma 3.2 implies that the pullback $\phi^* U(\mathcal{H})$ over *B* of a fixed map $\phi : B \to \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$ is indeed a $U(\mathcal{H})_{\phi(b_0)}$ principal bundle. If $\phi^* U(\mathcal{H}) = \{(b, F) \in B \times U(\mathcal{H}) \mid \phi(b) = \pi_{\phi(b_0)}(F)\}$ then the map

$$B \times U(\mathcal{H})_{\phi(b_0)} \longrightarrow \phi^* U(\mathcal{H}), \quad (b,T) \mapsto (b,\sigma(b)T)$$

is a $U(\mathcal{H})_{\phi(b_0)}$ -bundle isomorphism.

We conclude this section by stating that $Gr(\mathcal{H})$ is a classifying space for Hilbert space bundles over paracompact spaces. This follows from the following three facts: First, any continuous field of infinite dimensional Hilbert spaces over a paracompact space *B* is isomorphic to the pullback over some map of the canonical field \mathcal{D} over $Gr(\mathcal{H})$. Second, any continuous field of infinite dimensional Hilbert spaces over a paracompact space is trivial. Third, the infinite grassmannian $Gr(\mathcal{H})$ is contractible. Hence any two maps from *B* to $Gr(\mathcal{H})$ are homotopic, and any two continuous fields of infinite dimensional spaces over *B* are isomorphic.

Spaces of unitary representations

Let *G* be a compact Lie group and consider a continuous homomorphism α : $G \rightarrow U(\mathcal{H})$. The homomorphism α induces the structure of a *G* representation to \mathcal{H} denoted by \mathcal{H}_{α} and we have a canonical decomposition of \mathcal{H}_{α} in isotypical components

$$\mathcal{H} \cong \bigoplus_{V \in \mathrm{Irrep}(G)} \mathcal{H}^V_{\alpha}$$

where Irrep(*G*) denotes the isomorphism classes of irreducible representations of *G*, *V* is a representative of its isomorphism class of irreducible representation and \mathcal{H}^V_{α} is the isotypical subspace associated to *V*. By Schur's Lemma, the isotypical part associated to *V* may be defined as the image of the evaluation map, i.e.

$$\mathcal{H}^{V}_{\alpha} = \operatorname{Im} \left(ev : V \otimes \hom_{G}(V, \mathcal{H}_{\alpha}) \to \mathcal{H}_{\alpha} \right).$$
(2) with $ev(v \otimes f) = f(v).$

Definition 4.1. Let α : $G \rightarrow U(\mathcal{H})$ be a continuous homomorphism from a compact Lie group G to $U(\mathcal{H})$. We say that the homomorphism is *stable* if all the isotypical components of \mathcal{H}_{α} are either infinite dimensional or zero dimensional. We will denote the set of stable homomorphisms as $\hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))$.

The set of all homomorphisms hom(G, U(H)) can be endowed with the subspace topology of the compact-open topology of the space

 $map(G, U(\mathcal{H}))$

of continuous maps from *G* to $U(\mathcal{H})$, and a subbase for this topology is given by the family of sets

$$\mathcal{V}(a,\varepsilon;x) := \{\gamma \in \hom(G, U(\mathcal{H})) \mid \|\gamma(g) - a(g)x\| < \varepsilon, \ g \in G\}$$

for $a \in \text{hom}(G, U(\mathcal{H})), \varepsilon > 0$ and $x \in \mathcal{H}$.

On the other hand, since *G* is compact and $U(\mathcal{H})$ is metrizable, we may also endow

 $map(G, U(\mathcal{H}))$

with the supremum metric, i.e. for

$$\alpha, \beta \in \operatorname{map}(G, U(\mathcal{H}))$$

we define

$$d_{sup}(\alpha,\beta) = \sup\{d(\alpha(g),\beta(g)) \mid g \in G\}.$$

By (**Munkres**, 2000, Thm. 46.8) we know that these two topologies agree. Moreover, since $U(\mathcal{H})$ is complete we know that map($G, U(\mathcal{H})$) is also complete (**Munkres**, 2000, Thm. 43.5).

Lemma 4.2. The space hom $(G, U(\mathcal{H}))$ is a complete metric space.

Proof. Since $map(G, U(\mathcal{H}))$ is complete we may take a convergent sequence $\{\alpha_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ of homomorphisms which converge to $\alpha \in map(G, U(\mathcal{H}))$. We know that

$$\alpha_n(g)\alpha_n(h) \to \alpha(g)\alpha(h)$$

and $\alpha_n(gh) \rightarrow \alpha(gh)$, and since $\alpha_n(g)\alpha_n(h) = \alpha_n(gh)$ we conclude that

$$\alpha(g)\alpha(h) = \alpha(gh).$$

Therefore α is also a homomorphism and hence $hom(G, U(\mathcal{H}))$ is complete.

Lemma 4.3. The space of stable homomorphisms $\operatorname{hom}_{\operatorname{st}}(G, U(\mathcal{H}))$ is not closed in $\operatorname{hom}(G, U(\mathcal{H}))$.

Proof. We will show a convergent sequence in $\text{hom}_{\text{st}}(S^1, U(\mathcal{H}))$ whose limit is not stable. The argument for any compact Lie group is similar.

Let $\{e_j\}_{j\in\mathbb{N}}$ be an orthonormal base of \mathcal{H} . Define the homomorphisms $\alpha_k : S^1 \to U(\mathcal{H})$ by the assignment

$$\alpha_k(e^{i\theta})(e_{2j}) = e_{2j}$$

and

$$\alpha_k(e^{i\theta})(e_{2j+1}) = \begin{cases} e_{2j+1} & \text{if } 0 < j < k\\ e^{i\theta}e_{2j+1} & \text{if } j \ge k \text{ or } j = 0 \end{cases}$$

and note that the α_k 's are stable. Since

k

$$\lim_{k \to \infty} \alpha_k(e^{i\theta})e_j = e_j$$

for j > 1 and

$$\lim_{\to\infty}\alpha_k(e^{i\theta})e_1=e^{i\theta}e_1$$

we know that $\lim_{k\to\infty} \alpha_k$ does not belong to the space of stable homomorphisms.

Lemma 4.4. The space $\text{hom}_{\text{st}}(G, U(\mathcal{H}))$ of stable homomorphisms is not open in $\text{hom}(G, U(\mathcal{H}))$.

Proof. We will prove that for any basic open set $\mathcal{V} \subset \text{hom}(G, U(\mathcal{H}))$ and $a \in \mathcal{V}$ a stable homomorphism, there exist a non stable homomorphism $b \in \mathcal{V}$.

Fix
$$\varepsilon > 0$$
 and $x_1, \dots, x_n \in \mathcal{H}$. Define
 $\mathcal{V} = \mathcal{V}(a, \varepsilon; x_1, \dots, x_n)$
 $= \{ \gamma \in \hom(G, U(\mathcal{H})) \mid \|\gamma(g)x_k - a(g)x_k\| < \varepsilon, \forall g \in G, \forall k = 1, \dots, n \}$

and let $H = V_1 \oplus \cdots \oplus V_n$ be the direct sum of the irreducible representations V_k of G, such that $x_k \in V_k$ for each k = 1, ..., n. It follows that H is *a*-invariant and finite dimensional.

Let $b : G \to U(\mathcal{H})$ be given by

$$b(g)x = \begin{cases} a(g)x & x \in H, \\ x & x \in \mathcal{H} \ominus H \end{cases}$$

Then $b \in \mathcal{V}$ by construction, but *a* and *b* are not unitary equivalent, i.e. *b* is not stable.

Lemma 4.5. The space $\text{hom}_{\text{st}}(G, U(\mathcal{H}))$ of stable homomorphisms is dense in $\text{hom}(G, U(\mathcal{H}))$.

Proof. Let $\alpha \in \text{hom}(G, U(\mathcal{H}))$ be a homomorphism and let $\mathcal{V}(\alpha, \varepsilon; x_1, \ldots, x_n)$ be a basic open set based at $\alpha \in \mathcal{V}$. Consider the finite dimensional and α -invariant space $H = V_1 \oplus \cdots \oplus V_n$ given by the direct sum of the irreducible representations V_k of G, such that $x_k \in V_k$ for each $k = 1, \ldots, n$. If ψ is an isometric isomorphism $\psi: L^2(G) \otimes L^2([0,1]) \to \mathcal{H} \ominus H$, then

$$b(g)x = \begin{cases} \alpha(g)x & x \in H \\ \psi \alpha(g)\psi^{-1}x & x \in \mathcal{H} \ominus H \end{cases}$$

is a stable homomorphism and $b \in \mathcal{V}$.

Definition 4.6. Let $C \subset \text{Irrep}(G)$ be a choice of irreducible representations of the group *G*. Define

$$\hom(G, \mathcal{U}(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} := \\ \{ \alpha \in \hom(G, \mathcal{U}(\mathcal{H})) \mid \dim(\mathcal{H}^{V}_{\alpha}) = 0 \text{ for } V \notin \mathcal{C} \}$$

to be the space of homomorphisms which induce representations where only the irreducible representations in C appear. Define

$$\hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} := \\ \hom(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} \bigcap \hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H})).$$

We have therefore

$$\begin{aligned} &\hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} := \\ & \{ \alpha \in \hom(G, U(\mathcal{H})) \mid \dim(\mathcal{H}^{V}_{\alpha}) = 0 \text{ for } V \notin \mathcal{C} \\ & \text{and } \dim(\mathcal{H}^{V}_{\alpha}) = \infty \text{ for } V \in \mathcal{C} \}. \end{aligned}$$

The spaces $\hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$ are neither closed nor open, nevertheless the action by conjugation of $U(\mathcal{H})$ on $\hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$ is transitive and we are interested in studying the properties of this action.

Definition 4.7. Take a stable homomorphism $\alpha \in \text{hom}_{\text{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$. Define the conjugation map

$$\pi_{\alpha}: U(\mathcal{H}) \to \hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}, \ F \mapsto F \alpha F^{-1}.$$

The map π_{α} is continuous and is surjective. Any other stable homomorphism

$$\alpha' \in \hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$$

induces an isomorphism $\mathcal{H} \cong \bigoplus_{V \in \mathcal{C}} \mathcal{H}_{\alpha'}^V$. For each $V \in \mathcal{C}$ choose a *G*-equivariant unitary isomorphism $F^V : \mathcal{H}_{\alpha}^V \xrightarrow{\cong} \mathcal{H}_{\alpha'}^V$ and assemble them into a *G*-equivariant unitary automorphism

$$F := \bigoplus_{V \in \mathcal{C}} F^V : \mathcal{H} \xrightarrow{\cong} \mathcal{H}$$

By construction the unitary automorphism satisfies $F\alpha(g) = \alpha'(g)F$ for all $g \in G$, and therefore $F\alpha F^{-1} = \alpha'$.

The surjectivity of the map π_{α} implies that the map

$$U(\mathcal{H})/U(\mathcal{H})_{\alpha} \longrightarrow \hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$$
$$[F] \mapsto F\alpha F^{-1}$$

is a continuous map which is moreover bijective, where $U(\mathcal{H})_{\alpha} := \{T \in U(\mathcal{H}) \mid T\alpha T^{-1} = \alpha\}$ is the isotropy group of α . We will show that this map is not a homeomorphism, thus implying that the π_{α} is not a $U(\mathcal{H})_{\alpha}$ -principal bundle. Nevertheless, the pullback of π_{α} for maps defined on paracompact spaces is indeed a $U(\mathcal{H})_{\alpha}$ -principal bundle.

Theorem 4.8. Suppose that C contains the trivial representation, then the conjugation map π_{α} : $U(\mathcal{H}) \rightarrow \text{hom}_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{C}$ has no sections.

Proof. Note that in the case that $G = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ we have a homeomorphism

$$\hom_{\mathrm{st}}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, U(\mathcal{H})) \xrightarrow{\cong} \mathrm{Gr}(\mathcal{H})$$

where the homomorphism

$$\beta \in \hom_{\mathrm{st}}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, U(\mathcal{H}))$$

is mapped to the orthogonal projector

$$\frac{1}{2}\left(\beta(1)+\beta(-1)\right).$$

The same proof of Lemma 3.3 shows that the map π_{α} : $U(\mathcal{H}) \rightarrow \hom_{st}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}, U(\mathcal{H}))$ has no sections.

The proof of the general case is based on the non existence of sections for the canonical field over the infinite grassmannian. We just need to find an appropriate injective map from $Gr(\mathcal{H})$ to $hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$.

Choose a representation $V \in C$ different from the trivial representation. Take the isotypical decomposition of $\mathcal{H} \cong \bigoplus_{W \in C} \mathcal{H}^W_{\alpha}$ defined by α . Consider the infinite grassmannian

$$\operatorname{Gr}(\operatorname{hom}_{G}(V, \mathcal{H}^{V}_{\alpha}))$$

of the Hilbert space $\hom_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha})$ and for each $Z \in$ $Gr(\hom_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha}))$ denote by $ev(V \otimes Z)$ the subspace of \mathcal{H}^V_{α} defined by the image of $V \otimes Z$ under the evaluation map

$$ev: V \otimes \hom_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha}) \to \mathcal{H}^V_{\alpha}$$

with $ev(v \otimes f) = f(v)$ that was previously defined in (2).

Denote by $ev(V \otimes Z)^{\perp_{\mathcal{H}_{\alpha}^{V}}}$ the orthogonal complement of $ev(V \otimes Z)$ in \mathcal{H}_{α}^{V} , i.e

$$ev(V\otimes Z)\oplus ev(V\otimes Z)^{\perp_{\mathcal{H}_{\alpha}^{V}}}\cong \mathcal{H}_{\alpha}^{V}$$

and define the map

$$\Phi: \operatorname{Gr}(\hom_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha})) \to \hom_{\operatorname{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$$
$$Z \mapsto \Phi(Z)$$

with

$$\Phi(Z)(g)(v \oplus v') := \alpha(g)v \oplus v'$$

where

$$v \in \left(ev(V \otimes Z) \oplus \bigoplus_{W \in \mathcal{C}, W \neq V} \mathcal{H}^V_{\alpha}
ight)$$
 ,

 $v' \in ev(V \otimes Z)^{\perp_{\mathcal{H}_{\alpha}^{V}}}$ and $g \in G$.

Note that the homomorphism $\Phi(Z)$ only disagrees with α on the subspace $ev(V \otimes Z)^{\perp_{\mathcal{H}^V_{\alpha}}}$, that the isotypical subspace of the homomorphism $\Phi(Z)$ associated to *V* is precisely $ev(V \otimes Z)$, i.e.

$$\mathcal{H}_{\Phi(Z)}^{V} = ev(V \otimes Z),$$

and that

$$\hom_G(V, \mathcal{H}_{\Phi(Z)}^V) = Z.$$

The map Φ is continuous since it can be defined as the composition of projections, and it is moreover injective.

Choose a base point $Z_0 \in \operatorname{Gr}(\operatorname{hom}_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha}))$ and let us suppose that the map $\pi_{\Phi(Z_0)} : U(\mathcal{H}) \to$ $\operatorname{hom}_{\operatorname{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}, F \mapsto F\Phi(Z_0)F^{-1}$ has a section σ : $\operatorname{hom}_{\operatorname{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} \to U(\mathcal{H})$. Hence we would have that for all $g \in G$ the following equality holds

$$\sigma(\Phi(Z))\left(\Phi(Z_0)(g)\right) = \left(\Phi(Z)(g)\right)\sigma(\Phi(Z)),$$

which implies that $\sigma(\Phi(Z))$ induces a *G*-equivariant unitary isomorphism between the isotypical components

$$\sigma(\Phi(Z))|_{\mathcal{H}^{W}_{\Phi(Z_{0})}}:\mathcal{H}^{W}_{\Phi(Z_{0})}\stackrel{\cong}{\to}\mathcal{H}^{W}_{\Phi(Z)}$$

and in particular it induces a G-equivariant isomorphism

$$\sigma(\Phi(Z))|_{ev(V\otimes Z_0)}: ev(V\otimes Z_0) \xrightarrow{\cong} ev(V\otimes Z).$$

Denote by \mathscr{D} the canonical continuous field of Hilbert spaces over $\operatorname{Gr}(\operatorname{hom}_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha}))$ defined as follows:

$$\mathcal{D} := \{ (Z, f) \in Gr(\hom_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha})) \times \hom_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha}) \mid f \in Z \},\$$

and construct the following map:

$$\theta: \operatorname{Gr}(\hom_G(V, \mathcal{H}^V_{\alpha})) \times Z_0 \to \mathscr{D}$$
$$(Z, f_0) \mapsto (Z, \sigma(\Phi(Z)) \circ f_0).$$

Note that the homomorphism $\sigma(\Phi(Z)) \circ f_0$ belongs to Z, since the image of f lies in $\mathcal{H}^V_{\Phi(Z_0)}$ and the unitary isomorphism

$$\sigma(\Phi(Z))|_{\mathcal{H}^{V}_{\Phi(Z_{0})}}:\mathcal{H}^{V}_{\Phi(Z_{0})} \xrightarrow{\cong} \mathcal{H}^{V}_{\Phi(Z)}$$

is G-equivariant; hence

$$\sigma(\Phi(Z)) \circ f_0 \in \hom_G(V, \mathcal{H}_{\Phi(Z)}^V) = Z.$$

Moreover the map θ is continuous since σ is continuous, and its inverse map is simply $\theta^{-1}(Z, f) = (Z, \sigma(\Phi(Z))^{-1}f)$. Therefore θ would be a trivialization of the canonical field \mathscr{D} which contradicts (**Dixmier and Douady**, 1963, §16, Cor. 2) where it is shown that \mathscr{D} is nowhere locally trivial.

Then the section σ cannot exist and the theorem follows.

Theorem 4.9. Let *K* be an abelian compact Lie group, *B* a paracompact space of finite paracompact dimension, with base point $b_0 \in B$ and $f : B \to \hom_{st}(K, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$ a continuous map with $\mathcal{C} \subset \operatorname{Irrep}(K)$. Then there exist an extension $\sigma : B \to U(\mathcal{H})$ that makes the following diagram commutative



Proof. Since all irreducible representations of *K* are 1-dimensional, let us encode the information of each irreducible $V \in \text{Irrep}(K)$ by a homomorphism $\chi_V : K \rightarrow S^1 \subset \mathbb{C}^*$. Choose a normalized left and right invariant measure on *K*, and for any $\alpha \in \text{hom}_{\text{st}}(K, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$ define the operator

$$\psi_V(\alpha): \mathcal{H} \to \mathcal{H}, \ h \mapsto \int_K \alpha(k) \chi_V(k^{-1}) h \, \mathrm{d}k.$$

Whenever $h \in \mathcal{H}_{\alpha}^{V}$ we have that $\psi_{V}(\alpha)h = h$, and whenever $h \in \mathcal{H}_{\alpha}^{W}$ for $W \neq V$ then $\psi_{V}(\alpha)h = 0$. Therefore the operator $\psi_{V}(\alpha)$ is equivalent to the orthogonal projector $P_{\mathcal{H}_{\alpha}^{V}}$ that projects \mathcal{H} to \mathcal{H}_{α}^{V} . For $V \in \mathcal{C}$ the assignment ψ_{V} defines a map

$$\psi_V : \hom_{\mathrm{st}}(K, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} \to \mathrm{Gr}(\mathcal{H})$$

 $\alpha \mapsto \psi_V(\alpha) = P_{\mathcal{H}}$

which is continuous since the integration is over a compact Lie group.

Consider the composition $\psi_V \circ f : B \to \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$ and note that $(\psi_V \circ f)^* \mathscr{D}$ is trivializable. By (**Dixmier and Douady**, 1963, §14, Thm. 4) we know that there exist orthogonal sections $\{s_n^V\}_{n \in \mathbb{N}}$ of $(\psi_V \circ f)^* \mathscr{D}$ which satisfy $\bar{s}_n^V(b) \in \mathcal{H}_{\psi_V(f(b))}^V$ and that moreover the vectors $\{s_n^V(b)\}_{n \in \mathbb{N}}$ are an orthogonal base of $\mathcal{H}_{\psi_V(f(b))}^V$.

Define the map ϕ : $B \times H \rightarrow H$ by the assignment

$$\phi(b, s_n^V(b_0)) = s_n^V(b)$$

where *V* runs over the irreducible representations in *C* and *H* is viewed as $\mathcal{H} \cong \bigoplus_{V \in \mathcal{C}} \mathcal{H}_{f(b_0)}^V$ in the source and as $\mathcal{H} \cong \bigoplus_{V \in \mathcal{C}} \mathcal{H}_{f(b)}^V$ in the target. Since the sections s_n^V are continuous, the map ϕ is continuous.

By Lemma 2.1 the map $\sigma : B \to U(\mathcal{H})$ defined by the equation $\sigma(b)h := \phi(b,h)$ is continuous and we have that

$$\sigma(b)s_n^V(b_0) = s_n^V(b)$$

for all $V \in C$. In particular we have that

$$\sigma(b)P_{\mathcal{H}_{f(b_0)}^V}\sigma(b)^{-1} = P_{\mathcal{H}_{f(b)}^V}$$

and therefore

$$\sigma(b)\psi_V(f(b_0))\sigma(b)^{-1} = \psi_V(f(b))$$

for all $V \in C$.

Define the map

$$\Psi: \hom_{\mathsf{st}}(K, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} \to \prod_{V \in \mathcal{C}} \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$$
$$\alpha \mapsto \prod_{V \in \mathcal{C}} \psi_{V}(\alpha)$$

and note that the argument above implies that σ makes the following diagram commutative



where $\pi_{\psi_V(f(b_0))} : U(\mathcal{H}) \to \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$ is the conjugation map $\pi_{\psi_V(f(b_0))}(F) = F\psi_V(f(b_0))F^{-1}$.

Finally note that the map

$$\Psi: \hom_{\mathsf{st}}(K, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} \to \prod_{V \in \mathcal{C}} \operatorname{Gr}(\mathcal{H})$$

is injective since for abelian groups the isotypical spaces determine the homomorphism. Therefore the following diagram is commutative

and the theorem follows.

Corollary 4.10. Let *G* be a compact and connected Lie group, *B* a paracompact space with finite paracompact dimension, with base point $b_0 \in B$ and $f : B \to \hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$ a continuous map with $\mathcal{C} \subset \operatorname{Irrep}(G)$. Then there exist an extension $\sigma : B \to U(\mathcal{H})$ that makes the following diagram commutative



Proof. Let *K* be a maximal abelian subgroup of *G* and denote by $\iota : K \to G$ the inclusion. Recall that any representation of the group *G* is uniquely determined by its

restriction to a maximal abelian subgroup, and therefore the restriction map

$$\iota^* : \hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}} \hookrightarrow \hom_{\mathrm{st}}(K, U(\mathcal{H}))_{\iota^*\mathcal{C}}$$

is injective. Here we have denoted by $\iota^* \mathcal{C} \subset \operatorname{Irrep}(K)$ the set of irreducible representations in *K* which appear as restrictions of representations *V* of *C*.

By Theorem 4.9 we know that there exists σ for the composition map

$$\iota^* \circ f : B \to \hom_{\mathrm{st}}(K, U(\mathcal{H}))_{\iota^*\mathcal{C}},$$

and since ι^* is injective, the following diagram commutes

and the corollary follows.

The previous results have the following consequence:

Theorem 4.11. Let G be a compact Lie group which moreover is connected or abelian, and $C \subset \text{Irrep}(G)$ a choice of irreducible representations. Then the space $\hom_{\text{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{C}$ is weakly homotopy equivalent to a point.

Proof. We know that $\hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$ is connected since the conjugation map

$$\pi_{\alpha}: U(\mathcal{H}) \to \hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$$
$$F \mapsto F \alpha F^{-1}$$

is surjective for any choice of $\alpha \in \hom_{st}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}$.

Take any base point map

 \Box

$$f: (S^n, *) \to (\hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}, \alpha)$$

and note that by Theorem 4.9 and Corollary 4.10 there exists $\sigma : (S^n, *) \rightarrow (U(\mathcal{H}), \mathrm{Id})$ such that $f = \pi_{\alpha} \circ \sigma$. Since $U(\mathcal{H})$ is contractible by (**Dixmier and Douady**, 1963, §11, Lem. 3), there exists $\tilde{\sigma} : (B^{n+1}, *) \rightarrow (U(\mathcal{H}), \mathrm{Id})$ such that $\tilde{\sigma}|_{S^n} = \sigma$. Hence we have that

$$\pi_{\alpha} \circ \widetilde{\sigma} : (B^{n+1}, *) \to (\hom_{\mathrm{st}}(G, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{C}}, \alpha)$$

satisfies $\pi_{\alpha} \circ \tilde{\sigma}|_{S^n} = f$ and therefore the homotopy groups of hom_{st}(*G*, *U*(\mathcal{H}))_{*C*} are all trivial.

1

Spaces of projective unitary representations

Let \mathcal{H} be a separable and infinite dimensional Hilbert space. Let $U(\mathcal{H})$ denote the group of unitary operators of \mathcal{H} and let $PU(\mathcal{H})$ be the group of projective unitary operators, defined as the quotient of $U(\mathcal{H})$ by its center,

$$PU(\mathcal{H}) = \frac{U(\mathcal{H})}{\{\zeta \cdot \mathrm{Id} \mid |\zeta| = 1\}} = U(\mathcal{H})/S^{1}$$

where the center $Z(U(\mathcal{H}))$ is identified with S^1 . Then $PU(\mathcal{H})$ fits in the following short exact sequence of groups

$$\rightarrow S^1 \hookrightarrow U(\mathcal{H}) \xrightarrow{\pi} PU(\mathcal{H}) \rightarrow 1$$

and moreover in (**Simms**, 1970, Thm. 1) it is shown that the above sequence is a S^1 -principal bundle; in other words, the quotient map $U(\mathcal{H}) \xrightarrow{\pi} PU(\mathcal{H})$ has local cross sections.

The group of projective unitary operators may be endowed with the strong operator topology, and in (**Simms**, 1970, Thm. 1) it is shown that this topology agrees with the quotient topology. Since S^1 acts on $U(\mathcal{H})$ by isometries, we may endow the group $PU(\mathcal{H})$ with the metric defined by the distance between the orbits, i.e. for $T, U \in PU(\mathcal{H})$ define

$$\begin{split} \langle \langle T, U \rangle \rangle &:= \\ \min\{ \langle \widetilde{T}, \widetilde{U} \rangle \colon \widetilde{T} \in \pi^{-1}(T), \widetilde{U} \in \pi^{-1}(U) \}. \end{split}$$

Let *G* be a compact Lie group and let

$$\alpha: G \to PU(\mathcal{H})$$

be a continuous homomorphism. The homomorphism α defines a projective and unitary representation of *G* on the projective Hilbert space $\mathbb{P}\mathcal{H} := \mathcal{H} - \{0\}/\mathbb{C}^*$.

Every homomorphism $\alpha : G \to PU(\mathcal{H})$ defines a group $\widetilde{G}_{\alpha} := \alpha^* U(\mathcal{H})$ as the pullback of $U(\mathcal{H})$ under α . The group \widetilde{G}_{α} is a S^1 -central extension of the group G and fits into the diagram

where the bottom square is a pullback square, $\tilde{\alpha} : \tilde{G}_{\alpha} \to U(\mathcal{H})$ is the induced continuous homomorphism and $p : \tilde{G}_{\alpha} \to G$ is the projection homomorphism. 10 Since the kernel of the homomorphism

$$p:\widetilde{G}_{\alpha}\to G$$

acts on \mathcal{H} by multiplication, we only need to consider irreducible representations of the group \widetilde{G}_{α} where the kernel of *p* acts by multiplication. Consider the set

$$\mathcal{S}(\widetilde{G}_{\alpha}) := \{ V \in \operatorname{Irrep}(\widetilde{G}_{\alpha}) \mid \ker(p : \widetilde{G}_{\alpha} \to G) \\ \text{acts by multiplication on } V \}$$

and make the following definition:

Definition 5.1. A continuous homomorphism α : $G \rightarrow PU(\mathcal{H})$ will be called *stable* whenever the induced homomorphism $\tilde{\alpha} : \tilde{G}_{\alpha} \rightarrow U(\mathcal{H})$ belongs to $\operatorname{hom}_{\mathrm{st}}(\tilde{G}_{\alpha}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\tilde{G}_{\alpha})}$. Denote the set of stable homomorphisms from *G* to $PU(\mathcal{H})$ by $\operatorname{hom}_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))$.

Since *G* is compact and PU(H) is a metric space, the set of stable homomorphisms

$$\hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))$$

may be endowed with the supremum metric, i.e. for $\alpha, \beta \in \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$ let

$$\langle \langle \alpha, \beta \rangle \rangle := \sup \{ \langle \langle \alpha(g), \beta(g) \rangle \rangle \mid g \in G \}.$$

By (**Munkres**, 2000, Thm. 46.8) this metric induces the compact-open topology on $hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))$.

Recall that a S^1 -central extension of a Lie group G is an extension \tilde{G} of G which fits in the short exact sequence of Lie groups

$$1 \to S^1 \to \widetilde{G} \xrightarrow{p} G \to 1$$

and such that S^1 is a subgroup of the center $Z(\tilde{G})$. Since Lie groups are locally compact and S^1 is compact, the projection map $\tilde{G} \xrightarrow{p} G$ is moreover a S^1 -principal bundle.

Two
$$S^1$$
-central extensions

$$\widetilde{G}_0 \xrightarrow{p_0} G$$
 and $\widetilde{G}_1 \xrightarrow{p_1} G$

of *G* are isomorphic as S^1 -central extensions, if there exist an isomorphism of groups

$$\phi: \widetilde{G}_0 \stackrel{\cong}{\to} \widetilde{G}_1$$

such that $p_1 \circ \phi = p_0$. Denote by $\text{Ext}(G, S^1)$ the set of isomorphism classes of S^1 -central extensions of *G* and denote by $[\widetilde{G}]$ the isomorphism class of an extension.

Proposition 5.2. Let G be a compact Lie group. Then the canonical map

$$\operatorname{hom}_{\operatorname{st}}(G, PU(\mathcal{H})) \to \operatorname{Ext}(G, S^1), \ \alpha \mapsto [\widetilde{G}_{\alpha}]$$

induces an isomorphism of sets at the level of the conjugacy classes of stable homomorphisms, i.e.

$$\hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H})) / PU(\mathcal{H}) \cong \mathrm{Ext}(G, S^1).$$

Proof. Let us show first that every isomorphism class of a S^1 -central extension arises as the pullback of a stable homomorphism from G to $PU(\mathcal{H})$. Consider an extension $\widetilde{G} \to G$, take the Hilbert space $\mathcal{H}' := L^2(\widetilde{G}) \otimes L^2([0,1])$ where L^2 denotes square integrable functions and take the standard action of \widetilde{G} on $L^2(\widetilde{G})$. By Peter-Weyl's Theorem the Hilbert space \mathcal{H}' contains each irreducible representations of \widetilde{G} infinitely number of times. Take the isotypical part corresponding to the irreducible representations in $S(\widetilde{G})$

$$\mathcal{H} := \bigoplus_{V \in \mathcal{S}(\widetilde{G})} \mathcal{H}'^V$$

and note that the induced action of \widetilde{G} on \mathcal{H} is unitary and that the kernel of the projection $\widetilde{G} \to G$ acts on \mathcal{H} by multiplication. Therefore the action $\widetilde{G} \to U(\mathcal{H})$ fits into the diagram

$$\begin{array}{c} S^1 \xrightarrow{\cong} S^1 \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \widetilde{G} \xrightarrow{} U(\mathcal{H}) \end{array}$$

thus inducing a homomorphism $G \to PU(\mathcal{H})$. Therefore all S^1 -central extensions of G appear as pullbacks of stable homomorphisms from G to $PU(\mathcal{H})$.

Now let us consider two homomorphisms $\alpha, \beta \in \lim_{st} (G, PU(\mathcal{H}))$ which are conjugate, i.e. there exist $F \in PU(\mathcal{H})$ such that $F\alpha(g)F^{-1} = \beta(g)$ for all $g \in G$. Hence the groups $\tilde{G}_{\alpha} := \{(g,T) \in G \times U(\mathcal{H}) \mid \alpha(g) = \pi(T)\}$ and $\tilde{G}_{\beta} := \{(g,T) \in G \times U(\mathcal{H}) \mid \beta(g) = \pi(T)\}$ are isomorphic as S^1 -central extensions; the map $\tilde{G}_{\alpha} \to \tilde{G}_{\beta}$, $(g,T) \mapsto (g,FTF^{-1})$ is the desired isomorphism. Denoting by $\lim_{st} (G,PU(\mathcal{H})))/PU(\mathcal{H})$ the set of conjugacy classes of stable homomorphisms we obtain a surjective map

$$\hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H})) / PU(\mathcal{H}) \twoheadrightarrow \mathrm{Ext}(G, S^1).$$

Let us now suppose that the groups \widetilde{G}_{α} and \widetilde{G}_{β} are isomorphic as S^1 -central extensions of G. The homomorphisms $\widetilde{\alpha} : \widetilde{G}_{\alpha} \to U(\mathcal{H})$ and $\widetilde{\beta} : \widetilde{G}_{\beta} \to U(\mathcal{H})$ induce decompositions of \mathcal{H} by isotypical components $\mathcal{H} \cong \bigoplus_{V \in S(\widetilde{G}_{\alpha})} \mathcal{H}^V_{\alpha}$ and $\mathcal{H} \cong \bigoplus_{W \in S(\widetilde{G}_{\beta})} \mathcal{H}^W_{\beta}$. The isomorphism $\phi : \widetilde{G}_{\alpha} \xrightarrow{\cong} \widetilde{G}_{\beta}$ induces a canonical isomorphism between the sets $S(\widetilde{G}_{\alpha})$ and $S(\widetilde{G}_{\beta})$, and therefore there exist a unitary isomorphism between $\bigoplus_{V \in S(\widetilde{G}_{\alpha})} \mathcal{H}^V_{\alpha}$ and $\bigoplus_{W \in S(\widetilde{G}_{\beta})} \mathcal{H}^W_{\beta}$ which is compatible with the actions of the groups and the isomorphism ϕ . Therefore there exists a unitary isomorphism $F \in U(\mathcal{H})$ such that $F\widetilde{\alpha}F^{-1} = \widetilde{\beta}$ and this implies that α and β are conjugate. Hence we have an isomorphism of sets $\hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))/PU(\mathcal{H}) \xrightarrow{\cong}$

Take representatives \tilde{G} for each isomorphism class of S^1 -

 $\operatorname{Ext}(G, S^1).$

central extension and denote by

$$\hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}} := \{ \alpha \in \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H})) \mid \\ \widetilde{G}_{\alpha} \cong \widetilde{G} \text{ as } S^1 \text{-central extensions of } G \}$$

the space of stable homomorphisms from *G* to $PU(\mathcal{H})$ which define a *S*¹-central extension isomorphic to \tilde{G} . In view of Proposition 5.2 we have that

$$\begin{aligned} \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H})) = \\ & \bigsqcup_{[\widetilde{G}] \in \mathrm{Ext}(G, S^1)} \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}. \end{aligned}$$

Consider $\tilde{\alpha} \in \hom_{st}(\tilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\tilde{G})}$ and note that by definition of the set of irreducible representations $\mathcal{S}(\tilde{G})$, the homomorphism $\tilde{\alpha}$ makes the following diagram of homomorphisms commutative



Therefore $\tilde{\alpha}$ induces a continuous homomorphism $\Psi(\tilde{\alpha}) \in \text{hom}_{\text{st}}(G, PU(\mathcal{H}))$, and we may define a map of sets

$$\Psi: \hom_{\mathsf{st}}(\tilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\tilde{G})} \to \hom_{\mathsf{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\tilde{G}}$$
$$\widetilde{\alpha} \mapsto \Psi(\widetilde{\alpha}).$$

Now consider the abelian group $hom(G, S^1)$ of continuous homomorphisms from *G* to S^1 endowed with the group structure given by pointwise multiplication. For every

$$\widetilde{\alpha} \in \hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})}$$

and $\eta \in \text{hom}(G, S^1)$ define $\eta \cdot \tilde{\alpha} : \tilde{G} \to U(\mathcal{H})$ by

$$\eta \cdot \widetilde{\alpha}(\widetilde{g}) := \eta(\pi(\widetilde{g}))\widetilde{\alpha}(\widetilde{g}).$$

The homomorphism $\eta \cdot \tilde{\alpha}$ belongs to

 $\hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})}$

since the action of ker($\widetilde{G} \to G$) is unaffected and therefore the representations that $\eta \cdot \widetilde{\alpha}$ define belong to $S(\widetilde{G})$.

11

 \square

Therefore we have an action of $\hom(G, S^1)$ on $\hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{S(\widetilde{G})}$ as follows:

$$\hom(G, S^{1}) \times \hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})} \to \\ \hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})} \\ (\eta, \widetilde{\alpha}) \mapsto \eta \cdot \widetilde{\alpha}.$$

We claim the following theorem.

Theorem 5.3. Let G be a compact Lie group which is connected or abelian, and let \tilde{G} be a S¹-central extension of G. Let $S(\tilde{G})$ be the set of isomorphism classes of irreducible representations of \tilde{G} on which ker($\tilde{G} \to G$) acts by multiplication of scalars. Then the map

$$\Psi: \hom_{st}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})} \to \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}$$
$$\widetilde{\alpha} \mapsto \Psi(\widetilde{\alpha})$$

is a hom (G, S^1) -principal bundle, and in particular a local homeomorphism.

Proof. We already know that Ψ is surjective; the space $\hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}$ consists of the homomorphisms α such that $\widetilde{G}_{\alpha} \cong \widetilde{G}$ as S^1 -principal bundles. The continuity of Ψ follows from the inequality $\langle \widetilde{\alpha}, \widetilde{\beta} \rangle \geq \langle \langle \Psi(\widetilde{\alpha}), \Psi(\widetilde{\beta}) \rangle \rangle$ since by definition

$$\begin{split} \langle \langle \Psi(\widetilde{\alpha}), \Psi(\widetilde{\beta}) \rangle \rangle &= \sup_{g \in G} \langle \langle \Psi(\widetilde{\alpha})(g), \Psi(\widetilde{\beta})(g) \rangle \rangle \\ &\leq \sup_{\widetilde{g} \in \widetilde{G}} \langle \widetilde{\alpha}(\widetilde{g}), \widetilde{\beta}(\widetilde{g}) \rangle = \langle \widetilde{\alpha}, \widetilde{\beta} \rangle. \end{split}$$

Take now $\tilde{\alpha}, \tilde{\alpha}'$ such that $\Psi(\tilde{\alpha}) = \Psi(\tilde{\alpha}')$. Note that for all $\tilde{g} \in \tilde{G}$ the product $\tilde{\alpha}(\tilde{g})\tilde{\alpha}'(\tilde{g})^{-1}$ belongs to $S^1 \subset U(\mathcal{H})$ and therefore we can define the assignment

$$\widetilde{\eta}: \widetilde{G} \to S^1, \ \widetilde{g} \mapsto \widetilde{\alpha}(\widetilde{g})\widetilde{\alpha}'(\widetilde{g})^{-1}.$$

This assignment is indeed a homomorphism since we have the equalities

$$\begin{split} \widetilde{\eta}(\widetilde{g}\widetilde{h}) &= \widetilde{\alpha}(\widetilde{g}\widetilde{h})\widetilde{\alpha}'(\widetilde{g}\widetilde{h})^{-1} \\ &= \widetilde{\alpha}(\widetilde{g})\widetilde{\alpha}(\widetilde{h})\widetilde{\alpha}'(\widetilde{h})^{-1}\widetilde{\alpha}'(\widetilde{g})^{-1} \\ &= \widetilde{\alpha}(\widetilde{g})\widetilde{\eta}(\widetilde{h})\widetilde{\alpha}'(\widetilde{g})^{-1} \\ &= \widetilde{\eta}(\widetilde{g})\widetilde{\eta}(\widetilde{h}) \end{split}$$

which follow from the fact that $\tilde{\eta}(\tilde{h})$ lies on the center of $U(\mathcal{H})$. The homomorphism $\tilde{\eta}$ is trivial once restricted to $\ker(\tilde{G} \to G)$ and therefore it induces a homomorphism $\eta : G \to S^1$ such that $\tilde{\eta}(\tilde{g}) = \eta(\pi(\tilde{g}))$. Therefore we obtain the equation $\eta \cdot \tilde{\alpha}' = \tilde{\alpha}$ which implies that Ψ induces

a bijective map at the level of sets

$$\hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})} / \hom(G, \mathcal{S}^1) \stackrel{=}{\to} \\ \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}.$$
(3)

We need to show now that Ψ is a local homeomorphism. Note that for any non trivial $\eta \in \text{hom}(G, S^1)$ and **1** the trivial homomorphism, we have that $\langle \mathbf{1}, \eta \rangle \geq \sqrt{2}$ since any non trivial homomorphism must take at least one value in the subset $\{e^{it} \mid \frac{\pi}{2} < t < \frac{3\pi}{2}\} \subset S^1$. This implies that for any $\tilde{\alpha} \in \text{hom}_{\text{st}}(\tilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\tilde{G})}$ and any $\eta \in \text{hom}(G, S^1)$ we have

$$\langle \widetilde{\alpha}, \eta \cdot \widetilde{\alpha} \rangle = \langle \mathbf{1}, \eta \rangle \geq \sqrt{2};$$

therefore if we denote by

$$B_{\delta}(\widetilde{\alpha}) := \{ \widetilde{\beta} \in \hom_{\mathsf{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})} \mid \langle \widetilde{\alpha}, \widetilde{\beta} \rangle < \delta \}$$

we have that for all $\eta \in \text{hom}(G, S^1)$ with $\eta \neq \mathbf{1}$, the intersection $B_{\delta}(\tilde{\alpha}) \cap (\eta \cdot B_{\delta}(\tilde{\alpha})) = \emptyset$ for $\delta < \frac{1}{2}$, which in particular says that the action of $\text{hom}(G, S^1)$ is completely discontinuous.

Let us restrict the map Ψ to the open set $B_{\delta}(\tilde{\alpha})$ with $\delta \ll \frac{1}{2}$. By equation (3) we have that the map

$$\Psi|_{B_{\delta}(\widetilde{\alpha})} \colon B_{\delta}(\widetilde{\alpha}) \to \Psi(B_{\delta}(\widetilde{\alpha}))$$

is bijective and continuous, we claim furthermore that it is a homeomorphism. Let us show that $\Psi|_{B_{\delta}(\tilde{\alpha})}^{-1}$ is continuous.

Let \widetilde{K} be a maximal abelian subgroup of \widetilde{G} and denote by $\widetilde{\alpha}' : \widetilde{K} \to U(\mathcal{H})$ the restriction $\widetilde{\alpha}|_{\widetilde{K}}$. Denote by $K \subset G$ the abelian subgroup that \widetilde{K} defines and note that $\widetilde{K} \xrightarrow{p} K$ defines a *S*¹-central extension. Denote by

$$\mathcal{H} \cong \bigoplus_{W \in \mathcal{S}(\widetilde{K})} \mathcal{H}^{W}_{\widetilde{lpha}'}$$

the decomposition of \mathcal{H} into isotypical components and note that S^1 acts by multiplication on the one dimensional irreducible representations W of $S(\tilde{K})$. Fix $V \in S(\tilde{K})$ and choose any unitary vector $x \in \mathcal{H}_{\widetilde{\alpha'}}^V$.

Take $\varepsilon \in \mathbb{R}$ such that $0 < \varepsilon \ll 1$ and choose $\delta < \frac{1}{2}$ such that for any $\widetilde{\beta} \in B_{\delta}(\widetilde{\alpha})$ we have that for all $\widetilde{g} \in \widetilde{G}$

$$\left|\widetilde{\alpha}(\widetilde{g})x - \widetilde{\beta}(\widetilde{g})x\right| < \varepsilon; \tag{4}$$

this δ exists by the definition of the strong operator topology and the metric defined in equation (1).

Take a sequence $\{\widetilde{\beta}_n\}_{n\in\mathbb{N}}$ of homomorphisms in $B_{\delta}(\widetilde{\alpha})$ and denote by

$$\alpha, \beta_n \in \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}$$

the projective homomorphisms that $\tilde{\alpha}$ and $\tilde{\beta}_n$ define. Assume that $\lim_{n\to\infty} \beta_n = \alpha$; let us show that this implies that $\lim_{n\to\infty} \tilde{\beta}_n = \tilde{\alpha}$.

Since we have that $\lim_{n\to\infty} \beta_n = \alpha$, there must exist unitary complex numbers $\lambda_n(g) \in S^1$ such that for all $\tilde{g} \in \tilde{G}$

$$\lim_{n\to\infty}\lambda_n(g)\widehat{\beta}_n(\widetilde{g})=\widetilde{\alpha}(\widetilde{g})$$

Take $\sigma \in \mathbb{R}$ such that $0 < \sigma \ll 1$ and let $N \in \mathbb{N}$ be such that for all n > N and all $\tilde{g} \in \tilde{G}$ we have

$$|\lambda_n(g)\widetilde{\beta}_n(\widetilde{g})x - \widetilde{\alpha}(\widetilde{g})x| < \sigma.$$
(5)

Denote by $\chi_W : \widetilde{K} \to S^1$ the characters of the irreducible representations W of the abelian group \widetilde{K} , and write $x = \sum_{W \in S(\widetilde{K})} y_n^W$ in terms of the decomposition on isotypical components $\mathcal{H} \cong \bigoplus_{W \in S(\widetilde{K})} \mathcal{H}_{\widetilde{\beta}'_n}^W$ relative to $\widetilde{\beta}'_n$ with $y_n^W \in \mathcal{H}_{\widetilde{\beta}'_n}^W$. We obtain that for all $\widetilde{k} \in \widetilde{K}$

$$\widetilde{\alpha}(\widetilde{k})x = \chi_V(\widetilde{k})x = \sum_W \chi_V(\widetilde{k})y_n^W$$

and

$$\widetilde{\beta}_n(\widetilde{k})x = \sum_W \chi_W(\widetilde{k})y_n^W$$

and therefore by equation (4)

$$\left|\widetilde{\beta}_{n}(\widetilde{k})x - \widetilde{\alpha}(\widetilde{k})x\right| = \left|\sum_{W \neq V} (\chi_{W}(\widetilde{k}) - \chi_{V}(\widetilde{k}))y_{n}^{W}\right| < \varepsilon$$

and by equation (5)

$$\begin{aligned} \left| \lambda_n(k)\widetilde{\beta}_n(\widetilde{k})x - \widetilde{\alpha}(\widetilde{k})x \right| &= \\ \left| \chi_V(\widetilde{k})(\lambda_n(k) - 1)y_n^V + \sum_{W \neq V} (\chi_W(\widetilde{k}) - \chi_V(\widetilde{k}))y_n^W \right| \\ &< \sigma. \end{aligned}$$
(6)

Since for all $\tilde{k} \in \tilde{K}$ we have that

$$\left|\sum_{W\neq V} (\chi_W(\widetilde{k}) - \chi_V(\widetilde{k})) y_n^W\right| < \varepsilon,$$

Lemma 5.5 shows that $\left|\sum_{W \neq V} y_n^W\right| < \varepsilon$. Therefore we obtain

$$\left|y_{n}^{V}\right| = \left|x - \sum_{W \neq V} y_{n}^{W}\right| > 1 - \varepsilon.$$

Since the vectors y_n^W are pairwise orthogonal, the inequality (6) implies that

$$\left|\chi_{V}(\widetilde{k})(\lambda_{n}(k)-1)y_{n}^{V}\right| = \left|\lambda_{n}(k)-1\right| \left|y_{n}^{V}\right| < \sigma$$

and since $|y_n^V| > 1 - \varepsilon$, we have that for all $k \in K$ and all n > N

$$|\lambda_n(k)-1|<\frac{\sigma}{1-\varepsilon}$$

Since ε is fixed, we conclude that for all $k \in K$, $\lim_{n\to\infty} \lambda_n(k) = 1$. Hence for all $\tilde{k} \in \tilde{K}$

$$\lim_{n \to \infty} \widetilde{\beta}_n(\widetilde{k}) = \lim_{n \to \infty} \lambda_n(k) \widetilde{\beta}_n(\widetilde{k}) = \widetilde{\alpha}(\widetilde{k})$$

and therefore $\lim_{n\to\infty} \widetilde{\beta}'_n = \widetilde{\alpha}'$. Now, the restriction map

$$\begin{split} \hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})} &\to \hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{K}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{K})}\\ \widetilde{\alpha} &\mapsto \widetilde{\alpha}' = \widetilde{\alpha}|_{\widetilde{K}} \end{split}$$

is an embedding since \tilde{G} is connected and any representation of \tilde{G} is uniquely determined by its restriction to \tilde{K} ; hence we conclude that

$$\lim_{n\to\infty}\widetilde{\beta}_n=\widetilde{\alpha}.$$

Therefore $\Psi|_{B_{\delta}(\widetilde{\alpha})} : B_{\delta}(\widetilde{\alpha}) \to \Psi(B_{\delta}(\widetilde{\alpha}))$ is a homeomorphism and the theorem follows.

Corollary 5.4. Let G be a compact Lie group which is connected or abelian, and let \tilde{G} be a S¹-central extension of G. Then $\hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))_{\tilde{G}}$ is a $K(\hom(G, S^1), 1)$, namely it is connected, its fundamental group is $\hom(G, S^1)$ and its higher homotopy groups are trivial.

Proof. The result follows from Theorem 5.3 where it is proven that

$$\hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})} \to \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}$$

is a hom (G, S^1) -principal bundle, and from Theorem 4.11 where it is proven that

$$\hom_{\mathrm{st}}(\widetilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\widetilde{G})}$$

is weakly homotopy equivalent to a point.

Lemma 5.5. Let \widetilde{K} be an abelian compact Lie group and denote by $\chi_W : \widetilde{K} \to S^1$ the character of the 1-dimensional irreducible representation W. For each irreducible representation W take a vector $y^W \in \mathcal{H}$ and assume that $y^W \perp y^Z$ for $W \neq Z$. Suppose that for all $\widetilde{k} \in \widetilde{K}$

$$\left|\sum_{W \neq V} (\chi_W(\widetilde{k}) - \chi_V(\widetilde{k})) y_n^W \right| < \varepsilon,$$

then $\left| \sum_{W \neq V} y_n^W \right| < \varepsilon.$

Proof. Note first that $\chi_W(\chi_V)^{-1} = \chi_{W \otimes V^{-1}}$ and therefore

$$\begin{vmatrix} \sum_{W \neq V} (\chi_W(\widetilde{k}) - \chi_V(\widetilde{k})) y^W \end{vmatrix} = \\ \begin{vmatrix} \sum_{Z \neq 1} (\chi_Z(\widetilde{k}) & -1) y^{V \otimes Z} \end{vmatrix}$$

;

taking $x^Z := y^{V \otimes Z}$ we have that for all $\tilde{k} \in \tilde{K}$

$$\left|\sum_{Z\neq\mathbf{1}}(\chi_Z(\widetilde{k})-1)x^Z\right|<\varepsilon.$$

Since \widetilde{K} is isomorphic to a product of cyclic groups, we claim that it is enough to show the lemma whenever \widetilde{K} is S^1 .

Here the irreducible representations of S^1 are parametrized by $n \in \mathbb{Z}$ and our hypothesis becomes

$$\left|\sum_{n\neq 0} (e^{2\pi i n j} - 1) x_n\right| < \varepsilon$$

for all $j \in \mathbb{R}$. Take a prime number $p \in \mathbb{N}$ and consider the inequality for $j = \frac{1}{2p}, \frac{2}{2p}, ..., \frac{2p-1}{2p}$; by the triangle inequality we have

$$\left|\sum_{r=1}^{2p-1} \sum_{n \neq 0} (e^{2\pi i n \frac{r}{2p}} - 1) x_n \right| \le \sum_{r=1}^{2p-1} \left| \sum_{n \neq 0} (e^{2\pi i n \frac{r}{2p}} - 1) x_n \right|$$

<(2p-1)\varepsilon

which we may reorder thus obtaining

$$(2p-1)\varepsilon > \left| \sum_{r=1}^{2p-1} \sum_{n \neq 0} \left(e^{2\pi i n \frac{r}{2p}} - 1 \right) x_n \right|$$
$$= \left| \left(\sum_{n: \ p \nmid n} x_n \right) \left(\sum_{r=1}^{2p-1} \left(e^{2\pi i n \frac{r}{2p}} - 1 \right) \right) \right|$$
$$= 2p \left| \sum_{n: \ p \nmid n} x_n \right|$$

since $\sum_{r=1}^{2p-1} (e^{2\pi i n \frac{r}{2p}} - 1) = -2p$ whenever $p \nmid n$.

Therefore we have that for all prime p we have that the inequalities

$$\left|\sum_{n: p \nmid n} x_n\right| < \frac{(2p-1)\varepsilon}{2p} < \varepsilon$$

hold, implying the desired result, namely that

$$\left|\sum_{n\neq 0}x_n\right|<\varepsilon.$$

The iteration of the previous argument shows the lemma for any abelian compact Lie group. $\hfill \Box$

Theorem 5.6. Let G be a compact Lie group which is connected or abelian, and let \widetilde{G} be a S¹-central extension of G, B a connected paracompact space and $f: B \to \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}$ a continuous map. Then for all $b_0 \in B$ there exist a neighborhood $V \subset B$ of $b_0 \in V$ such that $f|_V : V \to \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}$ has an extension $\sigma_V : V \to PU(\mathcal{H})$ that makes the following diagram commutative



where $\bar{\pi}_{f(b_0)}$: $PU(\mathcal{H}) \rightarrow \hom_{st}(G, PU(\mathcal{H}))_{\widetilde{G}}, F \mapsto Ff(b_0)F^{-1}$. In particular $f^*PU(\mathcal{H})$ is a $PU(\mathcal{H})_{f(b_0)}$ -principal bundle where $PU(\mathcal{H})_{f(b_0)} := \{F \in PU(\mathcal{H}) \mid Ff(b_0)F^{-1} = f(b_0)\}.$

Proof. Take any lift $\tilde{\alpha} \in \hom_{st}(\tilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\tilde{G})}$ such that $\Psi(\tilde{\alpha}) = f(b_0)$ and consider the following commutative diagram

$$\begin{array}{c|c} U(\mathcal{H}) & & \xrightarrow{\pi_{\tilde{\pi}}} & \hom_{\mathrm{st}}(\tilde{G}, U(\mathcal{H}))_{\mathcal{S}(\tilde{G})} \\ \pi & & & & \downarrow_{\Psi} \\ \mu & & & & \downarrow_{\Psi} \\ PU(\mathcal{H}) & & \xrightarrow{\pi_{f(b_0)}} & \hom_{\mathrm{st}}(G, PU(\mathcal{H}))_{\tilde{G}}. \end{array}$$

By Theorem 5.3 there exists a neighborhood W of $\tilde{\alpha}$ such that $\Psi|_W : W \to \Psi(W)$ is a homeomorphism. Let $V := f^{-1}(\Psi(W))$ and consider the map $\tilde{f} : V \to W$, $b \mapsto (\Psi|_V)^{-1}(f(b))$. By Theorem 4.9 and Corollary 4.10 there exist a section $s : V \to U(\mathcal{H})$ such that $s(b)\tilde{\alpha}s(b)^{-1} = \tilde{f}(b)$. The composition $\sigma_V : V \to PU(\mathcal{H})$, $\sigma_V := \pi \circ s$ is desired local extension of f since we have

$$\sigma_V(b)f(b_0)\sigma_V(b)^{-1} = \pi \left(s(b)\tilde{\alpha}s(b)^{-1}\right)$$
$$= \pi(\tilde{f}(b)) = f(b).$$

The map $V \times PU(\mathcal{H})_{f(b_0)} \rightarrow (f^*PU(\mathcal{H}))|_V$, $(b, F) \mapsto (b, \sigma_V(b)F)$ is the desired local trivialization for the $PU(\mathcal{H})_{f(b_0)}$ -principal bundle

$$f^*PU(\mathcal{H}) := \{(b,F) \in B \times PU(\mathcal{H}) \mid f(b) = \pi_{f(b_0)}(F)\}.$$

Applications and further research

One very important application of the existence of lifts for paracompact spaces shown in Theorem 5.6, is the construction of universal equivariant projective unitary and stable bundles necessary for the study of the twisted equivariant K-theory as an equivariant parametrized cohomology theory (see (Barcenas, Espinoza, Joachim and Uribe, 2014, Chapter 5) and (Atiyah and Segal, 2004, Chapter 6)). The construction of these universal bundles relies on the construction of classifying spaces for certain families for subgroups, together with explicit topological properties that the groups and the associated spaces of homomorphisms need to satisfy. In what follows we will review these constructions and we will show the implications that the results proved in the previous sections have on the existence of universal equivariant projective unitary bundles.

Let *G* and *P* be topological groups. A *G*-equivariant *P*-principal bundle consists of a *P*-principal bundle $p : E \to X$ together with left *G* actions on *E* and *X* commuting with the right *P* action on *E* such that *p* is *G*-equivariant. For every $e \in E$ we obtain a local representation $\rho_e : G_{p(e)} \to P$ determined by $g^{-1} \cdot e = e \cdot \rho_e(g)$ for $g \in G_{p(e)}$ where $G_{p(e)}$ is the isotropy group of $p(e) \in X$.

In (Lück and Uribe, 2014, Thm. 11.4) it was constructed a universal *G*-equivariant *P*-principal bundle with a prescribed family of local representations through the use of classifying spaces of families of subgroups. The fact that these classifying spaces of families of subgroups permitted to obtain equivariant principal bundles relied on topological properties of the groups *G* and *P* and on the spaces of prescribed homomorphisms. Let us recall the main ingredients.

A family \mathcal{R} of local representations for (G, P) is a set of pairs (H, α) , where H is a subgroup of G and $\alpha : H \to P$ is a continuous group homomorphism, such that the family is closed under finite intersections, under conjugation in P and under conjugation in G (see (Lück and Uribe, 2014, Def. 3.3) for a detailed description).

It is said (**Lück and Uribe**, 2014, Def. 6.1) that the family \mathcal{R} satisfies Condition (H) if the following holds for every $(H, \alpha) \in \mathcal{R}$:

- The path component of *α* in hom(*H*, *P*) is contained in the orbit {*pαp*⁻¹ | *p* ∈ *P*}.
- The projection $P \rightarrow P/P_{\alpha}$ has a local cross section where $P_{\alpha} = \{p \in P \mid p\alpha p^{-1} = \alpha\}$ is the isotropy group of α under the conjugation action of *P*.

- The projection G → G/H has a local cross section.
- The canonical map

$$\iota_{\alpha}: P/P_{\alpha} \to \hom(H, P)$$
$$pP_{\alpha} \mapsto p\alpha p^{-1}$$

is a homeomorphism into its image.

To a family of local representations \mathcal{R} we can associate a family of subgroups of $G \times P$ consisting of the set $\mathcal{F}(\mathcal{R}) := \{K(H, \alpha) \mid (H, \alpha) \in \mathcal{R}\}$ where $K(H, \alpha) := \{(g, \alpha(g)) \mid g \in H\}$. Let

$$E(G, P, \mathcal{R}) := E_{\mathcal{F}(\mathcal{R})}(G \times P)$$

be the classifying space for the family of subgrups $\mathcal{F}(\mathcal{R})$, i.e. a $(G \times P)$ -CW-complex whose isotropy groups belong to $\mathcal{F}(\mathcal{R})$ and for which the $K(H, \alpha)$ -fixed point set $E_{\mathcal{F}(\mathcal{R})}(G \times P)^{K(H,\alpha)}$ is nonempty and weakly contractible for every $(H, \alpha) \in \mathcal{R}$.

Theorem 11.4 of Lück and Uribe (2014) claims that if the family of local representations \mathcal{R} satisfies Condition (H), then $E(G, P, \mathcal{R}) \rightarrow E(G, P, \mathcal{R})/P$ is a *G*-equivariant *P*-principal bundle which is moreover universal for *G*equivariant *P*-principal bundles whose local representations appear in \mathcal{R} .

In this paper we are interested in *G* equivariant projective unitary stable bundles, namely *G*-equivariant $PU(\mathcal{H})$ principal bundles whose local representations (H, α) consist of stable homomorphisms $\alpha : H \to PU(\mathcal{H})$ as were defined in Definition 5.1.

Whenever $PU(\mathcal{H})$ is endowed with the norm topology (let us denote it by $PU(\mathcal{H})_n$), *G* is a topological group and *S* consists of the family of local representations (H, α) where *H* is a finite subgroup of *G* and $\alpha \in \text{hom}_{st}(H, PU(\mathcal{H})_n)$ is a stable homomorphism. Theorem 15.12 of **Lück and Uribe** (2014) shows that the bundle

$$E(G, PU(\mathcal{H})_n, \mathcal{S}) \to E(G, PU(\mathcal{H})_n, \mathcal{S})/PU(\mathcal{H})_n$$

is a universal *G* equivariant projective unitary stable bundle for almost free *G*-CW-complexes

It would be expected that a similar statement would hold whenever we expand the family of local representations for pairs (H, α) where H is a compact Lie group and α is a stable homomorphism. Unfortunately this is not the case for the following reasons: whenever H is a compact Lie group which is not finite, the space of stable homomorphisms to $PU(\mathcal{H})_n$ in the norm topology is empty, i.e. $\hom_{st}(H, PU(\mathcal{H})_n) = \emptyset$. If we consider the group $PU(\mathcal{H})$ endowed with the strong operator topology, as it is done throughout this article, the family of local representations S consisting of pairs (H, α) with H a compact Lie group and $\alpha \in \hom_{st}(H, PU(\mathcal{H}))$ does not satisfy Condition (H) of Theorem 11.4 of Lück and Uribe (2014). In particular the canonical map

$$PU(\mathcal{H})/PU(\mathcal{H})_{\alpha} \to \hom_{\mathrm{st}}(H, PU(\mathcal{H}))$$

is not a homeomorphism into its image, since Theorem 4.8 implies that canonical map

$$PU(\mathcal{H}) \to \hom_{\mathrm{st}}(H, PU(\mathcal{H})), \ F \to F\alpha F^{-1}$$

has no local sections.

Nevertheless, by Theorem 5.6 we know that local lifts exists if we restrict to maps

$$B \rightarrow \hom_{\mathrm{st}}(H, PU(\mathcal{H}))$$

with *B* paracompact. Hence we might say that a Weak Condition (H) is satisfied whenever Condition (H) holds on the image of maps $B \rightarrow \hom_{st}(H, PU(\mathcal{H}))$ where *B* is paracompact. With this setup in mind, we conjecture that the space

$$E(G, PU(\mathcal{H}), \mathcal{S})/PU(\mathcal{H})$$

would become a universal space for *G*-equivariant projective unitary stable bundles whenever we restrict our study to the category of paracompact spaces with proper *G* actions. If this were the case, we would have a space that would allow us to show that the twisted equivariant K-theory is indeed an equivariant parametrized cohomology theory as defined in **May** (1996).

Finally note that in order for the previous statement to be true we would need to be able to generalize Theorem 5.6 for compact Lie groups which are not necessarily connected, and we would need to show that the proof of Theorem 11.4 of **Lück and Uribe** (2014) would work if we restrict only to the image of paracompact spaces. These tasks are beyond the scope of this article and we leave them for further research.

References

- Atiyah, M. and Segal, G. (2004) Twisted K-theory. Ukranian Mathematical Bulletin, 1(3):291–334.
- Bárcenas, N., Espinoza, J., Joachim, M. and Uribe,B (2014) Universal twist in equivariant *K*-theory for proper and discrete actions. *Proc. Lond. Math. Soc.* (3), 108(5):1313–1350.
- **Dixmier, J. and Douady, A.** (1963). Champs continus d'espaces hilbertiens et de C*-algèbres. *Bull. Soc. Math. France*, 91:227–284.
- **Espinoza**, J. and Uribe, B. (2014). Topological properties of the unitary group. *JP Journal of Geometry and Topology*, 16(1):45–55.
- Jänich, K. (1965). Vektorraumbündel und der Raum der Fredholm-Operatoren. *Math. Ann.*, 161:129–142.
- Lück, W. and Uribe, B. (2014). Equivariant principal bundles and their classifying spaces. *Algebraic and Geometric Topology*, 14(4):1925–1995.
- May, J. P. (1996). Equivariant homotopy and cohomology theory, volume 91 of CBMS Regional Conference Series in Mathematics. Published for the Conference Board of the Mathematical Sciences, Washington, DC; by the American Mathematical Society, Providence, RI.
- May, J. P. and Sigurdsson, J. (2006). Parametrized homotopy theory, volume 132 of Mathematical Surveys and Monographs. American Mathematical Society, Providence, RI.
- Munkres, J. R. (2000). *Topology, Second Edition*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J.
- Simms, D. J. (1970) Topological aspects of the projective unitary group. *Proc. Camb. Phil. Soc.*, 68:57–60.

Artículo de posesión

Matemáticas

Una aproximación a la construcción de modelos matemáticos para la descripción de la naturaleza

Farid Chejne J

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Grupo TAYEA, Medellín, Colombia

Artículo de posesión para el ingreso como miembro correspondiente a la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales el 6 de abril de 2016

Resumen

Se presenta una descripción de la forma como se afronta el problema de la abstracción mental, necesaria para el desarrollo de un modelo matemático, capaz de describir los fenómenos que rigen el comportamiento de la dinámica de procesos naturales; ante perturbaciones externas al sistema. El objetivo de este trabajo es encontrar la ecuación de balance, partiendo desde la ecuación de Liouville clásica en la escala microscópica hasta las ecuaciones de balance a escala macroscópica o ecuaciones de Navier-Stokes. Dividiendo magnitudes físicas como la velocidad en dos partes, una de ellas relacionada con el valor promedio y la otra con el fluctuante, genera la posibilidad de saltar de un escala a otra y así reducir la complejidad. En el artículo también se menciona de manera resumida el hecho que la complejidad se construye a partir de unidades simples; de esta manera, los modelos se consideran una abstracción de la realidad en la que se le asigna una ecuación matemática en diferentes escalas, tanto temporal como espacial, para explicar cómo la naturaleza se comporta y cómo ella se moldea para lograr sus determinadas formas. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Palabras clave: modelamiento, multi-escala, ecuaciones de balance.

An approximation to setting up mathematical models for nature description

Abtract

A description of how everyone does abstractions to develop a mathematical model is presented; as well as the ability to describe the behaviour of nature processes dynamic when there are external perturbations. The aim of this work is to find the balance equation, starting from the classical Liouville equation on the microscopic scale until the balance equations on a macroscopic scale or Navier-Stokes equations. By dividing physical quantities such as velocity in two parts, one of which related to the average value and the other one with the fluctuation; it is possible to jump from one scale to another and reduces complexity. At this point, the complexity is constructed from simple units; therefore, the models are considered reality abstractions based on a mathematical equation formulated at different levels, both on time and space; as consequence, nature takes its shape due to the external influence, without forget the nature laws, by modifying the shape, adapting and looking for the less energy demand. © Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 2016.

Key words: Modelling, mult-scale, balance equations.

Introducción

La importancia de desarrollar modelos se relaciona con la dificultad de entender y explicar fenómenos desde el punto de vista experimental, con la imposibilidad de operar el sistema real en regiones de riesgo, y con tiempos de ensayo demasiado largos en los sistemas reales (días o meses); versus el corto tiempo de solución del modelo (segundos o minutos) en el computador que permite replicar la experimentación de fenómenos traslapados, predecir nuevos comportamientos, comprender la física del problema y reducir los costos de la experimentación. Los modelos matemáticos se usan como herramientas científicas para aproximarse a la determinación de estructuras y reactividad química, de condiciones óptimas

de diseño de una etapa o proceso, para la delimitación de la región de operación óptima de un sistema, para el diseño de sistemas de monitoreo, automatización, control y diagnóstico de fallas. También, se usa para caracterización y creación de conocimiento sobre el comportamiento de un proceso; en fin, los modelos se utilizan para explicar y controlar diversos fenómenos en nuestro entorno y para pronosticar los acontecimientos venideros (**Myung, I. J.** 2000, **Moore, J.** 2015).

Correspondencia:

Farid Chejne J., fchejne@unal.edu.co Recibido: 12 de febrero de 2016 Aceptado: 2 de junio de 2016 Los modelos permiten darle explicación a las observaciones y por ende, facilitan el conocimiento de las características de la naturaleza. Un modelo teórico es la formulación en términos de expresiones matemáticas de las suposiciones y sus consecuencias, bajo el supuesto que dichas relaciones identifican el proceso en particular del mundo real.

Cualquiera que sea el proceso se pueden desarrollar modelos determinísticos y estocásticos, dependiendo de la incertidumbre en las variables que identifican el proceso. Los modelos determinísticos permiten una predicción exacta con base en ecuaciones cuya solución es precisa y sin lugar a incertidumbre; contrario a lo estocásticos, en los cuales el nivel de incertidumbre es alto y lo que se predice es la probabilidad de ocurrencia de eventos.

La naturaleza toma forma. La naturaleza toma forma, respetando leyes que rigen su comportamiento ante la influencia externa y hacen que los eventos naturales se orienten a través de la repetición de una unidad oculta, modificando la forma para adaptarse, actuando con el menor gasto energético posible. La dinámica del movimiento de los objetos se rige por la ley de Newton y sus diversas modificaciones; la relación entre un sistema y sus alrededores se rige por las leyes de la termodinámica. Los científicos siempre buscan clasificar y darle explicación a las formas básicas que se presentan en la naturaleza. Se conoce que la complejidad de las formas que se presentan en la naturaleza es generada por la gran variedad de la ruptura espontánea de la simetría y es representada por un gran número de ecuaciones simétricas como los balances de energía, momento y materia; de otro lado, ecuaciones no simétricas como la segunda ley de la termodinámica.

Con la postulación de las leyes fundamentales de la termodinámica (la primera ley predice la conservación de la energía y la segunda, la no conservación de la distribución de los estados energéticos), nuestro entendimiento de la naturaleza toma forma, modificando su entorno, adaptándose y repitiendo una unidad básica oculta un sin número de veces. La naturaleza siempre busca lograr lo máximo con el mínimo ajuste posible, el camino más corto con el menor gasto energético, respetando siempre las leyes fundamentales.

Existe un patrón de conjunto, el cual se repite: mucha información en un extremo, conducción entre un extremo y el otro, luego distribución nuevamente de la información. Esto se observa en los árboles, en los ríos desde su nacimiento en las montañas hasta su desembocadura en el mar, en el sistema circulatorio y nervioso de los seres vivos, entre otros (ver Figura 1).

La forma irregular de los límites del sistema en la naturaleza mantiene activa su interacción entre ésta y su entorno, facilita el intercambio de materia, energía e información y de esta manera la auto-organización en los sistemas. Para clasificar las formas, existe por ejemplo, la propuesta de los sistemas de ramificación (**Bell, A.D.** 1986), que distingue tres categorías: ciegos, deficientes visuales y los patrones de auto-organización; donde hay un enfoque en propiedades algorítmicas de la formación de patrones.

Stevens (**Bell, A. D.** 1986), propone cuatro tipos de patrones: meandros, espirales, explosiones y ramificación; algo similar a esto se puede encontrar en la clasificación de los tipos de interfaces en la naturaleza de acuerdo con **Stevens, P. S.** (1974): Interfaz de movimiento en un medio desordenado (flujo en materiales porosos, la propagación de frentes de llama, etc.), procesos de deposición (deposición de átomos, formación de gotas de agua, procesos de cristalización, etc.) y los sistemas biológicos (crecimiento bacteriano, plegables y torsiones de proteínas en el espacio, etc.) (**Prusinkiewicz, P.** 1998).

Hay varias teorías para explicar las formas básicas de la naturaleza, pero el modelado de la forma sigue siendo un campo abierto para la investigación científica. **Thompson** (1917), describe que las formas de los seres vivos se debe a las fuerzas y las propiedades físicas que intervienen en los procesos biológicos. De otro lado, los mecanismos de **Turing** (1952) dan una explicación simple para un gran número de formas en la naturaleza basado en que existen zonas fluctuantes que logran desestabilizar el sistema y



Figura 1. Patrón identificado estructura ramificada en un extremo, sigue un tallo y luego otra estructura ramificada en el otro extremo.

lo hacen evolucionar hacia otras estructuras coherentes (líneas de cebras y leopardos de dibujos sobre la piel de los peces tropicales).

Según Sharon, et al. (2005), el teorema central de la geometría diferencial, demostrado por Gauss, señala que la métrica de una superficie (curvatura de Gauss) depende de la forma en que esta se adopta en el espacio. Se encuentra que la forma de las fronteras de hojas y flores no pueden ser planas, sino onduladas, y que siempre que existan discrepancias entre la tasa de crecimiento de las hojas de las fronteras y sus centros, aparecerán ondas como las que se aprecia en las membranas biológicas, líquenes, babosas marinas, coles y orquídeas (Eran, S.; Michael M. and Harry, L. S. 1986). En la clasificación de las semillas de girasol, en la formación en espiral de una concha o de un cono de pino y en el patrón de crecimiento de las ramas de un árbol, por ejemplo, se encontró que la secuencia de la serie de Fibonacci es común en estos casos. Debe haber presentado las mismas leyes básicas y, por tanto, una representación matemática similar.

Los sistemas naturales y los hechos por el hombre tienen un propósito y un tamaño finito, sujeto a restricciones de flujo y de tamaño (**Bejan, A.** 2000), de ahí la importancia de los procesos de optimización que se llevan a cabo de forma natural o guiada por el ser humano. En la medida que los flujos de materia y energía son restringidos, y que adicionalmente existen restricciones de tamaño, los sistemas tienen formas irregulares que facilitan el uso de los recursos. Se puede decir que la segunda ley de la termodinámica rige principalmente este proceso de optimización restringida; todo lo ajusta a un principio de economía que es lo que se establece en definitiva el curso de la evolución.

Podría hablarse sobre los puntos críticos en los que un sistema se vuelve inestable y donde da lugar a la bifurcación (**Prigogine, I. Nicolis, G.** 1987), a la auto-organización o a los puntos restrictivos que hacen que la naturaleza aumente su complejidad para aprovechar el máximo posible los diferentes flujos de materia y energía (**Bejan, A.** 1997; 2005; **Kurchan J.** 2005); por ejemplo, cálculos de bifurcaciones, basados en la teoría de la dinámica de los sistemas no lineales, muestran que hexágonos son una de las primeras formas en que aparece, en el borde de la incertidumbre, y que esta estructura de simetría se ve favorecida en relación con otros.

Sin embargo, estos casos que acaban de ser citados son diferentes interpretaciones del mismo principio, que es la segunda ley de la termodinámica. Los sistemas naturales y las acciones de los seres humanos tienen un propósito, con sujeción a las limitaciones de flujo y tamaño. Como los flujos de materia y energía están restringidos y existen otras restricciones geométricas, los sistemas tienen formas irregulares que facilitan el uso de los recursos.

Se cree que este proceso de optimización sujeto a restricciones se rige principalmente por la ley principal del universo, según Einstein, ajustado a un principio de economía que es lo que se establece en definitiva el curso de la evolución. En este documento se discute la hipótesis de que la naturaleza evoluciona para modificar sus diferentes formas como consecuencia de las limitaciones impuestas por la "segunda ley de la termodinámica" y que permite ramificar los estados del sistema cuando hay suficiente flujo de cualquier bien conservador.

El problema de la escala espacial y temporal. Un sistema natural está constituido por partículas elementales, las cuales puede agruparse para conformar una unidad básica (v.g. el núcleo de un átomo), esta a su vez puede ligarse entre sí para construir una estructura molecular, definiéndose así un especie o grupo funcional con características de conjunto definidas y diferentes a las de la unidad básica (ver Figura 2a). Estas estructuras moleculares pueden agruparse para construir una zona definida de materia, constituyéndose en clúster, los cuales se unen y forman los granos, para luego construir a partir de un grupo de granos las partículas (ver Figura 2a y 2b).

Los grupos de partículas forman zonas sólidas dentro de un material poroso, dando lugar a otra escala superior del orden de nanómetro con distribución no uniforme de tamaño y forma de poros. Se hacen las siguientes preguntas: ¿ Si se tiene un gas con 10²³ partículas en permanente movimiento aleatorio y sin dirección definida, ¿qué es lo que se mueve cuando un elemento mecánico como un ventilador pone movimiento el fluido y lo hace desplazar de un punto a otro?; ¿Cómo actúa la gravedad u cualquier fuerza externa sobre las partículas individuales de tamaño pequeño y masa pequeña?; ¿Será que las fuerzas externas actúan sobre el conjunto y no sobre partículas individuales? y ¿Cómo se forman las interacciones dentro de un conjunto de partículas?. Al igual que la escala espacial, se presenta la escala temporal, en la que variaciones en el tiempo son solo perceptibles si se registran dichos cambios en tiempos muy pequeños. Por ejemplo, las colisiones a escala molecular solo son detectables si se miden los efectos en tiempos en la misma escala; de lo contrario, éstas se perciben en escalas temporales mayores mediante el promedio de las fluctuaciones, que dan origen a las leyes constitutivas como la Ley de Fourier, Fick, Ohm y Newton.

En el caso de las escalas temporales se trae a colación el problema de la turbulencia, como el chorro de agua que se ilustra en la Figura 3. La escala temporal se puede percibir al tratar de medir el tiempo de colisión entre las partículas fundamentales de agua, el cual es diferente del tiempo de colisión en un grupo de partículas o clúster .

Entre otro orden de ideas y relacionado con el mismo ejemplo de la turbulencia, la escala temporal también se percibe al medir la velocidad de un punto o conjuntos de partículas fundamentales en el tiempo. Se observa en la Figura 3, que la velocidad promedio medible a escala macroscópica varía en el tiempo y se puede deducir una



Figura 2. Esquemas ilustrativos de la conformación de las diferentes escalas espaciales. **a**) Secuencia para la formación del hidrogel, en el que se puede apreciar como estructuras en la escala molecular se unen para formar clúster y finalmente partículas. Esquema donado por el profesor Carlos Moreno de la Universidad de Granada, España. **b**) Esquema de un carbón en el que se ilustra su estructura porosa a una escala de nanómetro (Izq.), la estructura molecular a la escala de Armstrong (Der.). También, la combinación de estructuras químicas da forma a un sólido poroso. Esquema adaptado de (**Ye, R. et. al.** 2013).



Figura 3. Esquema ilustrativo de un flujo turbulento en el que se mide la velocidad puntual y se registra en el tiempo.

función de distribución de velocidades en esa escala, tomando el número de repeticiones de un valor dado de la velocidad; la cual permite definir una función de densidad de probabilidades (Probability Density Function-PDF). Estas fluctuaciones en el tiempo de la velocidad del conjunto de partículas es consecuencia de las variaciones de la velocidad de cada partícula en una escala de tiempo mucho menor.

Construyendo el modelo matemático

Aproximarse a modelar la naturaleza es describirla mediante una ecuación, normalmente es una tarea que se desarrolla construyendo desde lo simple hasta lo complejo, teniendo en cuenta que la naturaleza se describe por un sistemas de N partículas interactuantes entre ellas y cada partícula posee una dinámica regida por las leyes de la mecánica. Para este fin, se requiere la posición y la velocidad de cada partícula para su descripción completa, la cual es tarea difícil de realizar, puesto que habrá que resolver un sistema de ecuaciones de un enorme tamaño del orden de 6,023x10²³ ecuaciones simultáneas.

Por lo tanto, se recurre al concepto del colectivo (ensemble), ideada por Josiah Williard Gibbs a finales del siglo XIX y necesario para describir el mundo (**Reichl, L.E.** 1998; **Gibb, M.** 1960; **Landau L.D. and Lifshitz, E. M.** 1969; **Tolman, R.** 1979; **Hoyos, B. A. and Chejne F.** 2015; **Chejne F.** *et.al.* 2013; **Bird, R. B.** *et. al.* 2002). Un colectivo es un número infinito de sistemas caracterizado por dinámicas y variables de estado idénticas (N, V, T, δ E), pero con condiciones iniciales diferentes (ver Figura 4), un ejemplo de aplicación de estos colectivos se puede ver en (**Reichl, L.E.** 1998).

La descripción estadística completa de un sistema de N partículas está dada en término de una función de distribución:

$$\varrho(\vec{x}_1, \dots \vec{x}_N, \vec{\xi}_1, \dots \vec{\xi}_N, t) = \varrho(\Gamma, t)$$
(1)

Cuya dinámica se rige por la ecuación de Liouville clásica:

$$\frac{\partial \varrho(\Gamma, t)}{\partial t} - \tilde{L}\varrho(\Gamma, t)$$
⁽²⁾

Donde el operador de Liouville se define con base en el Hamiltoniano (*H*) y en las coordenadas generalizadas (q_i, p_i) de la siguiente manera:

$$\tilde{L} = \frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial}{\partial q_i} - \frac{\partial H}{\partial q_i} \frac{\partial}{\partial p_i}$$
(3)

La solución de la ecuación (2) solo es formal y útil para fines teóricos; por lo tanto, se debe tener una ecuación de evolución reducida, la cual se haya integrando sobre todas las posiciones y velocidades con excepción de una:

$$n_1 f_1(\vec{x}_1, \vec{v}_1, t) = N_1 \, \downarrow \, \varrho(\Gamma, t) d \, \vec{x}_2, \dots d \vec{x}_N, d \, \xi_2, \dots d \, \xi_N, t \ (4)$$

Donde $f_1(\vec{x}_1, \vec{v}_1, t)$ representa el número de partículas con posición, velocidad y tiempo igual a $(\vec{x}_1, \vec{v}_1, t)$ por unidad de volumen en el espacio físico, por unidad de volumen en el espacio de las velocidades en un tiempo t; N_1 es el número de partículas de la especie 1 y n_1 es el número de partículas N_1 dividido por el volumen del sistema. De esta manera se tiene una visión de la naturaleza con base en la dinámica de una partícula, afirmando que lo que le pasa a ella, es lo que le pasa a las demás. La dinámica del grupo de partículas está regida por la ecuación cinética y una de ellas, es la ecuación de Boltzmann, la cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{df_1}{dt} = \frac{\partial f_1}{\partial t} + \vec{v}_1 \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \vec{x}} + \vec{a'e_1} \cdot \frac{\partial f_1}{\partial \vec{v}_1} = -\frac{\partial f_1}{\partial t}\Big|_{interacciones}$$
(5)

Donde, el lado izquierdo de la ecuación (5) representa el cambio en el tiempo del número se partículas por unidad del volumen del espacio físico y el de velocidad; por su parte, el lado derecho corresponde al efecto de las interacciones del grupo de partículas N_1 con el resto. La ecuación (5) contiene toda la información de la dinámica del número de



Figura 4. Esquema ilustrativo del concepto de ensamble.

partícula del mismo tipo 1, en donde la influencia del resto de partículas (2...N) se resumen en el último término de la ecuación (5) y representa el término de interacciones. $\overrightarrow{a^e}$ corresponde a la aceleración o a la fuerza externa dividida por la masa que actúa sobre el sistema.

Sin embargo, no es fácil obtener una solución ni analítica, ni numérica y muchas veces se recurre a realizar un nuevo promedio para un grupo de partículas constituyéndose una nueva escala mesoscópica superior a la microscópica denominada "Coarse Graining". Este nuevo promedio permite definir una nueva ecuación en la escala mesoscópica con $\vec{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \vec{v}_{i}$:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\xi} \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{x}} + \vec{\xi}^e \cdot \frac{\partial f}{\partial \vec{\xi}} = -\frac{\partial f}{\partial t}\Big|_{interacciones}$$
(6)

donde ξ es la velocidad instantánea de un conjunto de partículas en un punto del espacio, es una variable independiente de las variables espacial y temporal; *f* es la nueva función de la variable espacial, de la velocidad ξ y del tiempo, en un nivel de escala superior al que se tendría con la ecuación (5). De otro lado, se puede tener un nuevo promedio de los diferentes momentos (n=0 corresponde a la masa; n=1, al momentum y n=2, a la energía) con base en la función de distribución:

$$\rho \langle \vec{\xi}^n \rangle = m \int \vec{\xi}^n f_1 d\vec{\xi}; n = 0, 1, 2, \dots$$
(7)

La ecuación de evolución para el promedio de $\langle \vec{\xi}^n \rangle$ o también llamada ecuación de transporte o de balance es obtenida al multiplicar la ecuación de Boltzmann o ecuación cinética (Eq. 6) por $\vec{\xi}^n$ e integrando sobre todo el dominio del campo de velocidades para llegar a:

$$\frac{\partial \rho \langle \vec{\xi}^n \rangle}{\partial t} = \frac{-\partial \rho \langle \vec{\xi}^n \vec{\xi} \rangle}{\partial x} + n\rho \overrightarrow{\xi'^e} \langle \vec{\xi}^{n-1} \rangle + \dot{S}_{\vec{\xi}}^{'''} \qquad (8)$$

El primer término del lado derecho de la ecuación (8) corresponde al flux del promedio de la correlación del momento $\vec{\xi}^n$ con la velocidad $\vec{\xi}$ del conjunto de partículas; el siguiente, es el efecto de las fuerzas externas, en el que $\rho \xi^{e}$ corresponden al campo de fuerza externa y S_{ξ} es el término fuente debido a las interacciones entre las partículas. La ecuación (8) es el modelo matemático que permite simular cualquier fenómeno natural en la escala hidrodinámica (De Groot, S. R. 1968; Haase, R. 1990; Hines, A. and Maddox, R. 1987; Velásugez, J. E. and Chejne, F. 2003). No obstante, se requiere conoce la correlación entre la velocidad y los diferentes momentos, el cual se hace difícil y se recurre a un nuevo promedio para la velocidad $\langle \vec{\xi} \rangle$, el cual es el valor promedio de la velocidad que constituye la escala superior, la macroscópica; La velocidad instantánea del conjunto de partículas y la velocidad media están relacionadas mediante la expansión en serie de Taylor:

$$\vec{\xi} = \langle \vec{\xi} \rangle + \frac{d\xi}{dt} \delta t + \dots$$
 (9)

La expansión en serie de Taylor se propone que puede expresarse así:

$$\vec{\xi} = \left\langle \vec{\xi} \right\rangle + \vec{\xi}' + \dots \tag{10}$$

Este conjunto de partículas se mantiene unidas por fuerzas intermoleculares o en equilibrio local, en el nivel microscópico y se mueven como un todo; no obstante, cada conjunto de partículas tiene su propia dinámica identificada por una velocidad individual, cuya diferencia con la velocidad promedio da lugar a las fluctuaciones de la velocidad $\vec{\xi}$ la escala macroscópica.

Algo interesante es que el conjunto de partículas ayuda a interpretar las diferentes escalas, desde la microscópica, mesoscópica hasta la macroscópica; en la cual, ese conjunto de partículas actúa como una nueva partícula o punto en la nueva escala, interactuando con otros puntos del mismo sistema y generando interacciones de conjunto o fenómenos de transporte. Así que los fenómenos de transporte que se conocen como el transporte de especies, momentum, energía y de carga son interacciones de conjunto; aún más, el conjunto de partículas actúan como un todo y sienten el efecto de fuerzas externas (v.g. la gravedad), dando lugar al concepto del medio continuo (ver Figura 5).

De esta manera, la velocidad promedio se puede interpretar como la velocidad que posee una partícula individual ubicada en el marco de referencia del conjunto de partículas que se mueve como un todo. Si el sistema conformado por el medio continuo está estático, la velocidad de conjunto es cero; sin embargo, el movimiento aleatorio de las partículas individuales persiste y da lugar al entendimiento de las fluctuaciones.

De esta manera, teniendo en cuenta la división de la velocidad en su parte promedio y su parte fluctuante se puede construir las diferentes ecuaciones de balance. En el caso de n=0 para un sistema conformado por varias especies (j=1,2...), en la que , la ecuación (8) se convierte en la ecuación de balance por especies, en la que el término fuente corresponde a las reacciones que permiten la generación o destrucción de especies:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{j}}{\partial t} = \frac{-\partial \rho \mathbf{j} \langle \vec{\xi} \rangle}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \rho \mathbf{j} \langle \vec{\xi} \mathbf{j} \rangle}{\partial \vec{x}} + \mathbf{\hat{S}}_{\mathbf{j}}^{'''} \quad (11)$$

El tensor $\rho_j \langle \xi_j \rangle$ es la expresión microscópica del flujo dispersivo o difusivo de una especie respecto del conjunto; el cual puede ser modelado mediante una ley constitutiva, que en el caso lineal corresponde a La ley de Fick. El primer término de la ec. (11) es la tasa de acumulación de la especie *j* en el tiempo, el primer término del lado derecho de la ec. (11) corresponde a la expresión convectiva; el segundo, a la difusiva y el tercero a la tasa de generación o destrucción de la especie *j* por reacciones químicas.

Con base en la ecuación (11) se puede lograr la ecuación de continuidad tomando la sumatoria sobre todas las especies y teniendo en cuenta que $\rho = \sum_{j} \rho_{j} ; \sum_{j} \rho_{j} \langle \vec{\xi'}_{i} \rangle = 0 y \sum_{j} \hat{S}_{j}^{'''} = 0$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{-\partial \rho \langle \vec{\xi} \rangle}{\partial \vec{x}}$$
(12)

En el caso de *n*=1 la ecuación (8) se convierte en la ecuación de balance de momentum, en el que el término fuente es cero como consecuencia de la conservación del momentum y recordando que $\vec{\xi} = \langle \vec{\xi} \rangle + \vec{\xi}'$:

$$\frac{\partial \rho \langle \vec{\xi} \rangle}{\partial t} = \frac{-\partial \rho \langle \vec{\xi} \rangle \langle \vec{\xi} \rangle}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \rho \langle \vec{\xi}' \vec{\xi}' \rangle}{\partial \vec{x}} + \rho \overline{\xi' e}$$
(13)

El tensor $\rho \langle \vec{\xi}' \vec{\xi}' \rangle$ es la expresión microscópica del tensor de esfuerzo, el cual incluye el tensor debido a las fuerzas viscosas y el correspondiente a la presión. Este término puede ser modelado mediante una ley constitutiva, que en el caso lineal corresponde a La ley de Newton.



Figura 5. Esquema ilustrativo del significado de un punto y del medio contínuo.

En el caso de *n*=2, la ecuación (8) se convierte en la ecuación de balance de energía, en el que el término fuente correspondería a una absorción o liberación de radiación y nuevamente recordando que $\vec{\xi} = \langle \vec{\xi} \rangle + \vec{\xi}'$:

$$\frac{\partial \rho \langle (\langle \vec{\xi} \rangle + \vec{\xi}') \cdot (\langle \vec{\xi} \rangle + \vec{\xi}') \rangle}{\partial t} =$$

$$\frac{-\partial \rho \langle (\langle \vec{\xi} \rangle + \vec{\xi}') \cdot (\langle \vec{\xi} \rangle + \vec{\xi}') \langle \vec{\xi} \rangle + \vec{\xi}') \rangle}{\partial \vec{x}} + n\rho \vec{\xi''} \langle \vec{\xi} \rangle + S_{rad}'''}$$
(14)

La ecuación (14) puede expresarse de la siguiente manera, luego de una manipulación algebraica:

$$\frac{\frac{\partial \rho\left(\frac{1}{2}\langle\vec{\xi}\rangle\langle\vec{\xi}\rangle+\frac{1}{2}\langle\vec{\xi'}\cdot\vec{\xi'}\rangle\right)}{\partial t}}{=\frac{-\partial \rho\left(\frac{1}{2}\langle\vec{\xi}\rangle\langle\vec{\xi}\rangle+\frac{1}{2}\langle\vec{\xi'}\cdot\vec{\xi'}\rangle\right)\langle\vec{\xi}\rangle}{\partial \vec{x}}} - \frac{\frac{\partial \rho\left(\langle\vec{\xi'}\cdot\vec{\xi'}\rangle\right)\langle\vec{\xi}\rangle}{\partial \vec{x}} + \rho\vec{\xi'e}\langle\vec{\xi}\rangle + \dot{S}_{rad}'''}$$
(15)

El término $\frac{1}{2}\rho\langle \vec{\xi}', \vec{\xi}' \rangle$ es la representación microscópica de la energía interna, $\rho \langle \frac{1}{2} (\vec{\xi}', \vec{\xi}') \vec{\xi}' \rangle$ corresponde al flux de calor transportado, el cual debe ser modelado y una de las propuestas es la Ley de Fourier.

Hasta este punto, se ha mostrado como de la ec. (5) se deriva las ecuaciones de Navier-Stokes; así mismo, esta se puede extender al caso de problemas que requieren el balance de población en una escala inferior a las de Navier-Stokes. En el caso del balance de población, el término de interacción corresponde a los términos de muerte y nacimiento de partículas o entes de la población que se estudia, la variable $\vec{\xi}$ puede ser tomada como la variable interna del sistema (volumen, longitud, radio de partículas, etc.) y $\vec{\xi^{e}}$ con la tasa de cambio de la variable $\vec{\xi}$ externa. Adicionalmente, la ecuación de balance (ec 8) se pueden expresar de una forma compacta así:

$$\frac{d\langle \vec{\xi}^n \rangle}{dt} = +n\rho \,\overrightarrow{\xi'e} \langle \vec{\xi}^{n-1} \rangle + \hat{S\psi}''' + \zeta' \tag{16}$$

Donde $\frac{d\langle \tilde{\xi}^n \rangle}{dt} = \frac{\partial \langle \tilde{\xi}^n \rangle}{\partial t} + \vec{\xi} \cdot \nabla \langle \vec{\xi}^n \rangle$ es la derivada substancial, ζ' representa un término aleatorio para dar cuenta de los efectos fluctuantes del mundo micro y que son desconocidos. Por lo tanto, se ha convertido una ecuación determinista en otra estocástica al estilo de Langevin, la cual requerirá de un tratamiento especial basado en una dinámica en la que se determina una función de distribución de estados posibles mediante ecuaciones estocásticas, como la ecuación Maestra, Fokker-Plank o la de Kolmogorov (**Einstein, A.** 1905; **Gardiner, C. W.** 2004; **Stachel, J.** 1998; **Öttinger, H. C,** 1996; **Serra, R. et al.** 1986; **Kubo, R.** 1966; **Callen, H. B.** and **Welton T.A.** 1951).

Casos particulares

Como casos particulares de aplicación de las ecuaciones de balances a diferentes escalas se pueden analizar en diferentes referencias del autor. Modelos aplicados a la combustión y gasificación en lecho fluidizado y fijo en dos fases, se pueden apreciar en la referencias (Chejne, F., Lopera E. and Londoño, C. 2011; Chejne F. and Hernández J. P. 2002; Chejne, F, Hernández J. P. and Florez W. F. 2000); modelos de procesos químicos en hornos rotatorios se puede observar en las referencias (Granados D. A., Chejne F. and Mejía J. M. 2015; Granados D. A., Chejne F., Mejía J. M., Gómez C. A., Berrio A. and Jurado W. J. 2013); casos en los que se modelan sistemas que usan energía alternativa se ven en las referencias (Chejne F. et al., 2011; Mejía J.M. et al., 2005); problemas relacionados con la inestabilidad de las ecuaciones de balance (Navier-Stokes) se describe en la referencia (Rivera A. and Chejne F. 2004) y problemas relacionados con efectos de la transferencia de calor y masa se encuentran en las referencias (Chejne F. et al., 2002 and Chejne F. et al., 2015). En esta sección se presenta la descripción de dos modelos en el que se tocan diferentes escalas espacio temporal. Uno relacionado con la escala termodinámica o global (Maya J. C. and Chejne F. 2016), el otro en el que se combina dos escalas espaciales que permite simular problemas fluidodinámicos (Mejía J. M. et al., 2015).

Modelo matemático para reacciones sólido-gas con sinterización simultánea.

La distribución del tamaño de grano y la sinterización afectan el desarrollo de la microestructura durante las reacciones sólido-gas, problema de interés en los modelos clásicos de grano (**Georgakis C.** *et al.*, 1979). Para estudiar este efecto se desarrolló un modelo basado en balances de población para tener en cuenta la distribución de tamaño de grano en el interior del pellet y al mismo tiempo considerar la sinterización mediante los términos de muerte y nacimiento en el balance de población.

A medida que la reacción química procede, el radio de grano aumenta o disminuye (r_p) dependiendo del volumen molar del producto sólido y del proceso de sinterización, mientras que el radio del núcleo sin reaccionar (r_c) disminuye (Ver Figura 6).

En el nuevo modelo llamado "modelo de distribución de tamaño de grano cambiante" se considera que la partícula está compuesta de un gran número de granos con una distribución inicial de radio (ver Figura 7) r_o no uniforme, luego cada grano cambia de tamaño debido a la Reacción química y a la sinterización.

La reacción considerada en este modelo es:

 $aA(gas) + bB(solid) \rightarrow cC(solid) + dD(gas)$

El balance de material para el gas se describe con base en la ecuación (11) sin el término convectivo, solo el difusivo $J_j = \rho_j \langle \vec{\xi'}_j \rangle = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(D_e R^2 \frac{\partial C}{\partial R} \right) - \dot{r'}$, donde *C* es la densidad molar de la especie *j*, D_e es coeficiente de difusión efectiva, *R* es la variable espacial y el término de generación se relaciona con la reacción química $\dot{S_j'''} = \dot{r'}$ así:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial R} \left(D_{\rm e} R^2 \ \frac{\partial C}{\partial R} \right) - \dot{r}$$
(17)

Sujeto a las siguientes condiciones de frontera $\frac{\partial C}{\partial R} = 0$ en R=0 y C = C_b en $R=R_{p}$, con una expresión para la tasa de reacción en la fase gaseosa tipo núcleo sin reaccionar de la siguiente forma (**Bhattacharya and P. Purohit P.** 2004; **Szekely J.** and **Propster M.** 1975):

$$\dot{r} = \rho_{m,B} \int_0^\infty \frac{-dr_c}{dt} 4\pi r_c^2 f_c dr_c \qquad (18)$$



Figura 6. Esquema en el que se ilustra el cambio del tamaño de grano durante el proceso y en el que se identifica el radio de la zona sin reaccionar (rc), El radio inicial (ro) antes de iniciar el proceso y el radio en cada instante de tiempo (rp).



Figure 7. Esquema para ilustrar la evolución del cambio de tamaño de grano durante el proceso.

$$\frac{-dr_c}{dt} = \frac{-kC}{\rho_{m,B} \left[1 + \frac{\alpha k}{D_e} r_c \left(1 - \frac{r_c}{r_p} \right) \right]}$$
(19)

k es la constante cinética para la reacción tipo Arrhenius, y $D_e = D_g \epsilon^2$ es la difusividad de la especie A en un medio libre afectada por la porosidad ε de acuerdo con (**García-Liabano F.** *et al.***, 2002). La conversión local se define de la siguiente manera:**

$$X(R,t) = 1 - \frac{M_{C,3}(R,t)}{M_{0,3}}$$
(20)

En consecuencia se puede hallar la conversión promedio en todo el pellet:

$$\dot{X} = 3 \, \frac{\int_0^{K_P R^2} X dR}{R_P^3} \tag{21}$$

La evolución de la función de distribución se puede predecir con base en la ec. (6) en el que término de aceleración corresponde a la variación $\frac{\partial r_l}{\partial t}$, los términos de generación o destrucción corresponde a los de nacimiento y muerte (B y D) (**Falola A.** *et al.*, 2013):

$$\frac{\partial f_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r_j} \left[\left(\frac{\partial r_j}{\partial t} \right) f_j \right] - B + D = 0$$
(22)

Donde f_j es la función de densidad de distribución de radio de grano y representa el número de granos de radio r_j por unidad de volumen, *B* es la tasa de nacimiento de nuevos granos, mientras que *D* es la tasa de desaparición de granos por sinterización. La ecuación de balance de población se puede transformar en ecuaciones de momento, que son más fáciles de resolver. Multiplicando la ecuación (9) por r_j^n e integrando entre 0 y ∞ para obtener una nueva ecuación:

$$\frac{\partial M_{n,j}}{\partial t} - n \left\langle r_j^{n-1} \frac{dr_j}{dt} \right\rangle + \int_0^\infty r_j^n (D-B) \, dr_j = 0 \qquad (23)$$

Donde $M_{n,j}$ es:

$$M_{j,n} = \int_0^\infty r_j^n f_j \, dr_j \tag{24}$$

Con n = 0, 1, 2, 3...y j=0, c, p; en consecuencia se presenta tres ecuaciones para tener en cuenta la evolución de los tres radios de granos según Figura 6. El resultado clave del modelo es la predicción correcta de la conversión en el tiempo tal como se ilustra en la Figura 8.

El nuevo modelo propuesto por Maya y Chejne predice el comportamiento de la conversión con mayor exactitud que el modelo clásico llamado "Modelo de tamaño de grano cambiante" (**Georgakis C.** *et al.* 1979).

Modelo de un sistema fluido dinámico

Un sistema fluido dinámico está conformado por una o varias especies en movimiento en espacios abiertos o confinados, dando sentido al flujo de fluidos en sistemas de combustión, mezclado de especies, separación de sustancias en equipos como ciclones, etc. Un ejemplo que es de interés para la ingeniería es la predicción del mezclado de una especie que entra como un chorro de un fluido a una cámara donde existe otro fluido en movimiento o estático.



Figura 8. Evolución de la conversión en el tiempo.

La dinámica de fluidos se puede simular mediante las ecuaciones de balances (ec. 11-13, 15) presentadas en su forma apropiada y en la escala macroscópica. Para el caso del balance por especies y considerando la densidad por especies, $\rho_j = \rho Y_j$; la velocidad promedio o de bulto, $\vec{v} = \langle \vec{\xi} \rangle$; el flux de la especie *j* modelado mediante la Ley de Fick, $J_j = \rho_j \langle \vec{\xi}'_j \rangle = -D_j \frac{\partial Y_j}{\partial \vec{x}}$, en el que D_j es la difusividad de la especie *j* en el medio y el término de generación representado por la generación o destrucción de especies mediante reacción química $\hat{S_j} \stackrel{'''}{=} \hat{r_j}^{'''}$; la ecuación (11) se transforma en:

$$\frac{\partial \rho Y_j}{\partial t} = \frac{-\partial \rho Y_j \vec{v}}{\partial} - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \left(-\rho D_j \frac{\partial Y_j}{\partial \vec{x}} \right) + S_j^{'''} \quad (25)$$

Realizando la suma para todas las especies, la ec. (25) se transforma en la ecuación de continuidad,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{-\partial \rho \vec{v}}{\partial \vec{x}}$$
(26)

En el caso del balance de momento y teniendo en cuenta que el tensor de esfuerzo viscoso más la presión es el correspondiente al término de fluctuaciones $(\vec{\tau} + P\vec{\delta} = \rho \langle \xi' \xi' \rangle$, la cual se modela mediante la Ley de Newton, la ec. (13) y se convierte en:

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} = \frac{-\partial \rho \vec{v} \vec{v}}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \vec{t}}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial P}{\partial \vec{x}} + \rho \vec{\xi' e}$$
(27)

En el caso del balance de entalpía, se construye primero la ecuación para la energía cinética con base en la ec. (27). El balance de energía cinética se halla al multiplicar la ecuación de momento (ec. 27) por el campo de velocidad obteniéndose la ecuación de balance para la energía cinética:

14

$$\frac{\partial \rho\left(\frac{1}{2}\vec{v}\cdot\vec{v}\right)}{\partial t} = \frac{-\partial}{\partial\vec{x}} \cdot \left[\rho\left(\frac{1}{2}\vec{v}\cdot\vec{v}\right)\vec{v}\right] - \frac{\partial}{\partial\vec{x}} \cdot \left[\vec{\tau}\cdot\vec{v}\right]$$

$$-\frac{\partial}{\partial\vec{x}} \cdot \left[P\vec{v}\right] + \rho\vec{\xi'e} \cdot \vec{v} + \vec{\tau} : \frac{\partial\vec{v}}{\partial\vec{x}} + P\left(\frac{\partial}{\partial\vec{x}}\cdot\vec{v}\right)$$
(28)

Una vez obtenida la expresión para la energía cinética, se toma la ecuación para la energía, ec. (15) con $h = \frac{1}{2} \langle \vec{\xi}' \cdot \vec{\xi}' \rangle + P \cdot \left(\frac{1}{\rho}\right)$, el término fluctuante se modela mediante

la Ley de Fourier, $-\rho \alpha \frac{\partial h}{\partial \vec{x}} = \rho \left(\frac{1}{2} (\vec{\xi}' \cdot \vec{\xi}') \vec{\xi}' \right)$, en el que α es la difusividad térmica y se le resta la ec. (28) para lograr una expresión del balance de entalpía (*h*):

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \frac{-\partial}{\partial \vec{x}} \cdot \left[\rho h \vec{v} + \sum_{j} \tilde{h}_{j} \left(-\rho D_{j} \frac{\partial Y_{j}}{\partial \vec{x}} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot \left[-\rho \alpha \frac{\partial h}{\partial \vec{x}} \right] + \frac{DP}{Dt} + \vec{\tau} : \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{x}} + \dot{S}_{rad}^{'''}$$
⁽²⁹⁾

Cuando se tiene el fluido en régimen turbulento, tanto la fracción de la especie j (Y_A) y el campo de velocidad (\vec{v}) es una cantidad fluctuante en la escala macroscópica y puede descomponerse en el tiempo, de la misma manera como se descompuso el campo de velocidad $\vec{\xi}$ de la escala mesoscópica (ec. 9):

$$\vec{v} = \langle \vec{v} \rangle + \vec{v}' y Y_A = \langle Y_A \rangle + Y_A'$$
(30)

En la ec. (30) los valores promedios son en el tiempo: $\langle \vec{v} \rangle = \int_0^T \vec{v} dt \ y \langle Y_A \rangle = \int_0^T Y_A dt$. De esta manera las ec. (25-27 y 29) se convierten en el modelo Reynolds Averaged Navier– Stokes Equations (RANS):

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle}{\partial t} = \frac{-\partial \langle \rho \vec{v} \rangle}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \langle \rho' \vec{v}' \rangle}{\partial \vec{x}}$$
(31)

$$\frac{\partial \langle \rho Y_{j} \rangle}{\partial t} = \frac{-\partial \langle \rho Y_{j} \rangle \langle \vec{v} \rangle}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \left\langle -D_{j} \frac{\partial Y_{j}}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \langle \rho Y_{j}' \vec{v}' \rangle}{\partial \vec{x}} + \langle \hat{r}_{j}''' \rangle (32) \right.$$
$$\left. - \frac{\partial \langle \rho \rangle \langle \vec{v} \rangle}{\partial t} = \frac{-\partial \langle \rho \rangle \langle \vec{v} \rangle \langle \vec{v} \rangle}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \langle \vec{r} \rangle}{\partial \vec{x}} \right. \tag{33}$$
$$\left. - \frac{\partial \langle \rho \rangle \langle \vec{v}' \vec{v}' \rangle}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \langle P \rangle}{\partial \vec{x}} + \langle \rho \rangle \left(\vec{\xi}^{e} \right) \right.$$
$$\left. \frac{\partial \langle \rho h \rangle}{\partial t} = \frac{-\partial \langle \rho h \rangle \langle \vec{v} \rangle}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \left(-\rho \alpha \frac{\partial h}{\partial \vec{x}} \right) \right. \tag{34}$$
$$\left. - \frac{\partial \langle \rho h' \vec{v}' \rangle}{\partial \vec{x}} + \left(\dot{S}_{rad}''' \right) \right\}$$

Nuevamente aparece un término adicional $\langle \rho' \vec{v}' \rangle$ en la ec. (31), $\langle \rho Y_j' \vec{v}' \rangle$ en la ec. (32), $\langle \rho \rangle \langle \vec{v}' \vec{v}' \rangle$ en la ec. (33) y $\langle \rho h' \vec{v}' \rangle$ en la ec. (34), los cuales deben ser modelados para tener un sistema cerrado. Para ello existe diversas propuestas como el modelo $k - \varepsilon$ para el caso de la ecuación de momento (ec. 30).

También, se puede hacer la descomposición del campo de velocidades en el espacio:

$$\vec{v} = \langle \vec{v} \rangle_l + \vec{v}' \tag{35}$$

Donde $\langle \vec{v} \rangle_l = \int G(\vec{x} - \vec{x}') \vec{v} d\vec{x}' y G(\vec{x} - \vec{x}')$ es una función de filtrado que significa realizar un promedio entre dos puntos del espacio, suavizando el comportamiento aleatorio y permitiendo reducir tiempo de cómputo. Luego se utiliza el concepto de promedio de Favre:

$$\langle \vec{v} \rangle_L = \frac{\langle \overline{\rho} \vec{v} \rangle_l}{\langle \rho \rangle_l}$$
 (36)

Con lo cual, las ec. (26 y 27) se convierten en el modelo Large Eddy Simulation- LES se obtiene la nueva ecuación del momento (**aberi F. A.** *et al.* 1999; **Pope S.B.** 1990):

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle_l}{\partial t} = \frac{-\partial \langle \rho \rangle_l \langle \vec{v} \rangle_L}{\partial \vec{x}}$$
(37)

$$\frac{\frac{\partial \langle \rho \rangle_{l} \langle Y_{j} \rangle_{L}}{\partial t} = \frac{-\partial \langle \rho \rangle_{l} \langle \vec{v} \rangle_{L} \langle Y_{j} \rangle_{L}}{\partial \vec{x}}}{\frac{\partial \left\langle -D_{j} \frac{\partial Y_{j}}{\partial \vec{x}} \right\rangle_{l}}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial \langle \rho \rangle_{l} \langle Y_{j}' Y_{j}' \rangle_{L}}{\partial \vec{x}} + \left\langle \hat{r_{j}}^{\prime \prime \prime} \right\rangle_{l}}$$
(38)

$$\frac{\frac{\partial\langle\rho\rangle_{l}\langle\vec{v}\rangle_{L}}{\partial t}}{-\frac{\partial\langle\rho\rangle_{l}\langle\vec{v}'\vec{v}'\rangle_{L}}{\partial\vec{x}} - \frac{\partial\langle\rho\rangle_{l}\langle\vec{v}\rangle_{L}\langle\vec{v}\rangle_{L}}{\partial\vec{x}} - \frac{\partial\langle\vec{\tau}\rangle_{l}}{\partial\vec{x}} + \langle\rho\rangle_{l}\left\langle\vec{\xi'e}\right\rangle_{l}}$$
(39)

$$\frac{\partial \langle \rho \rangle_{l} \langle h \rangle_{L}}{\partial t} = \frac{-\partial \langle \rho \rangle_{l} \langle \vec{v} \rangle_{L} \langle h \rangle_{L}}{\partial \vec{x}} - \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \left(-\rho \alpha \frac{\partial h}{\partial \vec{x}} \right)_{l} - \frac{\partial \langle \rho h' h' \rangle_{L}}{\partial \vec{x}} + \left\langle \dot{S}_{rad}^{\prime \prime \prime} \right\rangle_{l}$$
(40)

Aquí también, los términos adicionales $\langle \rho \rangle_l \langle Y_j' Y_j' \rangle_L$, $(\langle \rho \rangle_l \langle \vec{v}' \vec{v}' \rangle_L)$ y $\langle \rho h' h' \rangle_L$ deben ser modelado para lograr un sistema de ecuaciones cerrado que para la fluctuación en el esfuerzo existen varias propuestas como *Smagorinsky model* (**Mejía J. M.** 2012).

Esquema probabilístico. Situaciones como el caso turbulento en que las cantidades fluctúan debido a las condiciones, tanto iniciales, como de fronteras; o que el medio por donde fluye la materia hace que las cantidades físicas no sean uniformes en el tiempo ni en el espacio, sino que varían y lo hacen de manera rápida; obligando al modelador tener que solucionar las ecuaciones de balance en una escala de tiempo y del espacio muy pequeña, demandando un enorme costo computacional. En consecuencia, en este caso se puede utilizar un método estocástico que permite hallar una función de distribución de ocurrencia de fluctuaciones mediante una ecuación diferencial estocástica (DSE), para luego encontrar el promedio de la correlación entre las variables fluctuantes o aleatorias y su promedio.

Se trata ahora de lograr un modelo escala para las funciones escalares como la fracción de cada especie o la entalpía. Para ello, se discute el método de la Función de densidad de Masa Filtrada (FMDF), denotada por $F_L(\psi; \vec{x}, t)$; donde, ψ es un vector que incluye el dominio de las fracciones de cada especie y otras cantidades escalares como la entalpía:

$$F_L(\psi; \vec{x}, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho(\vec{x}', t) \prod_{s=1}^{n} \delta(\psi_s - \phi_s) G(\vec{x} - \vec{x}') d\vec{x}'$$
(41)

Es importante ver que la integral de $F_L(\psi; \vec{x}, t)$ sobre todo el dominio del campo escalar es el promedio de la densidad filtrada:

$$\int_{-\infty}^{\infty} F_L(\psi; \vec{x}, t) d\psi = \langle \rho(\vec{x}, t) \rangle_l$$
(42)

Con base en las propiedades de $F_L(\psi; \vec{x}, t)$, la ecuación de Kolmogorov, el teorema de Bayes se logra una ecuación de transporte para $F_L(\psi; \vec{x}, t)$:

$$\frac{\partial F_L(\psi;\vec{x},t)}{\partial t} = \frac{-\partial}{\partial \vec{x}} \cdot \left[\langle \vec{v}(\vec{x},t) | \psi \rangle_l F_L(\psi;\vec{x},t) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial \psi_s} \cdot \left[\left\langle \frac{1}{\langle \rho(\phi) \rangle} \frac{\partial}{\partial \vec{x}} \cdot \vec{J}^s \right| \psi \right\rangle_l F_L(\psi;\vec{x},t) \right]$$
(43)
$$- \frac{\partial}{\partial \psi_s} \cdot \left[\left\langle \dot{S}(\psi) \right\rangle^{\prime\prime\prime}_{s} F_L(\psi;\vec{x},t) \right]$$

La cual es la ecuación exacta de transporte de FMDF; sin embargo, existen términos que deben ser modelados como lo son el primer y segundo término del lado derecho de la ec. (43). Dada la alta dimensionalidad de la ec. (43), su solución numérica suele realizarse mediante métodos de partículas. Se define un sistema de partículas sin masa que evolucionan en los dominios temporal, espacial y composicional, basado en un conjunto de ecuaciones estadísticamente equivalente a la Ec. (43). Así, un ensemble de partículas estocásticas da cuenta de la evolución de FMDF discreta.

De acuerdo con el número de partículas empleadas, la aproximación LES-FMDF permite obtener una mayor resolución espacial, reduciendo así la incertidumbre existente en la subescala. Es por esto que se ha reportado que la dependencia de los modelos de subescala se relaja cuando se emplean métodos de partículas para la solución de la FMDF. La discusión anterior puede también interpretarse como un proceso de escalado "natural" en donde el comportamiento de la física del transporte y mezclado de escalas espaciales menores a la de LES se transmite hacia las superiores a través del promedio de ensemble de partículas que, individualmente, evolucionaban de acuerdo con las leyes naturales de la evolución.

Como aplicación del método estocástico combinado con el método de LES para el caso del campo de velocidades se describe con detalle en la tesis de doctorado de Juan Manuel Mejía Cárdenas y dirigida por el autor de la presente revisión (**Mejía J. M.** 2012). El caso tratado en la tesis se refiere al chorro de fluido que se observa al descargar un fluido a través de un orificio. La predicción del contorno turbulento se puede observar en la Figura 9.

Nuevamente, la combinación de métodos, en esta caso el método Large Eddy Simulation-LES y otro de corte estocástico como FMDF ha permitido simular con eficacia el chorro de un fluido entrando a un espacio confinado.



Figure 9. Visualización de la concentración de una especie en el espacio confinado después de la descarga del chorro (Izquierda): Iso-superficie; (derecha): Gráfico de contorno. Las partes más oscuras denotan máxima concentración. La línea discontinua indica la propagación lineal del chorro (**Mejía J. M.** 2012).

Apuntes finales

Se ha mostrado en este artículo de manera sucinta que para predecir la dinámica de los sistemas naturales se debe conocer la velocidad y la posición de un número enorme de partículas. Una vez conocidas estas dos magnitudes en cada instante de tiempo, se tiene definido los diferentes estados; los cuales, muchos de ellos son repetidos. En consecuencia, se tiene la posibilidad de tener una función que da cuenta de la probabilidad de construir una distribución de estados y por ende, se tendrá una función de densidad de probabilidades (PDF), la cual es una función que depende de 3N variables espaciales, 3N variables de velocidad y una del tiempo; por lo tanto, es una tarea difícil de resolver y se requiere reducir la complejidad.

La reducción exige integrar la PDF sobre 6N-1 variables de espacio y de velocidad, para obtener una función reducida que identifica un grupo de estados asumidos por grupos de una partícula de un mismo tipo, que solo depende de una variable de espacio y otra de velocidad en el espacio fase y por supuesto del tiempo. De esta manera se pasa a una nueva escala mayor, en la que existe una función de distribución de probabilidades de un conjunto de estados generados por la dinámica de una sola partícula y que recibe información del resto de partículas, como una información adicional fluctuante.

Las múltiples escalas de los sistemas naturales son modelados con base en la descomposición de cantidades físicas entre un valor promedio y un término fluctuante. El término que agrupa el valor puntual de una cantidad física constituye un valor promedio y permite el nacimiento de una nueva escala mayor. De otro lado, el término fluctuante rescata la información de la escala menor, el cual genera términos adicionales en las ecuaciones de balance que deben ser modelados. Los esfuerzos encaminados a obtener información de la escala menor han permitido la definición de leyes constitutivas como aquellas que se utilizan para modelar los fenómenos de transporte (la Ley de Fick, Fourier, Newton y de Ohm). También existen esfuerzos para modelar la escala microscópica y otra que corresponde a una escala mayor, la mesoscópica, en conexión con el mundo micro a través de la ecuaciones de la mecánica clásica y términos aleatorios que permiten encontrar expresiones teóricas de los términos abiertos y sin definir en las ecuaciones de balance (**Schindler M.** 2010; **Español P.** 2013; **Tyagi M.** 2010).

Finalmente, se deben tener estrategias de solución numérica y para ello se proponen métodos novedosos como los elementos de fronteras y multi-dominio (**Flórez W. F., Power H.** and **Chejne F.,** 2002; 2002; 2000; 2000), los cuales generan soluciones de las ecuaciones de balance y en algunos casos superan los métodos de diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos.

Agradecimientos

El autor agradece al profesor Fanor Mondragón de la U. de A., a Juan Manuel Mejía, Carlos Gómez, Diego Alejandro Camargo, Juan Carlos Maya y Jessi Osorio, que enriquecieron este manuscrito con sus aportes. Adicionalmente, un especial agradecimiento a mis estudiantes de Maestría y de doctorado del grupo TAYEA que aportaron de manera indirecta a la elaboración del presente artículo, entre ellos, Jorge Montoya, Carlos Valdés, Víctor Borda, David Granados, Jader Alean, Esteban Largo, Alejandro Jaramillo, Liliana López, Adriana Blanco, Gloria Marrugo, Robert Macías, Javier Ordoñez, Alejandro Ricalde, Raiza, Gabriel y Daniela; a los profesores del grupo TAYEA, Bibian Hoyos, Carlos Londoño, Javier de la Cruz, Daniel Barrága y Farid B. Cortés; a los profesores, y primeros estudiantes de doctorado Whady Felipe Flórez, Alejandro Rivera, Oscar Ochoa, Vladimir Martínez y Erika Arenas y mi amigo Alana Hill del Grupo Energía y Termodinámica de la UPB; finalmente, al profesor Germán Poveda por su confianza y apoyo incondicional, así como a la Universidad Nacional de Colombia.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Bibliografía

- Bell, A. D. (1986). The simulation of branching patterns in modular organisms. Philos. Trans. Royal Society London, Ser. B, 313: 143-169.
- **Bejan, A.** (2000). Shape and Structure, from Engineering to Nature. Cambridge University Press.
- **Bejan, A.** (1997). Advanced Engineering Thermodynamics. John Wiley and Sons.
- Bejan, A. (2005). The Constructal Law of Organization in Nature: Tree – Shaped Flow and Body Size. The Journal of Experimental Biology, 208: 1677-1686.
- Bhattacharya, A., Purohit, P. (2004). Predicting reaction rates for non-catalytic fluid–solid reactions in presence of structural changes in the solid phase. Chemical Engineering Journal, 102 (2): 141-149
- Byron Bird R., Warren E. Stewart, E. N. Lightfoot, (2002). Fenómenos de Transporte. United State: John Wiley & Sons.
- Callen H. B., Welton, T. A. (1951), Irrevarsibility and Genralized Noise. Physical Review 83: 1.
- Chejne, F., Hernández, J. P. W., Florez W.F. and Hill, A.F.J. (2000). Modelling and simulation of time-dependent coal combustion processes in stacks. Fuel **79**: 987-997.
- Chejne, F., Hernández, J. P. (2002). Modelling and Simulation of Coal Gasification Process in Fludized Bed. Fuel, v. 81 p.1687-1702.
- **Chejne, F., Ragimova, T., Florez, W.F., Hernández, J.P.** (2002). Theoretical Model for heat transfer in the single crystal making. Revista de La Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia. ISSN: 01202064 v. Junio, (26) p.79-89.
- Chejne, F., Lopera, E., Londoño, C.A. (2011). Modelling and simulation of a coal gasification process in pressurized fluidized bed. Fuel; 90: 399-411.
- Chejne, F., Macías, A., Estrada, D., Velasquez, H. I., Londoño, C. A. (2011), Radiation model for predicting temperature evolution in solar cooker, DYNA ISSN 0012-7353,Nro 166, pp 68-74, Medellin, Abril.
- Chejne F., F. Moukalled, C. A. Gómez (2013). A Simple Derivation of Crooks Relation; International Journal of Thermodynamics (IJoT), ISSN 1301-9724/e-ISSN 2146-1511, Vol. 16 (No 3), pp 97-101.
- Chejne, F., Camargo. D.A., Pabón E., CarrascoMarín, F. (2015). Effect on mass transference phenomena by textural change inside monolithic carbon aerogels. Editor and place of publication: 14321181, 09477411 Heat Mass Transfer, Germany, January.
- **De Groot S. R.** (1968). Termodinámica de los Procesos Irreversibles. Madrid: Alhambra, p 268.
- Einstein, A. (1905). On the movement of small particles suspended in a stationary liquid demanded by the molecular kinetic theory of heat; Annalen der Physik **17:** 549-560.
- Eran, S., M. Michael and L. S. Harry, (1986). Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, 313, pp. 143-169.
- **Español, P.** (2013). The Micro-Meso connection also known as Non-equilibrium Statistical Mechanics also known as The Theory of Coarse-Graining. Lecture notes at UAM, Madrid, España, Noviembre.
- Falola, A., Borissova, A., Wang, X. Z. (2013). Extended method of moment for general population balance models including size dependent growth rate, aggregation and breakage kernels. Computers & Chemical Engineering, 56: 1-11.
- Flórez, W., H. Power, H., F. Chejne, F. (2000). Multi-domain dual reciprocity BEM approach for the Navier-Stokes system of equations Communications in Numerical Methods in Engineering ISSN: 1069-8299 Wiley v.16 fasc. p.671-681.

- Flórez Escobar, W., H. Power, H., F. Chejne, F. (2000). Conservative interpolation for the boundary integral solution of the Navier-Stoker equations. Computational v.26 fasc. p.507-513
- Flórez, W., H. Power, H., F. Chejne, F. (2002). Método de elementos de frontera multi-dominio para problemas no newtonianos y no isotérmicos. In Matemáticas Enseñanza Universitaria,
- Flórez, W., H. Pawer, H. F. Chejne, F. (2002). Numerical Solution of Thermal Convection Problems Using the Multi-domain Boundary Element Method. Numerical Methods For Partial Differential Equations, ISSN: 0749-159X Wiley v.18 fasc.3 p.469-482.
- García-Labiano, F., Abad, F. A., de Diego, I. F., Gayán, P., Adánez, J. (2002). Calcination of calcium-based sorbents at pressure in a broad range of CO2 concentrations. Chemical Engineering Science, 57 (13): 2381-2393.
- Gardiner, C.W. (2004). Handbook of Stochastic Methods; Springer, Germany, 3rd Edition.
- Georgakis, C., Chang, C.W., Szekely, J. (1979). A changing grain size model for gas-solid reactions. Chemical Engineering Science, 34 (8): 1072-1075.
- Gibb, M. (1960). Elementary principles in Statically Mechanics, Dover, New York.
- Granados, D. A., Chejne, F., Mejía, J.M. (2015). Oxy-fuel combustion as an alternative for increasing lime production in rotary kilns: 03062619 Applied Energy, Amsterdam – Holland November.
- Granados, D. A., Chejne, F., Mejía, J. M., Gómez, C.A. Berrío, A., Jurado, W.J. (2013). Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln; Energy 1-11.
- Hoyos, B.A., Chejne, F. (2015). Comparison of molecular models of carbon monoxide for calculation of vapor-liquid equilibrium. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, Medellín – Colombia, Junio.
- Haase, R. (1990). Thermodynamics of Irreversible Processes. New York: Dover, p 513.
- Hines, A., Maddox, R. (1987). Transferencia de Masa: Fundamentos y Aplicaciones. México: Prentice Hall, p 568.
- Jaberi, F. A., Colucci, P. J., James, S., Givi P., Pope, S. B. (1999). Filtered mass density function for large-eddy simulation of turbulent reacting flow. J. Fluid Mech. vol 401, pp 85-121.
- Kurchan, J. (2005). In and Out Equilibrium. Nature, Vol. 433, 20.
- Landau, L. D. E. M. Lifshitz. (1969). Física Estadística, Reverté, Barcelona.
- Maya, J.C., Chejne, F. (2016). Novel Model For Non Catalytic Solid-Gas Reactions With Structural Changes By Chemical Reaction And Sintering. Chemical Engineering Science, pp. 258-268.
- Mejía, J. M., Chejne, F., Smith, R., Rodríguez, L.F., Fernández, O., Dyner, I. (2005). Propuestas Metodológicas para el diseño de aspas de turbinas de viento de Eje horizontal. Rev. Energética Universidad Nacional de Colombia, 33, Julio. ISSN 0120-9833.

- Mejía, J. M. (2012). Scalar transport and mixing using large eddy simulation. Tesis doctorado, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia.
- Mejía, J.M., Sadiki, A., Molina, A., Chejne, F., Pantangi, P. (2015). Large Eddy Simulation of the mixing of a passive scalar in a high-Schmidt turbulent jet. Editor and place of publication: 0098-2202 Journal Of Fluids Engineering-Transactions Of The ASME, Washington – United States, January.
- Mejía, J. M., Chejne, F., Molina, A., Sadiki, A. (2015). Scalar Mixing Study at High-Schmidt Regime in a Turbulent Jet Flow Using Large-Eddy Simulation/Filtered Density Function Approach, Editor and place of publication: 0098-2202 Journal Of Fluids Engineering-Transactions Of The ASME, Washington – United States, October.
- Myung, I.J. (2000). The Importance of Complexity in Model Selection. Journal of Mathematical Psychology 44: 190-204.
- Moore, J. (2015). Pragmatism, mathematical models and the scientific ideal of prediction and control. Behavioural Processes 114: 2-13.
- Öttinger, H.C. (1996). Stochastic Process in Polymeric Fluid. Springer, Germany.
- Kubo, R. (1966). The Fluctuation-Dissipation theorem, Rep. Prog. Phys. 29: 255.
- Pope, S. B. (1990). Computations of turbulent combustion: Progress and challenges. Proceeding of the Combustion Institute; 23: 591-612.
- **Prigogine, I. G. Nicolis.** (1987). La Estructura de lo Complejo. Editorial Alianza.
- Prusinkiewicz, P. (1998). Modeling of spatial structure and development of plants: a review. Scientia Horticulturae, Volume 74, Issues 1–2, 30 April, Pages 113-149
- Reichl, L.E. (1998). A Modern Course in Statistical Physics", John Wiley and sons, Inc., "2nd edition
- Rivera, A., Chejne, F. (2004). Non-linear phenomena in thermoacoustic engines. Revista Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, ISSN 0340-0204, Vol. 29, No 3, p. 209-220.

- Serra, R., Andretta, M., Company M., and Zanarini, G. (1986). Introduction To The Physics of Complex Systems. Pergamon press, Headington Hill Hall, Oxford, England.
- Sharon, E. M. Marden M and H. L. Swinney, H.L. (2005). Flores y Hojas Onduladas. Investigación y Ciencia, 344, pp.70-77, Mayo.
- **Stachel, J.** (1998). Einstein's Miraculous Year; edited and introduced by Princeton University Press, USA.
- Stevens, P.S. (1974). Patterns in Nature," Little, Brown and Co., Boston. P 256.
- Schindler, M. (2010). A numerical test of stress correlation in fluctuating hydrodynamics. Chemical Physics 375: 327-336.
- Szekely, J., Propster, M. (1975). A structural model for gas solid reactions with a moving boundary—VI: The effect of grain size distribution on the conversion of porous solids. Chemical Engineering Science, **30** (9): 1049-1055.
- Thompson, D. W. (1917). On growth and form. Cambridge [Eng.] University press.
- Tolman, R. (1979). The Principles of Statistical Mechanics. Dover, New York.
- Turing, A. (1952). On the Chemical Basis of Morphogenesis. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B, 327, pp. 37-52.
- Tyagi, M. (2010). Probability Density Function approach for modeling multi-phase flow in porous media. Dissertation ETH Zurich No. 18997.
- Velásquez J.E., Chejne F. (2003). Estudio de los fenómenos acoplados en transporte y transferencia: Aprovechamiento por la Ingeniería Química. Ingeniería Química, No. 398.
- Ye, R., C. Xiang, J. Lin, Z. Peng, K., Yan, H.Z., Tour, J. M. (2013). Coal as an abundant source of graphene quantum dots. Nature Communications, 4: 2943.

Stenorhynchosaurus munozi, gen. et sp. nov. a new pliosaurid from the Upper Barremian (Lower Cretaceous) of Villa de Leiva, Colombia, South America

María Eurídice Páramo-Fonseca^{1,*}, Marcela Gómez-Pérez², Leslie F. Noé², Fernando Etayo-Serna³

¹ Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
² Departamento de Geociencias, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia
³ Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia

Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 40(154):84-103, enero-marzo de 2016

doi: http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.239

En la página 96, en la sección titulada "Systematic discussion", la edad de *Kronosaurus boyacensis* Hampe,1992 no ha sido consignada correctamente. En el 5° renglón de esta sección el texto que aparece como "The Albian (Upper Cretaceous) *Kronosaurus boyacensis* Hampe, 1992..." debe leerse "The Aptian (Lower Cretaceous) *Kronosaurus boyacensis* Hampe, 1992..."

Enfoque y alcance

La Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN) 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 físicas (física, físico-química, materiales y matemáticas); ciencias naturales (biología, botánica, zoología, ecología, bioquímica, química); ciencias de la tierra (geología, medio ambiente); ciencias humanas (filosofía, sicología, antropologia, sociología); ciencias biomédicas y ciencias químicas, 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, Online Computer Library Center - OCLC, Zentralblatt für Mathematik, Zoological Record, RLG. Nacionalmente se encuentra reseñada en la base de datos Publindex de Colciencias.

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, al acceso y a la difusión de la producción científica.

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 37 volúmenes.

Criterios para publicar

Indicaciones a los autores

Los autores deben tener en cuenta las siguientes indicaciones:

- Los trabajos presentados deberán ser originales en inglés o español y de alto nivel sobre aspectos relacionadas con las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Todos los trabajos aceptados quedan como propiedad permanente de la Academia Colombiana Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de manera que la misma podrá publicarlos en formato físico y electrónico, incluyendo internet (Ver transferencia de derechos de autor).
- 2. El autor de la correspondencia debe aceptar mediante comunicación escrita firmada que el manuscrito es un trabajo original y no ha sido publicado por ningún medio, ni está siendo evaluado por otra publicación impresa o electrónica y que ha sido aceptado por todos los autores para su publicación en la Revista y que los derechos de

A nuestros lectores y autores

autor no han sido cedidos a nadie con anterioridad (Ver formato 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 debe ser suficiente como para aceptar públicamente la responsabilidad de los aportes de cada uno. El orden de los autores en la publicación deberá ser una decisión compartida de los coautores, que deben ser capaces de explicar el orden en el que aparecen sus nombres.
- 4. De acuerdo con el ICMJE, todos los colaboradores que no cumplen los criterios de autoría o hayan realizado contribuciones menores deben aparecer en la sección de agradecimientos, pero no ser citados como autores. Las ayudas económicas y materiales deben aparecer en los agradecimientos.
- 5. La terminología física, química y bioquímica, debe seguir las normas del Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de la Química Pura y Aplicada (IUPAC). Deben usarse las abreviaturas internacionales convencionales y las unidades del Sistema Internacional (SI). Los nombres científicos se deben escribir con la forma recomendada por "Internacional Code of Botanical Nomenclaure"

Envío y presentación del manuscrito

Los artículos deben enviarse a través de http://www.raccefyn.co

El manuscrito, incluyendo además de la página del título, el resúmenes, las referencias, las tablas y sus títulos, las leyendas de figuras, deben estar escritos en procesador de palabras Word a doble espacio, usando la fuente Arial de tamaño 12, sin justificar el texto. No olvide usar la numeración en todo el manuscrito.

Los manuscritos deben incluir la siguiente información:

- 1. Una página en Word con los nombres y apellidos (nombre completo y apellido, 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.
- 2. Título completo del manuscrito en español e inglés.
- 3. Título corto
- 4. Resumen en español y en inglés que no supere 250 palabras.
- 5. Palabras clave en español y en inglés que no superen en número a seis.

- 6. Nombre del autor responsable de la correspondencia con su dirección completa, número telefónico y dirección electrónica.
- 7. Direcciones electrónicas de todos los coautores.
- 8. Texto, referencias y tablas en un mismo archivo junto con las leyendas de las figuras.
- 9. Figuras en formato jpg o tiff.

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 la metodología empleada en el estudio.

Análisis estadístico: señalar los métodos estadísticos utilizados y cómo se han analizado los datos.

Resultados: deben presentarse en secuencia lógica, con las tablas y 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 la 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: Resumen de la investigación y su estado actual. Aquí se pueden plantear objetivos futuros a seguir en la línea de investigación.

Citación: todas las referencias bibliográficas se insertarán en el texto y deberán llevar siempre el apellido del autor o autores y el año de publicación entre paréntesis. 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 son tres, cuatro o cinco autores se pondrán los apellidos de todos los autores la primera vez que se referencian en el texto, y después sólo se pondrá el apellido del primer autor seguido de *et al.* Si son seis o más autores sólo se pondrá el apellido del primero añadiendo "*et al.*", desde la primera vez que se referencian. Si existieran varias referencias de un autor en un mismo año se consignarán con las letras a, b, c, etc., después del año.

Cita directa o textual

Si la cita textual tiene menos de 40 palabras se presenta entre comillas dentro del texto y al final se incluye entre paréntesis el apellido, año de publicación y la página de donde se extrajo.

Ejemplo:

El objetivo de los estudios explicativos es "responder a las causas de los eventos físicos o sociales" (Hernández, Fernández y Baptista, 1991, p.66).

Si la cita comprende más de 40 palabras se ubica en un bloque independiente del texto, sin comillas y dejando una sangría al lado izquierdo.

Ejemplo:

Las revistas científicas son sistemas contextuales de comunicación, de difusión académico investigativa y fortalecimiento de competencias científicas (escritura, investigación, evaluación, edición), en los cuales la comunidad académica comparte creencias, orientaciones y el compromiso de contribuir, utilizar y hacer avanzar el conocimiento de forma colaborativa y cooperativa. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4).

Parafraseo o resumen

Se debe mencionar al autor y la fecha.

Ejemplo:

Según Sánchez (1991), el cemento es uno de los materiales más populares e indispensables en la construcción actual.

Existen dos tipos de aprendizaje: la recepción pasiva de conocimientos y el redescubrimiento de la realidad (Piaget, 1980).

Si se cita un documento escrito entre tres y cinco autores, deben escribirse los apellidos de todos la primera vez que se citen y después incluir el apellido del primer autor seguido de "*et al.*" (sin cursiva y con punto después del "al.").

Si se cita un documento escrito por seis o más autores, se presenta la primera cita con el apellido del primer autor seguido de "*et al.*". En la lista de referencias escriba las iniciales y apellidos de los primeros seis autores y para los restantes utilice "*et al.*"

Lista de referencia

Es el listado alfabético (según el primer apellido de los autores citados en negrilla) de las fuentes consultadas y citadas durante la redacción de un trabajo. La lista de referencias es obligatoria. Se deben citar de la siguiente manera:

Libros

Autor. Año. Título completo. Edición. Editorial, lugar de publicación, página

Ejemplo:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Revista seriada

Autor, A.A., B.B. Año. Título del artículo. Título de la revista publicación seriada, volumen (número entre paréntesis), páginas del artículo.

Ejemplo:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la Rev. Acad. Colomb. Cienc. 38(147):218-22.

Artículo de revista electrónica

Ejemplo:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Fecha de consulta. Disponible en: http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/html/Metadato. aspx?CID=239714

Artículo de periódico impreso:

Ejemplo:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Tesis

Ejemplo:

Gómez Capera A.A. 1998. Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Fisica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresos y simposios

Ejemplo:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos. En Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Trabajos inéditos o publicaciones informales

Si el trabajo está disponible en un sitio web institucional o personal agregue el nombre de la institución y URL.

Ejemplo:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Disponible en: http://..

Materiales legales

En cuanto a las citas en el texto se proporcionan los mismos datos de cualquier referencia, autor, año y en lo posible número de página, si no hay un autor identificado, se anotan las primeras palabras del título y la fecha.

Ejemplo:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

Tablas y figuras

Las tablas y cuadros se denominan tablas y llevan numeración arábiga de acuerdo con el orden de aparición. El título correspondiente se coloca en la parte superior de la tabla y las notas en la inferior. Los símbolos para unidades deben aparecer en el encabezamiento de las columnas. Si es necesario exponer alguna información, utilice 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 figuras, se enumeran según el orden de aparición y sus leyendas se escriben 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 de lo contrario 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 a 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 apoya económicamente.

Proceso de revisión por pares

Se recibirán solo los artículos que cumplan con todos los requisitos que se mencionan en las indicaciones a los autores. Los artículos serán evaluados en primera instancia por el Editor y el Comité Editorial de la Revista.

Cada manuscrito será enviado a dos especialistas en el tema, que evaluarán y enviarán sus recomendaciones. Este proceso de revisión tendrá una duración de 20 días.

El editor informará a cada uno de los autores el avance de su trabajo en el proceso de evaluación.

Los pares académicos adoptan 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 una tercera evaluación. En cualquiera de las opciones, el autor será informado y deberá realizar las modificaciones correspondientes en el manuscrito y enviarlo en las cuatro semanas siguientes. Además deberá enviar un documento en el que responda a todas las observaciones hechas por los evaluadores.

Cuando el autor demore más de 30 días en responder a las sugerencias de los evaluadores, el artículo no será considerado para publicación en el siguiente número de la revista. En caso de sobrepasar dicho plazo, se entenderá que los autores retiran el trabajo en su forma actual y, si se remite de nuevo, el Comité Editorial de la Revista podrá considerar que se trata de un nuevo trabajo.

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

Aceptados los artículos estos se enviarán a corrección ortotipográfica. Se usará la herramienta de control de cambios de Word, en la cual quedará registro de cada una de las sugerencias realizadas y los comentarios o dudas para que el autor o autores aprueben y contesten.

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 y el número del volumen en que 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 ortotipográficos, de manejo visual de la información o imprecisiones involuntarias, el (los) autor(es) podrán comunicarse al correo de la Revista para que puedan realizarse en las versiones electrónicas de la Revista.

Falsificaciones 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 interés que pueda de alguna manera

influir en la transparencia u objetividad en el proceso de revisión por pares y publicación, éste debe ser declarado.

Los conflictos de interés más evidentes son los llamados conflictos financieros, resultado de relaciones entre empleadorempleado, financiaciones y patentes, así como también honorarios, consultorías, investigación pagada por compañías que dependen de los resultados investigativos, etc.

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, etc.

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 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 y/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 a revisión junto con los manuscritos.

e) Ningún otro derecho, además del de derechos de autor, debe ser reclamado por la revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (ACCEFYN).

To our readers and authors

Criteria for publication

Information for Authors

The authors must adhere to the following requirements:

- The works submitted must be original, in English or Spanish, and of high quality 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 author submitting the work must confirm via written and signed communication that the manuscript represents original work and that it has not been published in any form, and that it is not under review by any other publisher for publication in hard copy or in electronic format and that publication in the Revista has been agreed by all authors, and the the authors' rights have not been previously granted to a third party. (See form for declaration of originality, conflicts of interest, and authors' rights).
- 3. The participation of the authors in the submitted work must be materially sufficient so as to share in the public responsability of its contents. The order of appearance of the each of the authors of the publication must reflect a decision shared by all the co-authors, each of whom must be prepared to justify the order in which his name appears.
- 4. In accordance with the ICMJE (www.raccefyn.co), all collaborators who do not comply with the criteria for authorship, or who have realized minor contributions must be included in the Acknowledgement Section, and must not be cited as authors. The Acknowledgement Section must also include reference to any financial and economic assistance.
- 5. The terminology must adhere to the International Code for Botanical Nomenclature. The physical, chemical or biochemical terminology norms of the Nomenclature Committee of International Union for Pure and Applied Chemestry (IUPAC). The abbreviations must follow the international conventions as well as the units must conform to the International System (SI). The scientific names must be written in the format recommended by the "International Code of Botanical Nomenclature".

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 Areal font size 12 without justification. Do not forget to number the entire manuscript.

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.

Conclussion: an up to date survey of the investigation. Mention can be made here of future objectives of the same line of investigation.

Bibliography: these citations must be verifiable, enumerated and referred to in the body of the article enclosing each number with square brackets. When a citation is made, indicate in the text the author, the year and page in the following way:

Direct or textual quotation

If the textual citation has under 40 words it should be given in between quotation marks within the text and at the end it should include in parenthesis the surname, the year of publication and the page from which it was extracted.

Example:

The objective of the explicative studies is "to respond to the causes of the physical or social events" (Hernándes, Fernández and Baptista, 1991, p.66)

If the citation goes over 40 or more words it must be placed in a separate block independent of the text, without quotation marks allowing for bleeding on the left margin.

Example:

The scientific journals are contextual system of communication, of academic or investigative diffusion and strengthening of scientific competence (writing, investigation, evaluation, editing), in which the academic community shares beliefs, orientation and the commitment to contribute, use and advance the formal knowledge of collaboration and cooperation. (Mesa & Sánchez, 2010, p.4)

Paraphrase or summary

Mention must be made of the author and the date.

Example:

According to Sánchez (1991), cement is one of the most popular and indispensable materials in today's construction.

There exist two types of learning: the passive reception of knowledge and the rediscovery of reality (Piaget, 1980)

If a cited document has between three or five authors, the surnames of all the authors must be given the first time they are cited and afterwards include the surname of the first author followed by "et al." (not in italics and with a period after the "al.").

If a cited document has six or more authors, place the first citation with the surname of the first author followed by "et al." In the bibliographical list write the initials and surnames of the first six authors and for the rest use " et al."

Bibliographical list

It is the list, in alphabetical order (according to the first surname of the cited authors, which should be in bold) of the sources consulted and cited in the text of the article. It is mandatory to include the bibliographical list. It should be cited in the following way:

Books

Author. Year of publication. Title of the book. Edition. Publisher, place of publication, page(s).

Example:

Ramírez J. E., S.J. 1975. Historia de los terremotos en Colombia. Segunda edición. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 250 pp.

Article from periodical journal

Author, A.A., Author, B.B. Year. Title of the article. Title of the journal, volume (number in parenthesis), pages.

Example:

Ríos, L., Riva, F., Canaquire, L. 2008. Reporte situacional del tráfico ilegal de fauna silvestre en la en la región nororiental del perú. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 38(147):218-22.

On line periodical article

Example:

Sarabia A., Cifuentes H., Dimate M. 2006. Estudio macrosísmico del sismo ocurrido el 12 de julio de 1785. Ingeominas. Bogotá. Date of query: (day, month, year). Available at: http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co/sicat/ html/Metadato.aspx?CID=239714

Newspaper article

Example:

Duque, J. G. 7 de junio de 2012. Antioquia reasume competencia para decidir futuro del túnel. El Colombiano, pp. 10.

Thesis

Example:

Gómez Capera A.A. 1998. *Atenuación de la intensidad sísmica para el territorio colombiano*. Tesis de grado en Física, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Congresses and symposia

Example:

Sánchez Upegui, A. A. Octubre 2010. Aplicación de la lingüística textual en los criterios de evaluación de artículos académicos e investigativos. In: Simposio Nacional de Pedagogía y Currículo. Red Colombiana de Pedagogía, Medellín

Unpublished manuscript or informal publications

If the work is available at an institutional or personal web site, please add the name and URL of the institution.

Example:

Jaramillo, G. 2012. El patrimonio arquitectónico. Manuscrito inédito. Departamento de Artes, Universidad Latinoamericana. Recuperado de http://...

Legal documents

Regarding the citations in the text, the same data included in all other references should be provided (author, year, and if available, the same page number). If there is no identifiable author, the first words of the title should be noted, as well as the date.

Example:

Colombia. Ministerio de Educación Nacional. Ley 23 de 1982 sobre derechos de autor.

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, especify 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.

The peer-review process

Only articles which comply with the requirements mentioned in the information for authors will be accepted. The articles will be given their first evaluation by the Editor and the Editorial Committee of the Revista.

Each manuscript will be sent to two experts on the topic who will provide recommendations after review and evaluation. This process of revision will have a duration of 30 days.

The editor will inform each of the authors of the status of the process of evaluation of their work.

The academic peers will adopt one of three options: a) acceptance without modifications; b) acceptance with corrections; c) Deny acceptance. In case of disagreement among the peers, the original manuscript will be sent out for a third evaluation.

Under any of the three options, the author will be informed and must follow the corresponding modifications of the manuscript and return it within the following four weeks. In addition, the author(s) must provide a written document with answers to all the peers observations.

If the author takes more than 30 days to respond to the suggestions from the reviewers, the article will not be considered for publication in the next issue of the Revista. In case the response from the author takes longer than the allocated time, it is understood that the authors will retrieve the work in its present form and, if a new submission is made, the Editorial Committee of the Revista may treat it as a new work.

The works accepted for publication become properly of the Revista ACCEFYN and may be reproduced in their entirety or partially by the Revista.

The Revista does not assume responsibility for the scientific content, nor for the legal implications of any of the published articles.

Publication of the manuscript

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.

Conflicts of interest

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, employeremployee, 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 compny 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).

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 (ACCFYN), except in the following cases:

a) 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, as long as the corresponding credit is given to the Revista of ACCEFYN. 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 of ACCEFYN.

b) 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.

c) If the Revista of ACCEFYN were approached for permission by a third party for using, printing or publishing specifically articles already published, the Revista of ACCEFYN must obtain the express permission of the author and co-authors of the work and/or of the employer with the exception of use in classrooms, libraries, or reprinted in a collective work.

d) The Revista of ACCEFYN reserves the possible use in its front cover of figures submitted with the manuscripts.

e) No other right, other than the author's right, can be claimed by the Revista of ACCEFYN.



