

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

LA ACADEMIA ES ÓRGANO CONSULTIVO DEL GOBIERNO NACIONAL

VOLUMEN XXXV

MARZO DE 2011

NÚMERO 134

DIRECTORA DE LA REVISTA: MARGARITA PEREA DALLOS



CONTENIDO - CONTENTS

	Pág.		Pág.
Biofísica (Biophysics)		Fitopatología (Plant Pathology)	
Nueva metodología de ayuda diagnóstica de la dinámica geométrica cardíaca. Dinámica cardíaca caótica del Holter [New aid diagnosis methodology for the cardiac geometric dynamics. Chaotic cardiac dynamic of Holter]		Etiología de la muerte descendente del duraznero <i>Prunus persica</i> (L.) Batsch en los municipios de Manizales y Villamaría, Departamento de Caldas	
<i>Javier Rodríguez, Signed Prieto, Pedro Bernal, Yolanda Soracipa, Gabriel Salazar, Daniel Isaza, Luis Eduardo Cruz, Catalina Correa</i>	5	[Etiology of the dieback of peach [<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch] in the municipalities of Manizales and Villamaría, of Caldas department]	
Bioquímica (Biochemistry)		<i>Luz Dary Rivera- Hoyos, Jairo Castaño- Zapata</i>	61
Bioquímica sanguínea e inferencias ecofisiológicas en Typhlonectes natans (Amphibia: Gymnophiona) de la región caribe colombiana		Geología (Geology)	
[Blood biochemistry and ecophysiological inferences in Typhlonectes natans (Amphibia: Gymnophiona) of the Colombian caribbean region]		Perfil sísmico vertical en un pozo desviado para iluminar un reservorio con estructuras de bajo buzamiento usando ondas convertidas	
<i>Ever Edrey Hernández-Cuadrado, Carmiña Lucía Vargas-Zapata, Alonso José Rodríguez-De la Vega</i>	13	[Vertical seismic profile in a desviated well to image reservoir with low dip structures using converted waves]	
Ciencias de la Tierra (Earth Sciences)		<i>José Martínez, Ovidio Almanza, Luis Montes</i>	71
Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia)		Medio Ambiente (Environment)	
[Characterization of organic matter of the surface horizon on a hydromorphic andisol of eastern Antioquia (Colombia)]		Conservación integral de <i>Dicksonia sellowiana</i> Hook., en Bogotá D.C. y su área de influencia	
<i>Daniel F. Jaramillo</i>	23	[Conservation program in <i>Dicksonia sellowiana</i> Hook. fern, in Bogota and the surrounding area]	
Ecología (Ecology)		<i>René A. Alfonso-Moreno, Camilo Esteban Cadena-Vargas, Gustavo Morales, Nohora Peña, Belkis Pérez</i>	79
Efecto del enriquecimiento por nitrógeno y fósforo en los cambios netos de nutrientes y producción fitoplanctónica en la desembocadura del río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta		Psicología (Psychology)	
[Effect of nitrogen and phosphorous enrichment on the net changes of nutrients and phytoplanktonic production at Sevilla river mouth, Ciénaga Grande de Santa Marta]		Inteligencia. ¿qué sabemos y qué nos falta por investigar?	
<i>René M. Sánchez, Maribeb Castro-González, Sven Zea</i>	35	[Intelligence: What do we know and what do we have to investigate?]	
Entomología (Entomology)		<i>Rubén Ardila</i>	97
Mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea - Papilionoidea) de las áreas circundantes a las Ciénagas del Departamento de Córdoba, Colombia		Zoología (Zoology)	
[Butterflies (Lepidoptera: Hesperioidea - Papilionoidea) of the areas adjacent to the wetlands in the Department of Córdoba, Colombia]		Tolerancia al Ph en embriones y renacuajos de cuatro especies de Anuros colombianos	
<i>Lina R. Campos-Salazar, Jimena Gómez Bulla, M. Gonzalo Andrade-C.</i>	45	[The Ph tolerance of embryos and tadpoles of four Colombian Anuran species]	
		<i>Liliana M. Henao Muñoz, Manuel H. Bernal Bautista</i>	105
		Constitución de la Academia	
		(Members of the Academy)	111
		Publicaciones de la Academia	
		(Publications of the Academy)	115

NUEVA METODOLOGÍA DE AYUDA DIAGNÓSTICA DE LA DINÁMICA GEOMÉTRICA CARDIACA DINÁMICA CARDIACA CAÓTICA DEL HOLTER

Javier Rodríguez¹, Signed Prieto², Pedro Bernal³, Yolanda Soracipa⁴, Gabriel Salazar⁵, Daniel Isaza⁶, Luis Eduardo Cruz⁷, Catalina Correa⁸

Resumen

Rodríguez J, S. Prieto, P. Bernal, Y. Soracipa, G. Salazar, D. Isaza, L. E. Cruz, C. Correa: Nueva metodología de ayuda diagnóstica de la dinámica geométrica cardiaca. Dinámica cardiaca caótica del Holter. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 5-12. 2011. ISSN 0370-3908.

Por medio de la teoría de los sistemas dinámicos es posible cuantificar el estado y la evolución de sistemas dinámicos; la dinámica caótica cardiaca ha sido evaluada desde la teoría de sistemas dinámicos y la geometría fractal realizando investigaciones clínicas con infarto agudo de miocardio y por otro lado con la ley de la entropía desarrollando un diagnóstico de aplicación clínica.

Se seleccionaron 150 Holters, 50 diagnosticados dentro de los límites de normalidad, 50 con infarto agudo de miocardio según diagnóstico clínico convencional y 50 diagnosticados con otras enfermedades, para cada paciente se generó la secuencia de valores de la frecuencia cardiaca, se construyó el atractor, y se aplicó la metodología de Box-Counting para calcular la dimensión fractal, comparando los espacios de ocupación. Finalmente se evaluó la sensibilidad, especificidad y el coeficiente Kappa de la evaluación físico matemática para los pacientes con infarto agudo de miocardio y normales frente al Gold-Standard.

Las dimensiones fractales de los atractores, oscilaron entre 1,4232 y 2,0000. El número de espacios ocupados con la primera rejilla (5 lat/min), para los 150 atractores osciló entre 33 y 699; para la segunda rejilla (10 lat/min), entre 9 y 190. Todos los pacientes diagnosticados con infarto agudo de miocardio se encontraron fuera de los límites de los valores para los pacientes diagnosti-

1 MD, Director Grupo Insight, Director de la Línea de Profundización e Internado Especial en Física y Matemáticas Aplicadas a la Medicina. Universidad Militar Nueva Granada.

2 Investigadora Grupo Insight.

3 Investigador Grupo Insight.

4 Investigadora Grupo Insight.

5 MD, Cardiólogo Fundación Cardio-Infantil.

6 MD, Cardiólogo Fundación Cardio-Infantil.

7 MD, Profesor Fisiología Universidad Nacional de Colombia.

8 PSY, Investigadora Grupo Insight. Profesora de la Línea de Profundización e Internado Especial en Física y Matemáticas Aplicadas a la Medicina. Universidad Militar Nueva Granada.

Grupo Insight.

Fundación Cardio-Infantil.

Universidad Nacional de Colombia.

Direcciones: Cra 79b #51-16 sur, Int-5 apto 102, Bogotá-Colombia.

Correo electrónico: grupoinsight2025@yahoo.es.

cados dentro de los límites de normalidad, los valores de especificidad y sensibilidad fueron de 100% y el del coeficiente Kappa de 1.

Los atractores caóticos cardíacos revelan un orden geométrico que cuantifica la dinámica a través de los espacios de ocupación del fractal, diferenciando pacientes dentro de los límites de normalidad y con enfermedad aguda, con lo que se puede deducir la evolución entre estos dos estados, haciendo útil esta metodología para evaluar clínicamente dicha evolución.

Palabras clave: atractor, caos, corazón, Holter, ayuda diagnóstica.

Abstract

The dynamical systems theory allows quantification of the state and evolution of dynamical systems. Summing fractal geometry, these theories have been useful to assess cardiac chaotic dynamic; developing clinical researches with acute myocardial infarction and, on the other side, finding through entropy law a diagnostic aid for clinical application, using the law of entropy.

150 Holters were selected: 50 diagnosed as normal, 50 with acute myocardial infarction based on conventional clinical diagnosis, and 50 diagnosed as different diseases. For each patient, the heart rate value sequence was generated, the attractor were built and the Box-Counting methodology was applied in a way to calculate the fractal dimension, comparing the occupation spaces. Finally, sensibility, specificity and Kappa coefficient on the physical-mathematical assessment was estimated for the patients with acute myocardial infarction and normal, compared to Gold-Standard.

The attractors' fractal dimensions ranged between 1,4232 and 2,0000. The occupied spaces on the first grill (5 lat/min), applied on the 150 attractors ranged between 33 and 699; for the second one (10 lat/min), between 9 and 190. All acute myocardial infarction patients were out of normality values' patients; specificity and sensibility were 100% and the Kappa coefficient was 1.

Cardiac chaotic attractors reveal a geometric order which quantifies dynamic through fractal's occupied spaces, differing patients with normality limits from those with acute disease; this could deduce the evolution between these states, making it useful to assess evolution in clinic.

Key words: attractor, chaos, heart, Holter, diagnostic aid.

Introducción

La teoría de sistemas dinámicos permite determinar el estado y evolución de un sistema. Dicha evolución puede representarse geométricamente en espacios de fases mediante un trazado continuo de parejas ordenadas de una misma variable consecutivas en el tiempo, donde la representación obtenida se denomina atractor y permite establecer características de la evolución del sistema, como su carácter predecible o impredecible (Devaney, 1992). Dentro de los atractores que pueden obtenerse se encuentran los atractores caóticos, característicos de dinámicas impredecibles y que pueden medirse mediante la dimensión fractal, la cual es una cuantificación del grado de irregularidad de un objeto y/o la complejidad de un sistema (Peigten, 1992).

En medicina las dimensiones fractales han permitido establecer medidas objetivas de formas irregulares como

la estructura neuronal, pulmonar, intestinal y de vasos sanguíneos, entre otros (West, 1996). La geometría fractal ha facilitado el desarrollo de nuevas metodologías de caracterización de los estados de normalidad y enfermedad, debido a que la irregularidad y/o complejidad de los componentes del cuerpo humano puede ser descrita objetivamente mediante medidas fractales. Por ejemplo se han establecido diferencias entre estados neoplásicos y no neoplásicos de imágenes mamográficas (Pohlman *et al.*, 1996; Lefebvre *et al.*, 1995). Sin embargo las dimensiones fractales aisladamente pueden ser insuficientes al realizar evaluaciones; en efecto, en un trabajo previo para establecer diferencias entre arterias sanas y reestenosadas se requirió definir el concepto de Armonía Matemática Intrínseca (AMI) (Rodríguez *et al.*, 2002), el cual evalúa las características armónicas entre las partes y la totalidad fractal de la arteria. Su aplicación en otros objetos irregulares del cuerpo humano ha sido útil en el momento

de establecer caracterizaciones objetivas y reproducibles (**Rodríguez et al.**, 2004; **Rodríguez et al.**, 2005; **Rodríguez et al.**, 2006a).

En un trabajo se realizó una caracterización de la dinámica cardiaca, a nivel fisiológico, con una aplicación de la Geometría fractal en pacientes post-infartados y con FE menor al 35% superando los predictores convencionales de mortalidad (**Hiukuri et al.**, 2000). En otros estudios se han asociado comportamientos excesivamente periódicos o aleatorios al estado de enfermedad, mientras que un comportamiento que se encuentre en el medio de estos dos se relaciona con normalidad (**Goldberger et al.**, 2002; **Goldberger et al.**, 1990; **Goldberger**, 1996). En el área de la Gineco-obstetricia, una reinterpretación de la concepción de Golberger y cols y la aplicación de la Ley de Zipf-Mandelbrot, llevó al desarrollo de un nuevo diagnóstico matemático de monitoría fetal, la cual fue refinada posteriormente (**Rodríguez**, 2006).

Así mismo, se ha desarrollado con la teoría de los sistemas dinámicos una nueva metodología de evaluación del Holter a partir de simulaciones de la dinámica cardiaca junto a la evaluación de espacios fractales abstractos. Se encontró que es posible diferenciar dinámicas cardiacas caóticas con enfermedad aguda de normales a través de la ocupación espacial de los atractores; los espacios evaluados para los atractores de individuos normales son el triple de los presentados por individuos con eventos clínicos agudos (**Rodríguez et al.**, 2008). El propósito de este estudio es aplicar dicha metodología con un número mayor de pacientes, para sugerir aplicaciones clínicas.

Metodología

El Holter se ha desarrollado con el fin de obtener mayor información sobre la variación del funcionamiento cardiaco en circunstancias cotidianas, así como su relación con el ritmo circadiano. La experiencia clínica ha demostrado que el Holter es una de las herramientas más efectivas en el diagnóstico y valoración de arritmias cardiacas sintomáticas y asintomáticas, en la evaluación del riesgo cardiaco de varias poblaciones y en la valoración de la respuesta al tratamiento (**Pineda et al.**, 2002).

Se seleccionaron 150 Holters de las Unidades de cuidados coronarios y de Cardiología de la Fundación Cardio Infantil, de pacientes mayores de 20 años, 50 diagnosticados dentro de los límites de normalidad, 50 con diferentes patologías cardiacas, como disminución severa de la variabilidad de la frecuencia cardiaca, trastorno fijo de la repolarización, ectopias, extrasístoles y arritmias, entre

otras (ver tabla 1) y 50 con infarto agudo de miocardio (IAM) según diagnóstico clínico establecido según los criterios convencionales. Convencionalmente los criterios que se tienen en cuenta durante el análisis de un trazado electrocardiográfico continuo se relacionan con el análisis de las ondas, intervalos y segmentos del trazado, dentro de lo cual se estudia el origen de cada uno de estos trazados eléctricos y la dirección que representan los mismos. Para la observación de cada uno de los parámetros se tiene en cuenta la derivación utilizada, ya que diferentes derivaciones dan cuenta de diferentes puntos de descarga eléctrica cardiaca, en dichas derivaciones se evalúan cada una de las ondas y la morfología de estas y de los segmentos que las conectan en el trazado, en el análisis clínico convencional también se usan parámetros que relacionan los tiempos entre las ondas del trazado y de igual forma se relacionan los ritmos de descarga, todo esto con el fin de poder llegar a un diagnóstico mediante la combinación de cada uno de estos parámetros y el análisis en profundidad de los mismos siempre en relación con el estado clínico llegando de este modo a una aproximación del diagnóstico causante de las anomalías eléctricas y clínicas que un paciente pueda presentar. Específicamente los criterios para determinar IAM dentro del análisis convencional incluyen la morfología de la onda Q, siendo una onda Q profunda y ancha indicativa de IAM. Uno de los criterios más fiables a la hora de evaluar un IAM en un trazado electrocardiográfico son los cambios en el segmento ST y la onda T, presentándose infra o supradesnivel de dicho segmento a cambios tales como inversión de la onda T.

Siguiendo la metodología desarrollada previamente (**Rodríguez et al.**, 2008) para cada Holter se registraron los valores de la frecuencia cardiaca mínima, máxima y total de latidos por hora durante 21 horas y partiendo de estos valores se generó la secuencia de valores de la frecuencia cardiaca, constituyendo una serie de tiempo que se grafica en el atractor.

Posteriormente con los valores simulados de la frecuencia cardiaca para cada Holter se construyó un mapa de retardo, constituido por parejas ordenadas consecutivas en el tiempo de la frecuencia cardiaca, las cuales se ubican en un espacio bidimensional y se unen con un trazado continuo, asociando de esta forma una representación geométrica (atractor) a cada Holter (ver figuras 1 y 2).

Posteriormente, teniendo en cuenta que las series de tiempo y sus correspondientes atractores cumplen con los criterios para la realización de medidas fractales, se aplicó la metodología de Box-Counting sobre cada atractor, la cual consiste en la superposición de dos cuadrículas de 5 y 10

lat/min con el fin de calcular los valores de la dimensión fractal, a través de la siguiente fórmula:

$$D = -\frac{\text{Log}N_1(2^{-(K+1)}) - \text{Log}N_2(2^{-K})}{\text{Log}2^{K+1} - \text{Log}2^K} = \text{Log}_2 - \frac{N_1(2^{-(K+1)})}{N_2(2^{-K})}$$

Donde:

N_1 : Número de cuadros que ocupa el atractor con la cuadrícula de partición K.

N_2 : Número de cuadros que ocupa el atractor con la cuadrícula de partición K+1.

K: Grado de partición de la cuadrícula 1 (10 lat/min).

K+1: Grado de partición de la cuadrícula 2 (5 lat/min).

D: Dimensión fractal.

Análisis físico y matemático

Se compararon los valores de los espacios de ocupación y dimensión fractal para cada Holter respecto a los diagnósticos clínicos convencionales, y específicamente se compararon los valores límite de los cálculos realizados para los Holter diagnosticados como estudios dentro de la normalidad así como para los pacientes que presentan IAM.

Análisis estadístico

Posteriormente para los Holter diagnosticados como estudios dentro de la normalidad y con IAM de acuerdo con el diagnóstico convencional, que fue tomado como Gold-Estándar, se comparó este resultado con la metodología matemática calculando la sensibilidad definida como la proporción de pacientes con valores matemáticos relacionados con diagnósticos dentro de los límites de normalidad y que clínicamente se comportan de la misma forma, y a la vez la medida de especificidad definida como la proporción de pacientes con valores matemáticos relacionados con IAM y que clínicamente se comportan de la misma forma. Dichas medidas se realizaron a través de una clasificación binaria donde los verdaderos positivos (VP) son el número de personas diagnosticados dentro de los límites de normalidad y que se encuentran dentro de los valores matemáticos correspondientes al mismo diagnóstico, falsos positivos (FP) son el número de Holvers que matemáticamente se comportan como estudios dentro de la normalidad y cuyo diagnóstico clínico es IAM, falsos negativos (FN) son el número de Holvers diagnosticados clínicamente como IAM pero cuyos valores matemáticos se corresponden con pacientes dentro de la normalidad y finalmente verdaderos negativos (VN) definidos como el número de Holvers diagnosticados clínicamente con IAM y cuyos valores también se corresponden con IAM.

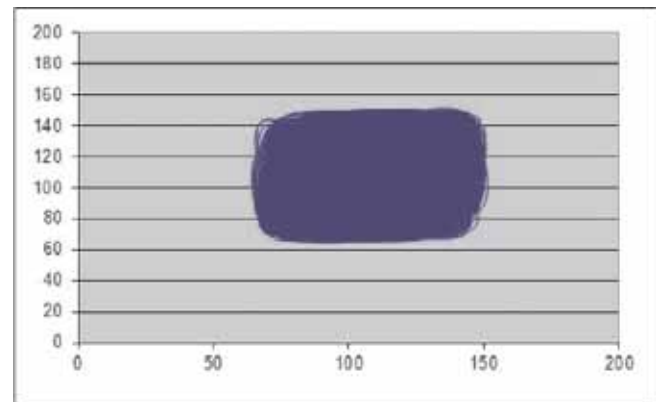


Figura 1. Atractor de dinámica cardiaca con diagnóstico dentro de los límites de normalidad.

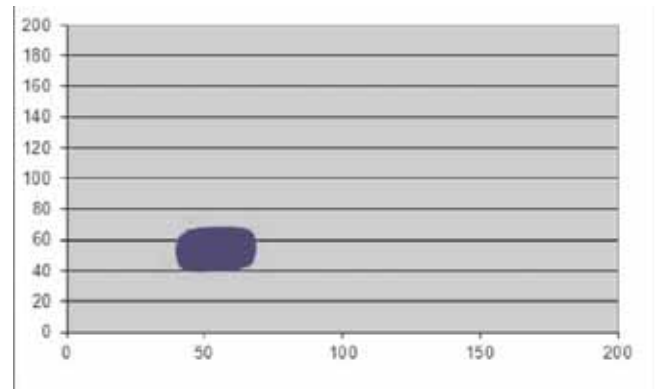


Figura 2. Atractor de dinámica cardiaca con diagnóstico de IAM.

Con el objetivo de evaluar la concordancia entre los valores físico matemáticos y la evaluación clínica se calculará el coeficiente Kappa a través de la siguiente fórmula:

$$K = \frac{Co - Ca}{To - Ca}$$

Donde:

Co: número de concordancias observadas, es decir, número de pacientes con el mismo diagnóstico de acuerdo con la nueva metodología propuesta y con el Gold Standard.

To: total de observaciones, es decir, total de Holter normales y con IAM.

Ca: Concordancias atribuibles al azar, que se calculan de acuerdo con la siguiente fórmula:

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

Donde f_1 es el número de personas que presentan valores matemáticos dentro de los límites de normalidad, C_1 es el número de pacientes diagnosticados clínicamente dentro de la normalidad, f_2 es el número de pacientes que presentan valores matemáticos asociados a IAM, C_2 es el número de el número de pacientes diagnosticados clínicamente con IAM y T_o es el número total de casos normales y con IAM.

Resultados

Las dimensiones fractales de los 150 atractores analizados, oscilaron entre 1,4232 y 2,0000. Para los individuos diagnosticados dentro del límite de normalidad, las dimensiones fractales variaron entre 1,5860 y 1,9619, para los pacientes con patologías diferentes a IAM se encontraron entre 1,4232 y 2,0000 mientras que estos mismos valores para los pacientes con IAM variaron entre 1,4739 y 1,9542. El número de espacios ocupados con la primera rejilla (5 lat/min), para los 150 atractores osciló entre 33 y 699; para la segunda rejilla (10 lat/min), entre 9 y 190. Para los indivi-

duos dentro del límite de normalidad, los espacios ocupados con la primera rejilla variaron entre 137 y 651 (figura 1), y con la segunda variaron entre 43 y 190, mientras que estos mismos valores para los pacientes con diferentes patologías se encontraron entre 33 y 699 para la primera rejilla y 9 y 178 para la segunda, y para los pacientes con IAM variaron entre 47 y 100 para la primera rejilla y entre 16 y 36 para la segunda (figura 2 y tablas 1 y 2).

Se observa que los espacios ocupados por el atractor con la rejilla de 5 lat/min, son menores que 100 en los casos de infarto agudo del miocardio y los casos normales nunca tienen una ocupación espacial menor a 137. Del mismo modo, los espacios ocupados con la segunda rejilla de 10 lat/min, son menores que 36 para infarto agudo del miocardio y los casos de individuos normales nunca fueron inferiores a 43. Se observa además que mediante estas medidas no es posible establecer diferencias entre el grupo de IAM y el grupo de otras patologías, ni tampoco entre el grupo de normalidad respecto al de otras patologías, pues sus valores de ocupación espacial se superponen (ver tabla 1).

Tabla 1. Valores de dimensión fractal, resultados del Holter y cuadros ocupados, resultados escogidos de los 150 Holters estudiados, incluyendo casos de los diferentes grupos. K_p es el número de cuadros ocupados por la rejilla de menor partición, K_g es el número de cuadros ocupados por la rejilla de mayor partición, FCP, FCMin y FCMax corresponden a los valores de la frecuencia cardiaca promedio, mínima y máxima respectivamente, EctVent es el número de ectopias ventriculares registradas y EctSVent el de ectopias supra ventriculares registradas.

Núm.	Edad	Diagnóstico previo	Kg	Kp	DF	FC P	FC Min	FC Max	Ect Vent	Ect SVent	Conclusiones
N65	29	Dolor torácico	143	480	1,8	79	46	129	0	0	Latido auricular bloqueado coincidente con bradicardización rápida sugestivos de origen vagal.
N77	23	Arritmia	132	477	1,9	82	82	175	0	0	Ectopia auricular frecuente y aislada. Ectopia ventricular ocasional monomórfica sin fenómenos repetitivos.
N2	28	Ahogo, taquicardia	90	327	1,9	86	49	162	0	0	Estudio dentro de la normalidad.
N62	49	Síncope	81	275	1,8	84	60	156	0	0	Estudio dentro de límites normales.
N67	30	Bradicardia	77	288	1,9	55	30	105	0	4	Ectopia auricular ocasional y aislada.
N3	49	Fibrilación auricular	70	234	1,7	69	43	99	0	232	Estudio dentro de la normalidad.
N64	33	Bradicardia	68	221	1,7	92	56	131	0	0	Taquicardia sinusal.
N1	55	Mareo, fatiga	60	201	1,7	84	55	127	0	6	Estudio dentro de la normalidad.
N5	32	Palpitaciones, fatiga	47	141	1,6	95	41	147	0	0	Estudio dentro de la normalidad.
N66	49	Síncope	43	120	1,5	7	47	120	0	1	Ectopia supraventricular muy infrecuente
N11	64	Infarto agudo de miocardio	36	100	1,5	84	67	101	2903	30	Ectopia ventricular frecuente con bigeminismo. Disminución severa de la variabilidad de la frecuencia cardiaca. Trastorno fijo de la repolarización.
N78	69	Arritmia	36	128	1,8	92	65	108	483	16358	Extrasistolia supraventricular muy frecuente con salvas cortas de taquicardia auricular. Extrasistolia ventricular frecuente con algunas dupletas. Moderada disminución variabilidad de la frecuencia cardiaca.
N6	37	Fibrilación auricular	35	125	1,8	69	42	115	0	205	Extrasístoles auriculares conducidas infrecuentes sin fenómenos repetitivos.
N4	73	Bradicardia sinusal	22	59	1,4	68	56	94	0	0	Ectopia auricular ocasional y aislada. Disminución de la variabilidad de la frecuencia cardiaca.

Tabla 2. Medidas de desempeño calculadas para el método matemático de ayuda diagnóstica planteado en este trabajo frente a la evaluación clínica, tomada como Gold-Standard.

Clasificación binaria		
	Positivo	Negativo
Verdadero	50	50
Falso	0	0
Medidas de desempeño		
Sensibilidad= $VP/(VP + FN)$	50/(50+0) = 100%	
Especificidad= $VN/(VN + FP)$	50/(50+0) = 100%	

Resultados estadísticos

Se encontró que los valores de sensibilidad y especificidad para los Holters diagnosticados clínicamente dentro del límite de normalidad y aquellos con IAM, fueron del 100%, tabla 2, de igual forma el valor para la concordancia entre el diagnóstico físico matemático y el diagnóstico clínico convencional, evaluado a través del coeficiente Kappa fue igual a 1.

Resultado estadístico y clínico de ayuda diagnóstica

Con este trabajo se encuentran dos grupos que son diferenciados completamente a partir de los espacios de ocupación, por un lado se encuentran los atractores que ocupan regiones menores o iguales a 100 para la rejilla de 5 lat/min, que corresponden a los atractores de todos los pacientes evaluados como IAM, y por otro lado valores superiores a 137 de espacios ocupados y donde se encuentran todos los atractores de los pacientes evaluados dentro de los límites de normalidad según el diagnóstico clínico convencional. Los valores de sensibilidad y especificidad para los pacientes diagnosticados dentro del límite de normalidad y aquellos con IAM fueron del 100%, la concordancia entre el diagnóstico clínico realizado para estos mismos exámenes y la metodología propuesta en el presente artículo según el factor Kappa aplicado fue de 1.

De esta forma si al evaluar un Holter a partir de la metodología planteada se encuentra que sus espacios de ocupación evaluados con la rejilla de 5 lat/min son inferiores a 101 y los ocupados al aplicar la rejilla de 10 lat/min son inferiores a 37, se evaluará dicho paciente como agudo, y además de esta forma si al evaluar en el tiempo los cambios en los espacios de ocupación de un mismo paciente se establece que un paciente que se acerque a los valores máximos del IAM, estará evolucionando hacia anormalidad aguda (disminución de los espacios de ocupación).

Tabla 3. Valores mínimos y máximos de la dimensión fractal, y cuadros ocupados para los pacientes con IAM y dentro del límite de normalidad.

	IAM		Normal	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Dimensión fractal	1,4739	1,9542	1,5860	1,9619
Cuadros rejilla 5 lat/min	47	100	137	651
Cuadros rejilla 10 lat/min	16	36	43	190

Discusión

Este es el primer trabajo en el cual se aplica la nueva metodología matemática de evaluación del Holter para evaluar implicaciones clínicas, a partir de los espacios de ocupación de las dinámicas caóticas de atractores fractales en el mapa de retardo. La aplicación de la teoría de los sistemas dinámicos en el contexto de la evaluación geométrica fractal de los espacios de ocupación permitió diferenciar completamente los pacientes diagnosticados clínicamente dentro del límite de normalidad de aquellos con IAM encontrando una especificidad y una sensibilidad del 100% así como un coeficiente Kappa de 1, sugiriendo la importancia de esta metodología para cuantificar la evolución entre normalidad y enfermedad aguda en la clínica.

En el trabajo previo que plantea la metodología aquí aplicada, se estudiaron 17 Holter, cuatro diagnosticados como normales y 13 con diferentes enfermedades, y se establecieron los valores matemáticos que permiten diferenciar dos grupos de dinámicas uno que contiene las dinámicas cardíacas caóticas agudas y otro que contiene tanto las crónicas como las normales con los valores de los espacios de ocupación de los atractores (Rodríguez *et al.*, 2008), lo que significa que esta metodología sólo permite diferenciar normalidad y enfermedad crónica respecto a IAM, pero aún no permite establecer diferencias entre patologías crónicas y normalidad. En este trabajo se confirma que la metodología es consistente para diferenciar los pacientes normales de aquellos con enfermedades agudas, resultado confirmado en este trabajo por medio de la concordancia estadística entre el Gold-Estándar y la metodología matemática de ayuda diagnóstica evaluada con el coeficiente Kappa. En este trabajo se pueden diferenciar arritmias que desde los sistemas dinámicos se ven cercanos a la normalidad, sin embargo, esta metodología resulta insuficiente para diferenciar normalidad, enfermedad crónica y enfermedad aguda, o cuantificar a nivel diagnóstico la evolución entre estos estados. Dichas falencias fueron solucionadas mediante una metodología diagnóstica de

aplicación clínica desarrollada recientemente por **Rodríguez** (2010a) con base en la teoría de los sistemas dinámicos, la probabilidad y proporciones de la entropía del atractor caótico cardiaco. Este es un estudio de tipo predictivo en el cual fue posible diferenciar de manera numérica, objetiva y reproducible dinámicas cardiacas con enfermedad aguda, enfermedad crónica y normales, además de poder evidenciar de forma objetiva estados de evolución entre normalidad y anormalidad. Dicha metodología fue aplicada exitosamente a la evaluación de la evolución de pacientes en la unidad de Cuidados Coronarios, evidenciando que permite evaluar de manera objetiva y cuantificada la recuperación de un paciente, así como la eficacia de intervenciones quirúrgicas y/o farmacológicas según la distancia de los valores encontrados con respecto a los valores límite de normalidad, facilitando la evaluación de la evolución en el tiempo de un paciente en la práctica clínica, detectando dinámicas cuyo comportamiento puede tender a estados más agudos, aún sin presentar síntomas detectables a nivel clínico (**Rodríguez et al.**, 2010b).

En un trabajo previo (**Juha et al.**, 2005), donde se realizó una revisión de las medidas fractales y de complejidad que estudian la variabilidad de la frecuencia cardiaca, se muestra la aplicación de diferentes metodologías para casos específicos, aclarando que la aplicación clínica no está bien establecida. De igual forma Huikuri y colaboradores realizaron una caracterización de la dinámica cardiaca, a nivel fisiológico, con una aplicación de geometría fractal en pacientes post-infartados y con FE menor al 35% superando los predictores de mortalidad convencionales (**Huikuri et al.**, 2000). En este trabajo se plantea una metodología general que puede ser aplicada a cualquier caso particular y que además facilitaría la evaluación en el tiempo para cuantificar si un paciente se dirige hacia el IAM cuantificando si los espacios de ocupación disminuyen, proponiendo que dicha cuantificación sea un nuevo parámetro de aplicación clínica.

La aplicación de leyes físicas y matemáticas a problemas de la naturaleza permite encontrar resultados predictivos de aplicación a la medicina, como ya han sido encontrados en trabajos previos en el área de la inmunología (**Rodríguez**, 2008; **Rodríguez et al.**, 2009a, **Rodríguez et al.**, 2009b), dinámica cardiaca fetal (**Rodríguez**, 2006; **Rodríguez et al.**, 2006b), y epidemiología (**Rodríguez et al.**, 2009c; **Rodríguez**, 2010c). Estos trabajos y el presente muestran que la aplicación de leyes y teorías físicas y matemáticas acordes basadas en experimentos permiten encontrar los órdenes físicos y matemáticos subyacentes a problemas de aplicación clínica.

Agradecimientos

A la Universidad Militar Nueva Granada. Este proyecto hace parte de los resultados de investigación del proyecto MED-735 financiado por el Fondo de Investigaciones, por lo cual agradecemos su apoyo. Agradecemos en especial al Dr. José Ricardo Cure, al Dr. Juan Miguel Estrada, Decano de la Facultad de Medicina, al Dr. Jorge Arturo Rey, al Dr. Germán Forero, a la Dra. Esperanza Fajardo y la Dra. Clara Benavides, por apoyar nuestras investigaciones.

A la Fundación Cardio-Infantil, en especial al doctor Rodolfo Dennis, Director de Investigaciones, por su apoyo a nuestras investigaciones

Bibliografía

- Devaney, R.** A first course in chaotic dynamical systems theory and experiments. Reading Mass.: Addison- Wesley, New York 1992;1-48.
- Goldberger, A.L., Amaral, L., Hausdorff, J.M., Ivanov, P., Peng, Ch, Stanley, H.E.** 2002. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. PNAS **99**:2466-2472.
- _____, **Rigney, D.R.; West, B.J.** 1990. Chaos and fractals in human physiology. Sci AM **262**:42-49.
- _____. 1996. Nonlinear dynamics for clinicians: Chaos theory, fractal, and complexity at the bedside. Lancet **347**:1312-1314.
- Huikuri, H.V., Makikallio, T.H., Peng, Ch, Goldberger, A.L., Hintze, U., Moller, 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.
- Juha, S. Perkio, Ma Ki, Timo H. Ma Kikallio, Heikki Huikuri.** 2005. Fractal and Complexity Measures of Heart Rate Variability. Clinical and Experimental Hypertension, **2 & 3**:149-158.
- Lefebvre, F., Benali, H.** 1995. A fractal approach to the segmentation of microcalcifications in digital mammograms. Med. Phys. **22**:381-390.
- Peitgen, H.** 1992. Length area and dimension. Measuring complexity and scalling properties. En: Chaos and Fractals: New Frontiers of Science. Springer-Verlag. NewYork. p.183-228.
- Pineda, M., Matiz, H., Roza, R.** 2002. Enfermedad coronaria. Bogotá: Editorial Kimpres Ltda.
- Pohlman, S., Powell, K., Obuchowski, N.A.** 1992. Quantitative classification of breast tumors in digitized mammograms. Med. Phys **23**:1337-1345.
- Rodríguez, J., Mariño, M., Avilán, N., Echeverri, D.** 2002. Medidas fractales de arterias coronarias en un modelo experimental de reestenosis; Armonía matemática intrínseca de la estructura arterial. Rev Col Cardiol **10**:65-72.
- _____, **Álvarez, L., Mariño, M., Avilán, G., Prieto, S., Casadiego, E., Correa, C., Osorio, E.** 2004. Variabilidad de

la dimensión fractal del árbol coronario izquierdo en pacientes con enfermedad arterial oclusiva severa. *Dinámica fractal de la ramificación coronaria*. *Rev Col Cardiol*; **11**(4):185-192.

- _____, **Lemus, J., Serrano, J., Casariego, E., Correa, C.** 2005. Medidas fractales cardiotorácicas en radiografía de tórax. *Rev Col Cardiol* **12**(3): 129–34
- _____, **Prieto, S., Ortiz, L., Avilán, N., Álvarez, L., Correa, C., Prieto, I.** 2006a. Comportamiento fractal del ventrículo izquierdo durante la dinámica cardíaca. *Rev Col Cardiol* **13**(2): 165-170.
- _____, **Prieto, S., Ortiz, L., Bautista, A., Bernal, P., Avilán, N.** 2006b. Diagnóstico Matemático de la monitoria fetal aplicando la ley de Zipf-Mandelbrot. *Rev Fac Med Univ Nac Colomb* **54**(2): 96 -107.
- _____. 2006. Dynamical systems theory and ZIPF – Mandelbrot Law applied to the development of a fetal monitoring diagnostic methodology. XVIII FIGO World Congress of Gynecology and Obstetric. Kuala Lumpur, Malaysia.
- _____, **Prieto, S., Avilán, N., Correa, C., Bernal, P., Ortiz, L., Ayala, J.** 2008. Nueva metodología física y matemática de evaluación del Holter. *Rev. Colomb. Cardiol* **15**(2):50-54
- _____. 2008. Teoría de unión al HLA clase II teorías de Probabilidad Combinatoria y Entropía aplicadas a secuencias peptídicas. *Inmunología* **27**(4): 151-166.
- _____, **Bernal, P., Correa, C., Prieto, S., Benítez, L., Vitery, S. et al.** 2009a. Predicción de unión de péptidos de MSA-2 y AMA-1 de *Plasmodium falciparum* al HLA clase II. *Inmunología* **28**(3):115-124.
- _____, **Correa, C., Prieto, S., Puerta, G., Vitery, S., Bernal, P., Soracipa, Y., Botero, D.** 2009b. Aplicación de la probabilidad y la entropía a la proteína EBA-140. Caracterización matemática de péptidos de alta unión. *Inmunología* **28**(2):65-73.
- _____, **Correa C.** 2009c. Predicción Temporal de la Epidemia de Dengue en Colombia: Dinámica Probabilista de la Epidemia. *Rev. Salud Pública* **11**(3):443-453.
- _____. 2010a. Entropía Proporcional de los sistemas dinámicos cardíacos: Predicciones físicas y matemáticas de la dinámica cardíaca de aplicación clínica. *Rev Colomb Cardiol* **17**:115-129.
- _____, **Prieto, S., Bernal, P., Izasa, D., Salazar, G., Correa, C., Soracipa, Y.** 2010b. Entropía proporcional aplicada a la evolución de la dinámica cardíaca Predicciones de aplicación clínica. En: *La emergencia de los enfoques de la complejidad en América Latina*. Compilado por: Comunidad de Pensamiento Complejo (CPC). Argentina. Aprobado para publicación.
- _____. 2010c. Método para la predicción de la dinámica temporal de la malaria en los municipios de Colombia. *Rev Panam Salud Publica*. **27**(3):211–8.
- West, JW.** 1990. *Fractal physiology and chaos in medicine*. Singapore: world scientific.

Recibido: abril 8 de 2010.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

BIOQUÍMICA SANGUÍNEA E INFERENCIAS ECOFISIOLÓGICAS EN *TYPHLONECTES NATANS* (AMPHIBIA: GYMNOPHIONA) DE LA REGIÓN CARIBE COLOMBIANA

Ever Edrey Hernández-Cuadrado^{1,2}, Carmiña Lucía Vargas-Zapata¹,
Alonso José Rodríguez-De la Vega¹

Resumen

Hernández Cuadrado E. E., C. L. Vargas Zapata, A. J. Rodríguez-De la Vega: Bioquímica sanguínea e inferencias ecofisiológicas en *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona) de la Región Caribe colombiana. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 13-22. 2011. ISSN 0370-3908.

Se hacen los primeros reportes de la bioquímica sanguínea de *T. natans* para Colombia, relacionados con estrés fisiológico por contaminantes. Fue determinado el hematocrito por método convencional en el Grupo Patrón (GP): $41,94 \pm 5,06\%$; y Grupo Experimental (GE): $43,37 \pm 6,14\%$ y por espectrofotometría la hemoglobina (GP: $12,52 \pm 3,06$ g/dL; GE: $14,43 \pm 3,85$ g/dL), proteínas totales (GP: $6,32 \pm 0,60$ g/dL; GE: $6,05 \pm 0,64$ g/dL), colesterol tota (GP: 280 ± 50 mg/dL; GE: 281 ± 44 mg/dL) y glucosa (GP: $140,25 \pm 27,96$ mg/dL; GE: $120,6 \pm 23,44$ mg/dL, \pm SD). Los datos sugieren estrés por contaminantes en sinergia con otros factores como cambios térmicos.

Palabras clave: *T. natans*, bioquímica sanguínea, estrés fisiológico, Colombia.

Abstract

We report the first records of the blood parameters of *T. natans* for Colombia. The hematocrit was determined in standard group (GP): $41,94 \pm 5,06\%$ and experimental group (GE): $43,37 \pm 6,14\%$ by conventional method, and hemoglobin (GP: $12,52 \pm 3,06$ g/dL; GE: $14,43 \pm 3,85$ g/dL), total proteins (GP: $6,16 \pm 0,60$ g/dL; GE: $6,05 \pm 6,36$ g/dL), total cholesterol (GP: 280 ± 50 mg/dL; GE: 281 ± 44 mg/dL) and glucose (GP: $140,25 \pm 27,96$ mg/dL; GE: $120,56 \pm 23,44$ mg/dL, \pm SD) by spectrophotometry. Our data suggest stress by pollutant agents in synergy with other factors as thermal changes.

Key words: *T. natans*, blood biochemistry, physiological stress, Colombia.

¹ Grupo de Investigación Biología de Nutrientes, Línea Fauna Silvestre, Departamento de Biología, Universidad del Atlántico, Km. 7 Antigua Vía Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia. Correo electrónico: edouglas09@hotmail.com

² Profesor-Becario Universidad del Tolima, Altos de Santa Helena, Ibagué, Colombia; Doutorando em Ciências Veterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias, Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037-CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil.

Introducción

La mayoría de las poblaciones en Colombia vierten sus desperdicios a los cuerpos de agua sin tratamiento alguno (Rueda-Almonacid *et al.*, 2004). Salvo algunas excepciones, este es también el contexto en la región caribe, donde un caso representativo de dicha circunstancia es el complejo lagunar de Malambo, Atlántico, y en particular la ciénaga La Bahía. En este humedal son vertidos desechos sólidos y aguas residuales de origen industrial y doméstico provenientes de los municipios de Soledad y Malambo (PDMS, 2008). Estos vertimientos pueden afectar negativamente las diferentes formas de vida de este ecosistema.

En este sentido, entre los taxones sensibles a dicha contaminación están los anfibios, debido a que absorben por la piel algunas sustancias tóxicas (Willens *et al.*, 2006), cuyos efectos pueden verse reflejados en los niveles de algún parámetro sanguíneo.

Concretamente, en el Orden Gymnophiona se conocen especies amenazadas por modificaciones en su ambiente (Wake, 1993). No obstante, en muchos de estos taxones faltan estudios puntuales que así lo señalen, tal es el caso de *Typhlonectes natans*. Ésta es una cecilia acuática (Jared *et al.*, 1999) y fosorial que se distribuye en los humedales de la cuenca del Río Magdalena y en los drenajes fluviales que llegan al Lago de Maracaibo (Hernández-Cuadrado & Vargas, 2007; Hernández-Cuadrado *et al.*, 2008).

Por su parte, se sabe que los cambios ambientales pueden afectar la historia de vida de los anfibios y otros ectotermos (Maurer, 1994), asociados con la oferta de nutrientes y el nivel de los cuerpos de agua donde habitan. Así, existen reportes hematológicos de algunos cecílicos como *T. compressicaudus* (Towens & Macintyre, 1978), *Siphonops annulatus* (Jared *et al.*, 1999) y *Boulengerula taitanus* (Wood *et al.*, 1975). Pero en *T. natans* no se han estimado los niveles de los parámetros sanguíneos.

Es de indicar que en estudios previos ha sido estudiada la química sanguínea en peces y reptiles en relación con su ambiente (Farrel *et al.*, 2004; El-Deib, 2005). Por ejemplo, en el caribe colombiano De la Rosa & Movilla (2003) hallaron cambios en la glucosa y colesterol sanguíneos de crocodilianos en cautiverio con una dieta a base de pescado. En este sentido, la carne de tilapia (*Oreochromis niloticus*), por su alto porcentaje de proteína, grasa y ceniza INPA (1996), es un alimento de calidad para la especie que lo consume. Así, su carne en incluso sus vísceras sería una alternativa para la alimentación de *T. natans* en condiciones de cautiverio, aunque es necesaria la toma de datos experimentales al respecto en este anfibio.

El conocimiento de los indicadores de bioquímica sanguínea en *T. natans* es relevante para una mejor comprensión de su biología. En particular es trascendente entender los efectos del ambiente sobre su fisiología, ya sean en el medio natural o en confinamiento. Desde esta perspectiva la UICN (2001) plantea que los estudios de laboratorio son importantes porque las exposiciones de agentes químicos a corto plazo podrían tener un marcado efecto en los anfibios y pueden ser comparados con datos de campo. El propósito de esta investigación fue la valoración de los niveles sanguíneos de hematocrito, hemoglobina, proteínas totales, colesterol total y glucosa en ejemplares adultos de *T. natans* en su hábitat natural y en cautiverio, relacionados con la dieta y la contaminación en diferentes sectores de la ciénaga La Bahía, Atlántico, Colombia.

Materiales y métodos

Se capturaron 100 ejemplares adultos de *T. natans* en la ciénaga La Bahía, Complejo Lagunar de Malambo, Atlántico, Colombia, por el método de “camas de eichornia” propuesto por Hernández-Cuadrado & Rodríguez (2006). Este humedal se caracteriza por la abundancia *Echornia crassipes* y *Echornia azurea* o taruya (Arciniegas, 2003). Fueron ubicadas cinco estaciones (E) en el área de estudio (figura 1), teniendo en cuenta las características particulares y vertimientos en cada una.

Estación uno (E1). Ubicada en la parte occidental de la ciénaga la Bahía, recibe desechos del aeropuerto internacional “Ernesto Cortissoz”, el matadero del municipio de Malambo, industrias avícola y papelera y del barrio subnormal de Mesolandia. Es la parte de mayor cobertura vegetal en su ribera, de escasa concentración de plantas acuáticas

Estación dos (E2). Al norte de la ciénaga, influenciada por el caño de Soledad que descarga aguas servidas provenientes del sector industrial y del municipio de Soledad. La vegetación acuática y ribereña es más escasa que en la estación 1.

Estación tres (E3). En la margen oriental del área de estudio, llegan las aguas negras del arroyo Manuela Beltrán. Predominan grandes conglomerados de taruya y enea (*Typhla sp.*).

Estación cuatro (E4). Parte suroriental del humedal, sin vertimientos de ningún arroyo o caño en forma directa. Presenta matorrales en sus orillas y gran cantidad de plantas acuáticas. Cercana a la compuerta que regula la entrada de agua del río Magdalena a la ciénaga.

Estación cinco (E5). Influenciada por el agua del río (compuerta) y el caño de Malambo. Recibe los vertimientos del barrio subnormal de Mesolandia y de las instalaciones del fuerte militar de Malambo. Hay altas concentraciones de taruya y enea.

Los animales fueron pesados, medidos y sexados mediante la metodología SOP (Hernández-Cuadrado & Vargas, 2007). Se capturó un grupo experimental (GE), de diez animales por estación, alimentado con carne de tilapia *ad libitum* durante 32 semanas (Abril-Diciembre de 2005) y mantenido en tanques de plástico de 75 cms de diámetro y 1,00 m de altura con abundante taruya; y un grupo patrón (GP) capturado en diciembre de 2005, de igual canti-

dad y sin tratamiento en cautividad. Ambos grupos fueron llevados simultáneamente al Laboratorio de Bioquímica de la Universidad del Atlántico para la extracción las muestras sanguíneas.

Por observaciones previas, los animales tienden a permanecer en las orillas y en los conglomerados de taruya por períodos relativamente largos (hasta seis semanas). Lo anterior evita sesgos en las comparaciones del caso.

Toma y procesamiento de muestras

Las muestras de sangre de cada animal fueron extraídas mediante punción en la región ventral, a la altura del tercer surco corporal, y colectada en tubos de ensayo que

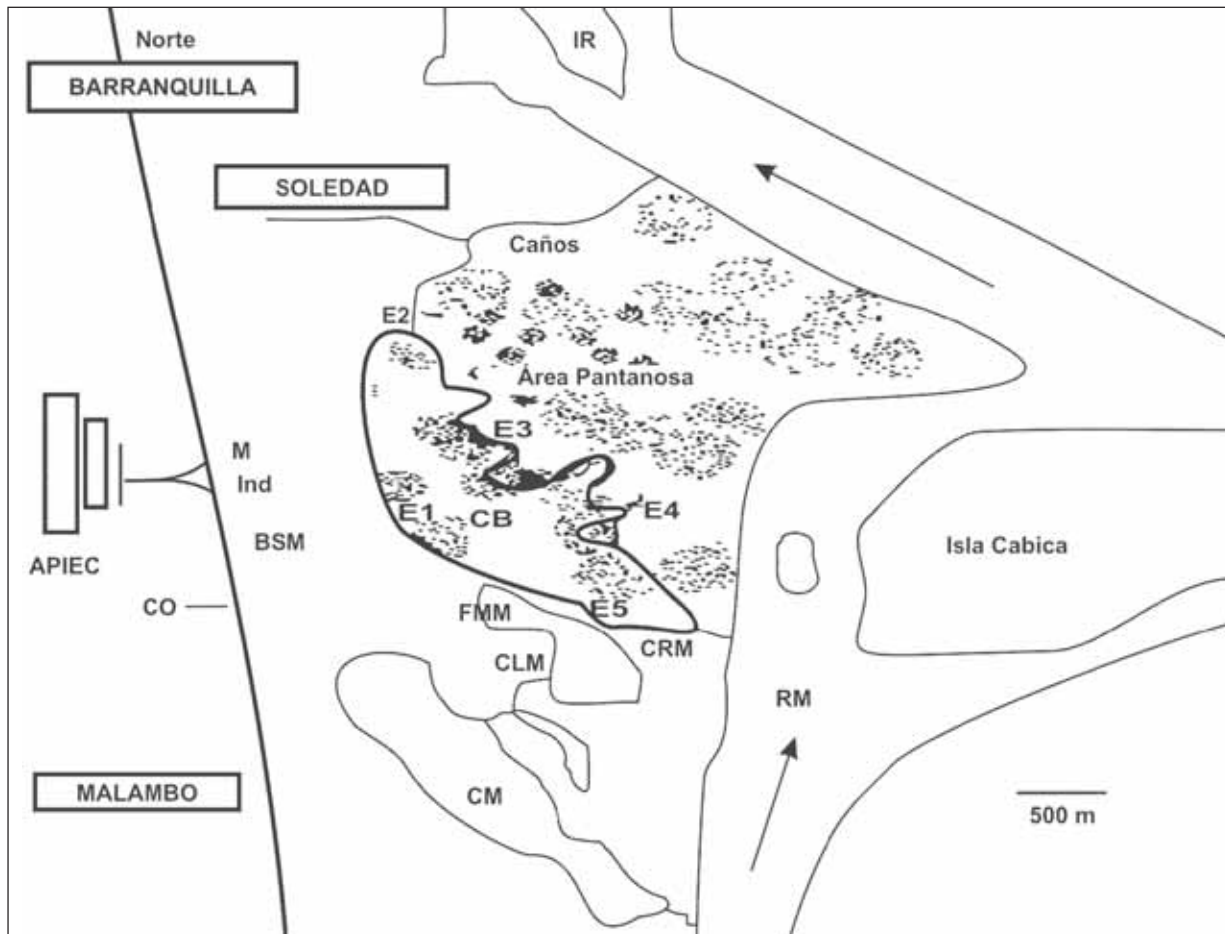


Figura 1. Área de Estudio. CB: ciénaga la bahía; E1, E2, E3, E4, E5: estaciones de muestreo; RM: río Magdalena; CLM: complejo lagunar de Malambo; CM: ciénaga de Malambo; CRM: compuerta río Magdalena; FMM: fuerte militar de Malambo; BSM: barrio subnormal Mesolandia; CO: carretera oriental; APIEC: aeropuerto internacional "Ernesto Cortizos"; Ind: industrias; M: matadero público de Malambo; IR: isla rondón. Las áreas punteadas corresponden a la presencia de taruya (*E. crassipes* y *E. azurea*). Adaptado de Alvarado Nivia Ltda.

contenían 20 µL de heparina para la obtención de la sangre total y del plasma respectivamente en centrifuga (DYNAC –Centrifugue 297°C, Clay Adams, USA) a 3500 rpm. Los indicadores se determinaron por adaptación de los siguientes métodos: Hematocrito por técnica convencional utilizando tubos capilares, hemocentrífuga (Readcrit Centrifugue, Clay Adams, USA), cinta métrica y expresando los valores en porcentaje (%). La hemoglobina (g/dL) y proteína total (g/L), por colorimetría mediante uso de kit comercial (Biosystems S.A.) determinando la absorbancia a 540 nm; igualmente para la glucosa (mg/dL), pero midiendo la absorbancia a 500 nm. El colesterol total (mg/dL) por método enzimático colorimétrico utilizando kit comercial (Wiener Lab.), midiendo la absorbancia a 505 nm.

El tratamiento estadístico comprendió análisis descriptivo de cada variable para su caracterización general. Las comparaciones de las medias generales de los parámetros sanguíneos entre los dos grupos (GE y GP) se realizaron por *test-t*, al igual que entre cada una de las estaciones del GE y las estaciones correspondientes del GP. A su vez, las comparaciones dentro de cada grupo por estaciones de colecta se hicieron mediante análisis de varianza (ANOVA). Se llevó a cabo análisis de correlación entre las variables y coeficiente de contingencia para relacionar la variable nominal sexo con los demás parámetros. Fueron usados los programas estadísticos Statgraphics 5.1 Plus y SPSS 11.5.

Resultados

En la tabla 1 se registra la media general de cada parámetro sanguíneo medido en los grupos de animales utilizados. Se puede observar que los animales del GE presentaron niveles semejantes en hematocrito ($P = 0,194$) y colesterol total ($P > 0,05$), pero mayores en hemoglobina ($P = 0,010$) y menores en proteínas totales ($P = 0,03$) y en glucosa sanguínea ($P=0,000$), cuando se comparan con los valores del grupo GP.

Al interior del GE hubo diferencias en los niveles de hemoglobina ($p < 0,05$), donde los animales de las estaciones E1 y E2 presentaron mayor concentración de esta proteína en relación con los animales de las demás estaciones (Tabla 2). Así mismo, hubo diferencias al ser comparadas las estaciones 1, 2 y 5 del GE con las correspondientes estaciones del GP ($P < 0,001$), siendo mayores los niveles en las estaciones 1 y 2 del GE y en la estación 5 del GP (Tablas 2 y 3). Los valores de la hemoglobina en el GP presentaron un orden creciente por estaciones, así: E1, E2, E4, E3 y E5 (tabla 3), con diferencias significativas entre E1 y E2 ($p < 0,003$) en relación con las otras tres estaciones, siendo iguales al comparar E3 y E4 ($p > 0,05$). Así mismo, las medias del porcentaje de hematocrito fueron iguales en el GE (tabla 2) y diferentes entre las estaciones al interior del GP ($P = 0,0278$), particularmente entre E1, E2 y E5, siendo ligeramente mayor en la estación 2 (tabla 3).

Tabla 1. Niveles de los parámetros sanguíneos* en *Typhlonectes natans* de la Región Caribe Colombiana.

Parámetro	Grupo experimental (n = 50)	Grupo patrón (n = 50)
Hematocrito (%)	43,37 ± 6,14 (28,6 -56,4)	41,94 ± 5,06 (28-52,63)
Hemoglobina (g/dL)	14,43 ± 3,85 (8,40-23,1)	12,52 ± 3,06 ¹ (6,96-18,6)
Proteína total (g/dL)	6,05 ± 0,64 (5,07-7,25)	6,32 ± 0,60 ² (5,01-7,33)
Colesterol total (mg/L)	281 ± 44 (181-352)	280 ± 50 (186-356)
Glucosa (mg/dL)	120,6 ± 23,44 (80,8-154,4)	140,2 ± 28 ³ (85,6-234,4)

*media ± SD. Cifras entre paréntesis: registros mínimos y máximos.

^{1,2,3} Diferencias significativas del GP respecto del GE: 1($p < 0,010$), 2($p = 0,030$), 3($p = 0,000$).

Tabla 2. Valores de longitud, peso y bioquímica sanguínea de *T. natans* del grupo experimental -GE- por estaciones*.

E	Parámetros						
	Long (cm)	Peso(g)	Ht (%)	Hb (g/dL)	PT (g/L)	CT(mg/dL)	Gl (mg/dL)
1	42,14 ± 2,71	46,98 ± 14,93	42,18 ± 6,59	16,94 ± 4,34 ^a	61,29 ± 7,33	301 ± 28	121,38 ± 25,67
2	42,11 ± 2,49	46,46 ± 11,11	44,92 ± 6,17	17,38 ± 2,45 ^a	63,75 ± 5,65	280 ± 44	114,93 ± 22,93
3	42,71 ± 4,42	47,50 ± 12,26	43,56 ± 6,55	11,05 ± 1,93 ^b	58,95 ± 6,39	259 ± 51	113,07 ± 25,19
4	40,65 ± 3,54	35,30 ± 4,91	42,04 ± 5,06	14,56 ± 2,26 ^a	58,79 ± 7,15	280 ± 53	123,43 ± 24,29
5	40,69 ± 2,57	45,94 ± 12,64	42,07 ± 6,96	11,14 ± 1,91 ^b	58,05 ± 4,30	271 ± 41	118,81 ± 2,33

*media ± SD; E: estaciones; Long: longitud; Ht: hematocrito; Hb: hemoglobina; CT: colesterol Total; PT: proteína total; GL: glucosa. Los valores con diferente letra como superíndice indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Tabla 3. Valores de longitud, peso y bioquímica sanguínea en *T. natans* del grupo patrón -GP- por estaciones*.

E	Parámetros						
	Long (cm)	Peso(g)	Ht (%)	Hb (g/dL)	PT (g/L)	CT(mg/dL)	Gl (mg/dL)
1	42,75 ± 4,43	44,99 ± 7,670	43,20 ± 2,92 ^a	8,71 ± 1,98 ^a	62,90 ± 4,22	286 ± 46	141,43 ± 5,95
2	39,04 ± 2,57	41,50 ± 7,090	43,64 ± 2,65 ^a	10,81 ± 0,84 ^b	60,62 ± 7,19	260 ± 64	145,01 ± 38,17
3	39,90 ± 3,39	41,49 ± 12,78	42,77 ± 4,16 ^a	13,95 ± 2,87 ^c	64,50 ± 6,34	304 ± 25	129,76 ± 30,38
4	39,59 ± 3,75	42,05 ± 9,250	41,98 ± 6,00 ^a	13,00 ± 1,90 ^c	64,42 ± 6,06	254 ± 49	129,39 ± 24,39
5	43,08 ± 6,53	50,19 ± 15,92	36,91 ± 6,43 ^c	15,49 ± 1,65 ^d	62,04 ± 6,18	281 ± 44	142,60 ± 18,88

*media ± SD; E: estaciones; Long: longitud; Ht: hematocrito; Hb: hemoglobina; Col: colesterol; CT: colesterol Total; PT: proteína total; GL: glucosa. Los valores con diferente letra como superíndice indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Los otros tres parámetros determinados en este estudio tuvieron un comportamiento diferencial. Así, los niveles de proteínas totales no presentaron cambios significativos al interior de los GE y GP ($P > 0,05$). Pero se encontraron diferencias en los niveles de colesterol total al comparar la estación 3 del GE con la estación correspondiente en el GP ($P = 0,033$), siendo mayor en el GP. Además, al comparar cada estación del GE con su correspondiente en el GP, se encontraron diferencias en la glucosa sanguínea en E2 ($p = 0,04$) y E5 ($P = 0,022$) (tablas 2 y 3). Aunque al interior de cada grupo no hubo diferencias ($P > 0,05$).

En todos los casos la talla y el peso fueron semejantes entre GE y GP, así como dentro de los grupos de animales por estaciones (ANOVA, *t-test*, $P > 0,05$). También se halló una correlación significativa para estas dos variables ($r = 0,64$, $p = 0,0000$ y $r = 0,85$, $p = 0,000$) en GE y GP, respectivamente. Por último, no hubo una asociación directa entre el sexo y los parámetros hematológicos medidos.

Discusión

El porcentaje de hematocrito y la hemoglobina en *T. natans* están correlacionados. Es decir, a mayor porcentaje de hematíes, mayor cantidad de hemoglobina. Esto ha sido observado en estudios previos realizados en ranas mugidoras y algunos lagartos (NRC, 2002). Los valores en el porcentaje de hematocrito del cecílido estudiado fueron similares entre los GE y GP y estuvieron en promedio por encima de 40%, con valor máximo de 52%. Este incremento en los niveles de hemoglobina con el aumento del hematocrito se explica debido a que la hemoglobina puede representar cerca del 95% de sustancias sólidas en el hematíe (Fontalvo, 1993). En consecuencia, la igualdad de los valores de hematocrito en la media general de los GE y GP (tabla 1), corresponde a un hecho esperado desde los puntos de vista metabólico y ambiental. Esto es, a temperaturas por debajo de 37°C la unión del oxígeno con la

hemoglobina es más firme (Rokosky, 1997) que sobre este valor y, precisamente, en la época de captura de los animales la temperatura estuvo por debajo de este registro en la ciénaga La Bahía (Tatis, 2005). Sin embargo, las diferencias observadas en la hemoglobina entre los GE y GP y por estaciones dentro de los grupos, pueden estar indicando algún grado de afectación fisiológica en *T. natans* en el área de estudio. Por ello, es necesario llevar a cabo estudios complementarios sobre este aspecto.

En particular la contaminación puede alterar el pH del agua, por lo que valores bajos o elevados de éste pueden ocasionar graves trastornos en los procesos de intercambio a través de las membranas biológicas, como podría estar ocurriendo en el anfibio estudiado. Además, se sabe que una disminución en el pH se asocia con una mayor demanda de oxígeno (Tresguerres, 1999). Pero debido a que los valores de éste en el humedal fueron predominantemente alcalinos (Tatis, 2005), es probable que los requerimientos de oxígeno no incrementaran en *T. natans*. En este sentido, Kowalski (1999) ha sugerido que en cautiverio este Gymnophiona debe alojarse en agua con un pH alcalino (8,0). No obstante, probablemente en el medio natural los niveles de hemoglobina sean fisiológicamente adecuados, pues esta proteína respiratoria al encontrarse en el interior de los glóbulos rojos permite establecer una correlación entre el contenido de ésta en sangre y el hematocrito (NRC, 2002), teniendo en cuenta la concentración de H^+ en el agua. Este efecto (efecto Bohr) también ha sido estudiado en otros vertebrados ectotermos como los reptiles (Berenbrink, 2006). Igualmente, se ha encontrado que en *T. compressicaudus* las concentraciones de hemoglobina en sangre son más altas que en otros anfibios (Towes & Macintyre, 1978). Por ello, es recomendable abordar el mayor número de variables ambientales posibles cuando se estudien parámetros hematológicos en estos ectotermos. Por ejemplo, la oferta alimentaria en su

hábitat o en cautiverio, pues los niveles de hemoglobina pueden ser usados para evaluar respuestas frente a la disponibilidad de nutrientes (Nkrumah *et al.*, 2011).

Estudios en *T. natans* llevados a cabo por Gardner (1996) y Boyle (1996) evidencian el papel preponderante de la hemoglobina en su respuesta ventilatoria, debido a que este animal depende en un alto grado de la respiración cutánea. Así mismo, hay que tener en cuenta que los pigmentos respiratorios han evolucionado independientemente en los diversos grupos de vertebrados y están relacionados con los hábitats y biotopos en que reside el animal más que con el tipo de proteína respiratoria (Scheer, 1969). Este autor plantea que los animales de movimientos lentos y los que habitan en lugares pobres en oxígeno suelen tener proteínas respiratorias de alta afinidad por este elemento. Es decir, hay una estrecha relación entre estilos de vida y adaptación bioquímica y/o hematológica (Tamburrini *et al.*, 1997).

Partiendo de estas premisas, los movimientos relativamente rápidos de *T. natans* indicarían una baja afinidad de su hemoglobina por el oxígeno. Este planteamiento puede ser erróneo si se tienen en cuenta las diferencias en las tasas de producción de CO₂ en dos cecílicos filogenéticamente relacionados con *T. natans* como *T. compressicaudus* y *Dermophis mexicanus* (Stiffler & Talbot, 2000). En *T. compressicaudus* el O₂ es de gran afinidad por la hemoglobina. No obstante, los porcentajes de hematocrito para estas dos especies Gymnophiona son superiores a los manejados por los Chelonia que son de 20% a 35% (NRC, 2002); porcentajes que tampoco corresponden al hematocrito calculado para la mayoría de ectotermos e inferiores a la media del hematocrito de *T. natans*.

También se ha encontrado que la viscosidad sanguínea, y por tanto el hematocrito, se mantiene más o menos constante en algunos mamíferos comparados con anuros sometidos a un amplio rango de temperaturas entre 3°C y 38°C (Palenske & Saunders, 2002). Esta circunstancia puede estar influida por la ontogenia y el reducido tamaño de los glóbulos rojos de algunos Gymnophiona (Jared *et al.*, 1999), así como por su historia térmica. Por ejemplo, en reptiles como *Sceloporus occidentalis* el porcentaje de hematocrito es mayor a bajas temperaturas (15°C) que a elevados registros (30°C), así como en individuos de mayor tamaño (Dunlap, 2006), por ejemplo adultos. En *Kinosternon subrubrum* la tasa metabólica estándar sufre un mayor incremento a 30°C que a 20°C (Litzgus & Hopkins, 2003). En este sentido, se plantea que la temperatura óptima para *T. natans* puede estar alrededor de los 30°C y que

los niveles de hematocrito determinados podrían ser los más elevados de su desarrollo ontogénico.

La circunstancia antes mencionada podría ser extensiva a cualquiera de los parámetros medidos en *T. natans* y en cualquier otro grupo de animales, de acuerdo con Spicer & Burggren (2003). Esto demanda mayor comprobación experimental en la cecilia aquí estudiada, especialmente en lo relativo a posibles alteraciones proteicas. Así, la mayor tolerancia térmica de *T. natans* respecto de algunos reptiles como *S. occidentalis*, puede asociarse con un porcentaje de hematocrito mayor y un requerimiento de oxígeno más elevado de este cecílico; es de indicar que la historia térmica juega un papel trascendental en dicha tolerancia, lo cual ha sido planteado para otros anfibios (Hernández-Cuadrado, 2009).

Palenske & Saunders (2003) plantean que el porcentaje de hematíes no presenta cambios sustanciales en *Lithobates catesbeianus* durante la hibernación. Esto se debe a que los ectotermos de zonas templadas presentan mayor capacidad de ajuste metabólico frente a grandes variaciones térmicas (Hernández-Cuadrado, 2009), si se comparan con animales tropicales como *T. natans*. Es importante tener en cuenta que la evidente contaminación de la Ciénaga la Bahía puede estar actuando sinérgicamente con la temperatura y otros factores, acentuándose los posibles efectos adversos para las *T. natans*. Dicha contaminación es mayor en E1, E2, E3 y E5 del área de estudio y, posiblemente debido a esto, en dichas zonas hubo mayor variabilidad en los parámetros sanguíneos al comparar los grupos (GE y GP). En la estación 4, por el contrario, esa variación entre los grupos fue relativamente reducida. Es de resaltar que en E4 no hay vertimiento directo de aguas servidas.

El efecto de contaminantes ambientales sobre anuros y peces ha sido reportado en estudios previos (Pettersson *et al.*, 2006; Monteiro *et al.*, 2006). Por ejemplo, se han encontrado cambios hematológicos en peces canadienses al realizar pruebas con aguas residuales en grupos experimentales y en condiciones naturales (McPherson *et al.*, 2004; Farrel *et al.* 2004). No obstante, es necesario un mayor número de estudios que permitan arrojar más claridad sobre este asunto. Es de subrayar que si bien se ha estimado el volumen de eritrocitos en Aves, Squamatas y Chelonia, el presente estudio es el primero al respecto en *T. natans*.

Las proteínas plasmáticas de algunos anfibios son similares en sus propiedades a la de los humanos, especialmente la albúmina (Besbee *et al.*, 1977; Moskaitis *et al.*,

1989). Este dato se corresponde con los hallazgos del presente estudio en cuanto a los valores manejados por *T. natans* (ver tablas 1, 2 y 3), los cuales reciben la influencia de las condiciones donde habita esta cecilia. Los mayores niveles para este indicador sanguíneo en el GP pueden ser atribuidos a la mayor variedad en la oferta alimentaria que el animal encuentra en la ciénaga. Además, esto puede ser relacionado con el hecho de que los animales fueron colectados en el período de lluvias en el que las aguas de la ciénaga La Bahía aumentan ligeramente el pH y el oxígeno disuelto, alcanzando una temperatura promedio de 29,88°C (Tatis, 2005), esto es, se daban las condiciones ambientales favorables para esta especie.

Los resultados sugieren que en los ejemplares de *T. natans* estudiados no hubo obtención de energía teniendo como sustrato las proteínas, como se ha señalado para otros ectotermos (Oliveira & Da Silva, 1997). Adicionalmente, se plantea la posibilidad de que la carne de tilapia sea un alimento adecuado para este *Gymnophiona* bajo condiciones de confinamiento. Del mismo modo, se debe tener presente que la temperatura del agua en cautiverio fue de 29,9°C, es decir, igual a la del medio, pero con ligeras variaciones de pH y OD (Tatis, 2005). Esta última circunstancia pudo generar las diferencias significativas en la media general de proteína total entre los GE y GP, sin desconocer la incidencia de otros factores no tenidos en cuenta en esta investigación y que precisan ser abordados para una visión ecofisiológica más integral.

En este orden de ideas, hay que tener presente que en el GE sólo se utilizó la carne de tilapia como fuente de nutrientes. Pero de forma general el menor valor de la proteína total en este grupo no puede ser interpretado como señal de malnutrición, pues estos especímenes presentaron valores parecidos de peso y talla dentro del grupo y una apariencia saludable. Además, entre las estaciones de un mismo grupo no hubo diferencias en esta variable ($P > 0,05$), a pesar de la palpable contaminación de varios sectores de la Ciénaga la Bahía. Por ello, es necesario profundizar sobre el particular en investigaciones posteriores.

Por otro lado, los niveles de colesterol total en el plasma fueron iguales al comparar entre si las estaciones correspondientes entre el GE y el GP, excepto para la estación 3. Esto puede deberse, entre otras cosas, a la alta estabilidad de los lípidos frente a los cambios ambientales como sucede en la especie *Caiman crocodilus fuscus* (De la Rosa & Movilla, 2003) y al aporte de lípidos de la carne de tilapia que contiene un 5% de este nutriente (INPA, 1996). Sin embargo, en el medio natural la oferta de alimentos para esta especie es variada (Hernández-Cuadrado *et al.*, 2008)

de lo cual podría derivarse el mayor nivel de este parámetro en la estación citada del GP. También es posible que ante el estrés metabólico al que pueden estar sometidos los animales, debido a las aguas contaminadas de este sector, deban movilizar mayor cantidad de energía. Esta Energía pudo ser obtenida de los lípidos circulantes o de depósito por acción hormonal (cortisol, por ejemplo), así como del perfil de ácidos grasos hepáticos que también está influido por factores como la polución y la dieta (Justia *et al.*, 2003).

Lo anterior se sustenta en el hecho de que el colesterol es uno de los parámetros sanguíneos que tiene un gran impacto sobre el metabolismo (Mayes, 1992). De igual modo, aunque la glucosa es la molécula energética de uso corriente por los vertebrados, los ácidos grasos de cadena impar (AGCI) también pueden transformarse a glucosa a través de la gluconeogénesis. Este es un proceso especialmente importante para el sistema nervioso central y los hematíes que necesitan de un continuo suministro de dicho azúcar (Rokosky, 1997). El proceso es de gran importancia en aguas con elevados niveles de contaminación como sucede en la estación 3, pues ya se ha probado que pesticidas como el herbicida oxifluorfen pueden causar alteraciones metabólico-enzimáticas en peces (Peixoto *et al.*, 2006). La contaminación por agentes químicos podría ser una explicación a los recientes hallazgos de Price *et al.* (2011), quienes reportaron una estrecha relación entre la disminución de anfibios y su proximidad a zonas urbanizadas. Los resultados del presente estudio así lo evidencian para las poblaciones de *T. natans* en la ciénaga La Bahía, aunque se requieren datos experimentales adicionales.

También se sabe que temperaturas en cautiverio superiores a 33°C pueden ocasionar alteraciones en el metabolismo e incluso la muerte de estas cecilias (Kowalski, 1999; Hernández-Cuadrado & Vargas, 2005). Ello es sustentado por Schmidt-Nielsen (1988) quien señala la existencia de una menor tolerancia térmica de los animales acuáticos respecto de los terrestres, debido a que muchos mueren cuando los cuerpos de agua están en la franja de los 30°C a 35°C. Tatis (2005) registró una temperatura máxima de 36,5°C en la Ciénaga la Bahía, lo que permite suponer que en algunas épocas del año *T. natans* puede estar expuesta a estrés calórico en esta área. Por lo tanto, de persistir la intervención antrópica en este humedal podrían acentuarse algunos factores estresantes y generar un grado de amenaza mayor tanto para el taxón estudiado como para muchas especies de este ecosistema.

Adicionalmente, *T. natans* por poseer una masa hepática de gran tamaño (Hernández-Cuadrado & Vargas, 2007), hace

suponer que puede metabolizar cantidades relativamente altas de grasas y almacenar glucógeno en cantidades importantes para requerimientos posteriores. En este sentido, se conoce que para el transporte y almacenamiento tisular de lípidos endógenos, la lipoproteína de alta densidad (HDL) juega un papel principal en el pez *Dicentrarchus labrax* (Santulli *et al.*, 1997) y en la gran mayoría de vertebrados. Este aparte no fue evaluado en la presente investigación.

Por otra parte, es probable que los mayores niveles de glucosa en el GP se deban al elevado requerimiento energético en el hábitat natural. Este gasto puede estar relacionado con la disponibilidad de espacio y posiblemente porque el proceso gluconeogénico puede ser más acentuado, particularmente teniendo como sustrato los lípidos, dado que *T. natans* es una especie carnívora (Hernández-Cuadrado & Vargas, 2007). Esto concuerda con lo planteado por De la Rosa & Movilla (2003) acerca de la utilización de lípidos y aminoácidos en *Caiman crocodilus fuscus* para mantener el nivel glicémico óptimo.

Tietz (1992) señala que la glicólisis muestra gran sensibilidad a la variación térmica. De este modo pudieron verse afectados los niveles de glucosa en *T. natans*, lo que también pueden ser atribuido a las diferencias inter-específicas en la actividad glicolítica como se ha reportado en anuros (Mendiola *et al.*, 1991). Sin embargo, las diferencias estadísticas ($p < 0,05$) en una variable biológica no necesariamente reflejan la realidad ecofisiológica de un animal. O sea, es posible que fisiológicamente estos niveles de glucosa (o de cualquier otro parámetro, sanguíneo o no) puedan fluctuar en un rango considerablemente amplio, sin incurrir por ello en deficiencias glicémicas. Por ejemplo, en determinada circunstancia podría aumentarse la capacidad hepática para tomar glucosa sanguínea, como sucede en *Bufo calamita* (Mendiola *et al.*, 1991).

De este modo, los resultados permiten suponer una afectación directa por contaminación del medio sobre algunos parámetros sanguíneos de *T. natans*. Se ha comprobado que agentes contaminantes como el naftaleno pueden afectar los niveles plasmáticos de glucosa de algunos peces como *Oncorhynchus mykiss* en estadios iniciales de desarrollo (Tintos *et al.*, 2006). Por ello se sugiere profundizar al respecto en estudios subsiguientes en la especie aquí estudiada. Por otra parte, la falta de correlación encontrada en este estudio entre el sexo y los parámetros sanguíneos contrasta con la tendencia general entre los vertebrados donde es común que los machos presenten niveles ligeramente superiores respecto de las hembras (NRC, 2002).

En síntesis, las poblaciones de *T. natans* en el Complejo Lagunar de Malambo pueden estar expuestas a un gra-

do considerable de estrés fisiológico, toda vez que en la mayoría de las estaciones de colecta es palpable, por simple inspección, una fuerte y progresiva contaminación por vertimientos de múltiples orígenes. Nuestros datos indican que la acción de agentes contaminantes, en sinergia con otros factores, especialmente las variaciones térmicas, son una de las causas del declive de la clase Amphibia, particularmente del Orden Gymnophiona. Ello es sustentado por los cambios observados en varios de los parámetros sanguíneos determinados en *T. natans* en la ciénaga La Bahía.

Agradecimientos

A la Universidad del Atlántico por permitir el uso del Laboratorio de Bioquímica para la realización de esta investigación. A la Universidad del Tolima por el apoyo logístico recibido durante la preparación final del manuscrito. Al Profesor Jhon D. Lynch por incentivar el estudio de las cecilias colombianas a través de su artículo de 1999. Al profesor Rafael Borja Acuña por plantear la necesidad del estudio del Orden Gymnophiona en el Caribe Colombiano. Igualmente a Jhony Molina por su apoyo en las sesiones de laboratorio y a Sandra Lozano por sus comentarios al documento. Agradecimientos a Germán Rojas por el diseño y adaptación del mapa del área de estudio.

Bibliografía

- Arciniegas, T.H. 2003. Monitoreo de la Fauna Silvestre en el Municipio de Soledad, Atlántico.
- Berenbrink, M. 2006. Evolution of vertebrate haemoglobins: Histidine side chains, specific buffer value and Bohr effect. *Respiratory Physiology & Neurobiology* **154**:165-184.
- Bisbee, C.A., Baker, M.A., Wilson, A.C., Haji-Azimi, I., Fischberg, M. 1977. Albumin phylogeny for clawed frogs (Xenopus). *Science* **195**:785-787.
- Boyle, S.S.P. 1996. Effects of body temperature and hydrostatic pressure on pulmonary surfactant o fan apodan amphibian, *Typhlonectes natans* (M.Sc. Thesis). The University of Texas at Arlington.
- De La Rosa, D., Movilla, S. 2003. Determinación de la Influencia de la Dieta en los Parámetros Sanguíneos (colesterol, glucosa, ácido úrico) del *Caimán crocodilus fuscus* en cautiverio (Trabajo de grado). Barranquilla: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico.
- Dunlap, K.D. 2006. Ontogeny and scaling of hematocrit and blood viscosity in western fence lizards, *Sceloporus occidentalis*. *Copeia* **3**:535-558.
- El-Deib, S. 2005. Seasonal changes of water, electrolytes and aldosterone levels in blood serum, brain and kidney of the Egyptian cobra "*Naja haje haje*". *Journal of thermal biology* **30**:503-510.

- Farrel, A.P., Kennedy, C.J., Kolok, A.** 2004. Effects of wastewater from an oil-sand-refining operation survival, hematology, gill histology, and swimming of fathead minnows. *Canadian journal of zoology* **82**:1519-1527.
- Fontalvo, M.** 1993. Manual de Laboratorio de Fisiología. Barranquilla: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad del Atlántico.
- Gardner, M. N.** 1996. Ventilatory responses in *Typhlonectes natans* to changing aerial and aquatic gas tensions (M.Sc. Thesis). The University of Texas at Arlington.
- Hernández-Cuadrado, E.** 2009. Sensibilidad Térmica del Desempeño Locomotor en Anuros de un Gradiente Altitudinal en los Andes Colombianos (Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ciencias Biológicas). Universidad del Tolima, Colombia.
- _____, **Vargas Zapata, C., Hernández-Vélez, D.** 2008. Historia de Vida de *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona) en América del Sur: Aplicaciones Potenciales. *Revista Colombiana de Ciencia Animal* **1**(1):50-57, ISSN 2027-1840.
- _____, **Vargas, C.** 2007. Rasgos Morfológicos y sexaje en *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona). *Revista Tumbuga* **2**:25-39.
- _____, **Rodríguez, A.** 2006. Parámetros sanguíneos de *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona: Typhlonectinae) mantenidos en cautiverio en relación con ejemplares del medio natural durante el período lluvioso de 2005 (Trabajo de grado). Barranquilla: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias básicas, Universidad del Atlántico.
- _____, **Vargas C.** 2005. Algunos Aspectos Comportamentales y Morfología Interna de *Typhlonectes natans* (Amphibia: Gymnophiona). *Revista Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas* **17**:47.
- INPA.** 1996. Fundamentos de Nutrición y Alimentación en Acuicultura. Bogotá, Colombia.
- Jared, C., Navas, C.A., Toledo, R.C.** 1999. An appreciation of the physiology and morphology of the caecilians (Amphibia: Gymnophiona). *Comparative biochemistry and physiology part A* **123**:313-328.
- Justia, K.C., Hayashib, C., Visentainera, J.V., Souza, N.E., Matsushitaa, M.** 2003. The influence of feed supply time on the fatty acid profile of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed on a diet enriched with n-3 fatty acids, *Food Chem.* **80**:489-493.
- Kowalski, E.** 1999. *Typhlonectes natans*, cuidados y mantenimiento en cautividad de la cecilia del Río Cauca. *Reptilia* **30**:57-60.
- Litzgus, J.D., Hopkins, W.A.** 2003. Effect of temperature on metabolic rate of the mudturtle (*Kinosternon subrubrum*). *Journal of Thermal Biology* **28**:595-600.
- Maurer, E.F.** 1994. Environment change: Consequences for life history, morphology, and behavior (Ph.D Dissertation). University of Kansas, USA.
- Mayes, R.** 1992. Bioquímica. 14ª edición; editorial Manual Moderno.
- McPherson, T.D., Mirza, R.S., Pyle, G.G.** 2004. Responses of wild fishes to alarm chemicals in pristine and metal-contaminated lakes. *Canadian Journal of zoology* **82**:694-700.
- Mendiola, P., Molina, R., De Costa, J.** 1991. Comparative study in glycolytic capacity in Anuran amphibians. *Comp. Biochem. Physiol.* **98B**(2/3):209-213.
- Monteiro, D.A., Alves, DE., Almeida, J., Rantin, F.T., Kalinin, L.** 2006. Oxidative stress biomarkers in the freshwater characid fish, *Brycon cephalus*, exposed to organophosphorus insecticide Folisuper 600 (methyl parathion). *Comparative biochemistry and physiology part C* **143**: 141-149.
- Moskaitis, J.E., Sargent, T.D., Smith, Jr, L.H., Pastori, R.I., Schoenberg, D.R.** 1989. *Xenopus laevis* serum albumin: sequence of the complementary deoxyribonucleic acids encoding the 68- and 74-kDa peptides and the regulation of albumin gene expression by thyroid hormone during development. *Mol. Endocrinol.* **3**:464-473.
- Nkrumah, B., Nguah, S.B., Sarpong, N., Dekker, D., Idriss, A., May, J., Adu-Sarkodie, Y.** 2011. Hemoglobin estimation by the HemoCue® portable hemoglobin photometer in a resource poor setting. *BMC Clinical Pathology* **11**:1-6.
- NRC (National Research Council of Canada).** 2002. Variación Temporal, Poblacional y Sexual del Hematócrito en las Tortugas de Desierto. **80**(3). Ottawa.
- Oliveira, GT., Da Silva, R.S.M.** 1997. Gluconeogenesis in hepatopancreas of *Chasmagnathus granulata* crabs maintained on high-protein or carbohydrate-rich diets. *Comparative biochemistry and physiology part A: physiology* **118**(4):1429-1435.
- Palenske, N.M., Saunders, D.K.** 2003. Blood viscosity and hematology of american bullfrogs (*Rana catesbeiana*) at low temperature. *Journal of thermal biology* **28**:271-277.
- _____, **Saunders, DK.** 2002. Comparisons of blood viscosity between amphibians and mammals at 3°C and 38°C. *Journal of thermal biology* **27**:479-484.
- PDMS (Plan de desarrollo del municipio de Soledad, Atlántico, Colombia, 2008-2011).** 2008. Diagnóstico sobre el desarrollo sostenible municipal. Diagnóstico ambiental. 368 págs.
- Peixoto, F., Alves-Fernandes, D., Santos, D., Fontainhas-Fernandes, A.** 2006. Toxicological effects of oxyfluorfen on oxidative stress enzymes in tilapia *Oreochromis niloticus*. *Pesticide Biochemistry and Physiology* **85**:91-96.
- Pettersson, I., Arukw, A., Lundstedt-Enke, K., Mortensen, A.S., Berg, C.** 2006. Persistent sex-reversal and oviducal agenesis in adult *Xenopus (Silurana) tropicalis* frogs following larval exposure to the environmental pollutant ethynylestradiol. *Aquatic toxicology* **79**:356-365.
- Price, S.T., Cecala, K.K., Browne, R.A., Dorcas, M.A.** 2011. Effects of urbanization on occupancy of stream salamanders. *Conservation Biology* **25**(3):547-555.
- Rokosky, J.R.** 1997. Bioquímica. 1ª edición. Mc Graw Hill Interamericana.
- Rueda-Almonacid J.V., Lynch, J.D., Amézquita, A.** 2004. editores. Libro Rojo de los anfibios de Colombia. Serie Libros Rojos de Especies Amenazadas de Colombia. Conservación Internacional Colombia, Instituto de Ciencias Naturales -Universidad Nacional de Colombia y Ministerio del Medio Ambiente. Bogota, Colombia.

- Santulli, A., Messina, C.M., D'Amelio, V.** 1997. Variations of lipid and apolipoprotein content in lipoproteins during fasting in european sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.). *Comparative biochemistry and physiology part A: physiology* **118**(4):1233-1239.
- Scheer, B.** 1969. *Fisiología Animal*. Ediciones Omega S.A. Barcelona.
- Schmidt-Nielsen, R.** 1988. *Fisiología Animal, Ciencias Naturales*. 1ª edición. Duke University. UTEHA, México.
- Spicer, J.I., Burggren, W.W.** 2003. Development of physiological regulatory systems: altering the timing of crucial events. *Zoology* **106**:91-99.
- Stiffler, D.F., Talbot, C.R.** 2000. Exchanges of Oxygen, carbón dioxide, nitrogen, and water in the caecilian *Dermophis mexicanus*. *Journal comp. physiology B* **170**:505-509.
- Tamburrini, M., D'avino, R., Carratore, V., Kunzmann, A., Di Prisco, G.** 1997. The haemoglobin system of *Pleuragramma antarcticu*: correlation of haematological and biochemical adaptations with life style. *Comparative biochemistry and Physiology, part A: Physiology* **118**:1037-1044.
- Tatis, R.** 2005. Producción Primaria Fitoplanctónica de un Sistema Pulsante Neotropical: Complejo Lagunar de Malambo (Departamento del Atlántico) (Trabajo de grado). Barranquilla: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad del Atlántico.
- The World Conservation Union (IUCN)/ Species Survival Comisión (SSC).** 2001. Newsletter of the declining amphibian populations task force, Number 48.
- Tietz, N.** 1992. *Química Medica Moderna*. 1ª edición. México.
- Tintos, A., Gesto, M., Alvarez, R., Míguez, J.M., Soengas, J.L.** 2006. Interactive effects of naphthalene treatment and the onset of vitellogenesis on energy metabolism in liver and gonad, and plasma steroid hormones of rainbow trout *Oncorhynchus mikiss*. *Comparative biochemistry and Physiology, part C* **144**:155-165.
- Towes, D., Macintyre, D.** 1978. Respiration and circulation in apodan amphibians. *Canadian journal zoology* **56**:998-1004.
- Tresguerrres, J.A.** 1999. *Fisiología Humana*. Segunda Edición, McGraw Hill Interamericana. México.
- Wake, M.H.** 1993. Non-traditional characters in the assessment of caecilians Phylogenetic relationships. *Herpetol. Monogr* **7**:42-55.
- Willens, S., Stoskopf, M.K., Baynes, R.E., Lewbart, G.A., Taylor, S.K., Kennedy-Stoskopf, S.** 2006. Percutaneous malathion absorption in the harvested perfused anuran pelvis limb. *Environmental toxicology and pharmacology* **22**:263-267.
- Wood, S., Weber, R., Maloiy, G.M., Johansen, K.** 1975. Oxygen uptake and blood respiratory properties of the caecilian *Boulengerula taitanus*. *Resp. physiol.* **24**:355-363.

Recibido: febrero 18 de 2008.

Aceptado para su publicación: diciembre 18 de 2010.

CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA DEL HORIZONTE SUPERFICIAL DE UN ANDISOL HIDROMÓRFICO DEL ORIENTE ANTIOQUEÑO (COLOMBIA)

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo¹

Resumen

Jaramillo J. Daniel F.: Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 23-33. 2011. ISSN 0370-3908.

Se estudió la materia orgánica (MOS) acumulada en el horizonte superficial de un Andisol de régimen de humedad ácuico. La mayor parte de la MOS está compuesta por residuos orgánicos no húmicos, con bajo grado de evolución y el contenido de complejos órgano-minerales en el horizonte superficial es bajo. El horizonte A presentó, en promedio, un espesor considerable (31,2 cm), color oscuro, alto contenido de MOS (17,65 %), mayor contenido de ácidos húmicos que de ácidos fúlvicos, una baja relación E4/E6 (3,55) y un IM bajo (1,615). Los ácidos húmicos presentaron valores bajos de $\Delta \log k$ (0,54) y de RF (17,58). La fracción húmica de la MOS está conformada por ácidos húmicos de alto peso molecular, con bajo grado de polimerización y de condensación de compuestos aromáticos. Los ácidos húmicos de todas las muestras correspondieron al tipo P y la mayoría fue del tipo Po. La acumulación y poca evolución de la MOS parece estar controlada por el clima frío húmedo, el mal drenaje y la topografía del terreno.

Palabras clave: Andisol, materia orgánica del suelo, índices de calidad de MOS, tendencia espacial.

Abstract

A study was carried out to determine the soil organic matter content and characteristics from a surface horizon of an aquatic moisture regime Andisol. Most of the MOS was constituted by non-humic organic materials with low degree of evolution. The content of organic-mineral complexes in this surface horizon was low. The A horizon exhibited a considerable thickness (31.2 cm), dark color, high MOS (17.65 %), higher content of humic acids than fulvic acids, low E4/E6 ratio (3.55) and low IM (1615). The humic acids showed low values of $\Delta \log k$ (0.54) and RF (17.58). The humic fraction of the MOS was constituted by high molecular weight humic acids that had low

¹ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia. A.A. 3840. Medellín. djaramal@unal.edu.co

degree of both polymerization and condensation of aromatic compounds. The humic acids of all samples corresponded to the P-type, mostly Po-type. The accumulation and limited evolution of MOS was seems to be associated with the wet cold weather, restricted soil drainage and relief of field.

Key words: Andisol, soil organic matter, soil organic mater quality indices, geostatistics, soil variability.

Introducción

La materia orgánica del suelo (MOS), aunque no es su componente más abundante, en la mayoría de los suelos, sí es el más importante en todos debido a la gran actividad físico-química y biológica que genera y que controla en el mismo. La MOS, según **Zagal et al.** (2002), está formada por dos componentes básicos, desde el punto de vista físico: una fracción liviana y una fracción pesada.

La fracción liviana se caracteriza por no estar muy firmemente asociada con los minerales del suelo y por ser una materia orgánica poco transformada; posee una relación C/N con valores entre 12 y 39 y una densidad específica $< 2 \text{ Mg m}^{-3}$. Constituye hasta el 30% de la MOS (**Zagal et al.**, 2002).

La fracción pesada es aquella que se encuentra incorporada en los complejos órgano-minerales del suelo y que está fuertemente transformada. Tiene menor relación C/N y mayor densidad específica que la fracción ligera y constituye entre 30 y 50 % de la MOS (**Zagal et al.**, 2002).

Químicamente, la MOS se compone de una fracción macroorgánica o de materiales orgánicos frescos y de humus. El componente más importante es el humus, que puede representar hasta el 90 % del carbono total del suelo. A su vez, el humus se ha dividido, convencionalmente, en sustancias no húmicas y en sustancias húmicas (**Bendeck**, 2003), siendo estas últimas las más importantes en el suelo, debido a sus propiedades características: es un material coloidal, de composición indefinida, oscuro, con alta superficie específica y alta actividad química (CIC). Según su solubilidad se puede fraccionar el humus en 3 grupos de compuestos: ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) y huminas.

Según **Bendeck** (2003) la polimerización o policondensación de compuestos fenólicos produce, en primer lugar, los AF en los que predominan las cadenas alifáticas sobre los núcleos aromáticos. Al seguir aumentando la condensación y la cantidad de núcleos aromáticos y disminuir las cadenas alifáticas, se forman los AH. Un incremento en la condensación de los núcleos aromáticos con un empobrecimiento en cadenas alifáticas y en grupos fun-

cionales, principalmente COOH, conlleva a la formación de la humina.

Los AF difieren de los AH en que son menos condensados, tienen menor tamaño y peso molecular y tienen mayor cantidad de grupos funcionales oxigenados; así mismo son más jóvenes, más reactivos y más móviles (**Bendeck**, 2003). Según Dorronsoro, citado por **González** (2008), los AF son solubles a cualquier pH, se dispersan fácil en agua y tienen mayor acidez y mayor capacidad de complejación que los AH, los que son insolubles en agua y en casi todos los solventes no polares, pero son solubles en soluciones alcalinas. Las huminas son insolubles en cualquier pH.

La MOS se puede caracterizar mediante muchas técnicas, dependiendo de lo que se quiera conocer en específico. De los aspectos más importantes para conocer de la MOS están la cantidad y propiedades de la fracción húmica, así como el grado de humificación que ella tiene, para lo cual se utilizan métodos de separación densitométrica y luego, por medio de extracciones selectivas en las diferentes fracciones separadas, se pueden caracterizar su composición y otras propiedades entre las que **Bendeck** (2003), **Andreux** (2005) y **Favoretto** (2007) señalan como importantes el establecimiento de los contenidos de carbono en los AH (CAH) y en los AF (CAF), la relación de humificación (CAH/CAF), las densidades ópticas a diferentes longitudes de onda en el espectro UV-Visible y la composición elemental de los AH.

La determinación de la densidad óptica de los extractos obtenidos con las disoluciones selectivas es una de las metodologías de caracterización más utilizadas puesto que, como apunta **Ruiz** (2003), es una de las determinaciones más simples desde el punto de vista analítico y porque, según **Kononova** (1982) varían de acuerdo con el tipo y grado de madurez o de humificación que tengan las sustancias húmicas.

Las longitudes de onda a las cuales se determinan las densidades ópticas con mayor frecuencia son 465 nm (E4) y 665 nm (E6), con las cuales se determina la relación E4/E6 (**Chen et al.**, 1977, **Ruiz**, 2003) y conocida como índice de humificación (**Stevenson**, 1982) o índice cromático (**Correa**,

2005). También son muy utilizadas las absorbancias a 450 y 520 nm con las cuales se determina el índice melánico (IM) para definir la presencia de un epipedón melánico en los Andisoles, según la relación (Abs 450/Abs 520) por el método de Honna *et al.* (**Icomand**, 1988, **Motta *et al.***, 1990). Las densidades ópticas E4 y E6 son la base de la clasificación de los AH de **Kumada** (1987).

Chen *et al.* (1977) encontraron que la relación E4/E6 de los AH y de los AF es independiente de la concentración que tenga cada uno de los ácidos, aunque la absorbancia individual si depende de aquella y que la relación decrece al aumentar el peso molecular de los compuestos o el tamaño de las partículas. Según **Kononova** (1982) el valor de la relación E4/E6 depende del suelo en el que se haga la extracción.

La relación E4/E6 de los AF es mayor que la de los AH, en la mayoría de los casos, debido a que los AF tienen menor tamaño, menor peso molecular, menor contenido de C y mayor de oxígeno que los AH (**Chen *et al.***, 1977, **Avellaneda *et al.***, 2005, **Zamboni *et al.***, 2006). Además, los AH tienen mayor grado de polimerización (**Ruiz *et al.***, 1997) y de condensación de compuestos aromáticos (**Rivero y Paolini**, 1994). A pesar de lo anterior, hay estudios en los que se ha observado que dicha relación ha sido mayor para los AH (**Bravo *et al.***, 2007). En general, una relación E4/E6 más alta implica un suelo más joven y con mayor humificación de la MOS (**Bravo *et al.***, 2007).

Debido a la capacidad diferencial que tienen diferentes solventes de extraer compuestos distintos del suelo sometido a lavado con ellos, así como a la capacidad que tienen de interactuar con los compuestos orgánicos del suelo y producir cambios en su estructura, la relación E4/E6 también varía dependiendo del extractante y de la metodología que se utilice para procesar las muestras y los extractos (**Piccolo**, 1988).

Piccolo (1988), en un suelo orgánico (Histosol), realizó extracciones con hidróxido de sodio y con pirofosfato de sodio; purificó unos extractos y los otros no y obtuvo relaciones E4/E6 comprendidas entre 3 y 6,3, siendo los extractos purificados los de mayor valor en la relación. **Jaramillo** (2000) lavó Andisoles repelentes al agua con mezclas de etanol-benceno y de isopropanol-amoniaco y obtuvo relaciones E4/E6 mayores a 10 en los extractos de etanol-benceno, en 13 de los 15 suelos estudiados, mientras que las relaciones fueron menores a 10 en 14 de los 15 extractos de isopropanol-amoniaco.

Como se mencionó anteriormente, el valor de la relación E4/E6 varía según el suelo tratado. **Rivero y Paolini**

(1994) y **Ruiz *et al.*** (1997) encontraron, en suelos de Venezuela, variaciones en las relaciones E4/E6 para los AH de Alfisoles entre 3,86 y 5,53, en Inceptisoles valores de 4,82, en Vertisoles variaciones entre 4,01 y 4,57 y en Ultisoles valores entre 3,29 y 3,6; **Zamboni *et al.*** (2006), en Mollisoles del Valle del Cauca encontraron relaciones entre 3 y 4,6 y **Avellaneda *et al.*** (2005), **Bravo *et al.*** (2007) y **Mosquera *et al.*** (2007), en Andisoles de los departamentos de Caldas y Cauca (Colombia) obtuvieron relaciones desde menores de 2,8, hasta de 4,64.

La relación de humificación (CAH/CAF) es otra manera de caracterizar la fracción húmica de la MOS y establece cuál componente de ésta (AH o AF) predomina en el suelo. Una relación baja implica un bajo grado de humificación, mayor tamaño molecular y mayor carácter aromático en los AH que en los AF (**Shoji *et al.***, 1993, **Andreux**, 2005, **Zamboni *et al.***, 2006, **Bravo *et al.***, 2007).

Como en la relación E4/E6, el valor de la relación CAH/CAF también cambia según el suelo y el horizonte de éste en que es evaluada, así como con el extractante utilizado (**Tan**, 1978). **Rivero y Paolini** (1994) encontraron relaciones entre 2 y 3 para Alfisoles y de 5,87 para un Inceptisol, en Venezuela. En Mollisoles del Valle del Cauca, **Zamboni *et al.*** (2006) encontraron relaciones mayores en suelos cultivados con caña de azúcar que en suelos bajo bosque; además, las relaciones con menores valores, en ambas coberturas, las obtuvieron cuando utilizaron como extractante el NaOH; atribuyeron la mayor relación en caña a condiciones microclimáticas y al aporte permanente de biomasa al suelo que indujeron una rápida transformación de AF en AH, predominando el proceso de humificación sobre el de mineralización. **Correa** (2005) afirma que las sustancias húmicas extraídas con tetraborato y pirofosfato de sodio son más condensadas (CAH/CAF > 1) que las extraídas con hidróxido de sodio (CAH/CAF < 1) que extrae más AF.

Correa (2005) en una amplia revisión reporta que en Oxisoles, Ultisoles, Alfisoles e Inceptisoles de la altillanura plana y de la Orinoquia mal drenada predominan los AF poco polimerizados sobre los AH. En Andisoles mal drenados de la región andina fueron dominantes los AH en el horizonte superficial y en profundidad los AF. En Espodosoles de la Orinoquia colombiana **Andreux** (2005) también encontró que los AH predominaban en el horizonte A y que los AF lo hacían en los horizontes B epódicos.

Kumada (1987), aprovechando los espectros UV-Vis, ha propuesto un sistema de clasificación de los AH, teniendo como uno de los parámetros de clasificación el Dlog k [\log de la absorbancia a 400 nm ($\log k_{400}$) – \log de la absorbancia a 600 nm ($\log k_{600}$)], donde a menor valor de

$\Delta \log k$ se tendrá mayor grado de humificación en los AH y mayor número de grupos funcionales ácidos en ellos. El otro parámetro utilizado en este sistema de clasificación es el RF, que es una medida del color relativo de los AH y que se calcula mediante la titulación de 30 mL de la solución de AH utilizada para hacer el espectro UV-Vis con KMnO_4 0.1 N, con la siguiente relación: $\text{RF} = k600 * 1000/c$, donde c es el volumen de permanganato gastado en la titulación. La relación entre $\Delta \log k$ y RF es inversa. Los AH extraídos del suelo se clasifican en 5 grupos básicos: A, B, Rp, Po y P. La definición del tipo de AH se hace ubicando los valores de $\Delta \log k$ y de RF en un gráfico diseñado para el efecto, que corresponde a un plano cartesiano cuyos ejes son esos dos parámetros.

Rivero y Paolini (1994), han resumido algunas propiedades básicas de los diferentes tipos de AH de Kumada, estableciendo que la acidez total, el contenido de grupos carboxilo y carbonilo y el contenido de nitrógeno total decrecen en el sentido: $\text{Rp} > \text{Po} > \text{B} > \text{A}$, en tanto que el contenido de grupos hidroxilo y metoxilo decrece en el sentido: $\text{A} > \text{B} > \text{Po} > \text{Rp}$. Además, apuntan que el menor grado de evolución en el suelo se manifiesta con menores valores de RF y mayores valores de $\Delta \log k$.

Según **Kumada** (1987), la humificación de los AH empieza en los de tipo Rp que pasan a tipo B y luego a tipo A; en suelos fuertemente ácidos, los AH tipo Rp son reemplazados por los de tipo P. **Jaramillo** (2000) caracterizó los AH extraídos de los primeros centímetros del horizonte superficial de 12 perfiles de Andisoles repelentes al agua con cobertura de *Pinus patula*, encontrando que correspondían a AH tipo Rp, específicamente al subtipo Rp(2) por el alto contenido de materia orgánica fresca presente en ese horizonte.

En otro perfil de Andisol con cobertura de *Cupressus lusitanica*, tanto en el horizonte A superficial y repelente al agua como en los horizontes A enterrados que encontraron hasta los 40 cm de profundidad, **Jaramillo et al.** (2006) caracterizaron los AH como del tipo P, variando entre los subtipos Po y P ±, lo que indica un bajo grado de humificación (**Kumada**, 1987, **Shoji et al.**, 1993). El mismo tipo de AH fue encontrado por **López** (1996) en los primeros 100 cm de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Oriente Antioqueño, Colombia), bajo cobertura de ciprés (*Cupressus lusitanica*).

Con respecto a los factores que intervienen en la dinámica de las diferentes fracciones de la MOS no se encuentra unanimidad entre los investigadores. Aunque se acepta el efecto que tienen en ella los factores de formación del suelo, sobre todo el clima y el material parental (**Ruiz et al.**,

1997, **Andreux**, 2005, **Mosquera et al.**, 2007 y varios citados por **Correa**, 2005), hay diferencias sobre el efecto que pueden tener la cobertura vegetal, el uso y el manejo de los suelos. Algunos han encontrado que la cantidad y tipo de MOS que se acumula en el suelo se ve afectado por el manejo agronómico del mismo como laboreo, rotación de cultivos, fertilización y manejo de los residuos de las cosechas (**Zagal y Córdova**, 2005), mientras que otros (**González**, 2008) no encontraron una relación significativa entre el material parental, el uso y el manejo de los suelos con la concentración de los AH y de los AF en los primeros 30 cm del suelo.

Ruiz et al. (1997) encontraron diferencia significativa entre el grado de humificación de los AH del horizonte superficial de Vertisoles y Ultisoles y la atribuyeron a la condición de drenaje y a las diferencias en el contenido y tipo de arcillas presentes en ambos suelos. **Zamboni et al.** (2006) atribuyeron el mayor contenido de AH que encontraron en el horizonte superficial de Mollisoles al buen contenido de bases que tenían. **Correa** (2005) reporta trabajos en los que se ha encontrado que el grado de humificación de la MOS en Andisoles se ha observado en aquellos horizontes que han presentado mayores contenidos de alofana. **Avellaneda et al.** (2005) no encontraron diferencias en la caracterización de los AH de Andisoles que se pudieran relacionar con diferencias en la cobertura vegetal y en el manejo que tenían los suelos, en cambio, **Broquen et al.** (2005) sí encontraron diferencias significativas en los valores de la relación CAH/CAF del horizonte superficial de Andisoles y Mollisoles de la Patagonia Argentina que atribuyeron a cambios en la cobertura vegetal puesto que se hacían aportes de materiales orgánicos de diferente naturaleza en ellos.

Con este trabajo se caracterizó la MOS del horizonte superficial de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño, estableciendo los contenidos de CAH y CAF que tiene, así como su calidad.

Materiales y métodos

Descripción y localización del área de estudio

El estudio se hizo en una finca ubicada en cercanías a la vía que conduce de la autopista Medellín-Bogotá al aeropuerto José María Córdova, en la vereda Ranchería del municipio de Guarne (Antioquia, Colombia), localizada en las siguientes coordenadas: 6°11'46.02" N, 75°26'18.51" W. Altitudinalmente, el lote experimental está ubicado entre los 2184 y los 2189 m.

La parcela experimental se encuentra desarrollada sobre depósitos aluviales con un recubrimiento espeso de

ceniza volcánica (Figura 1a); tiene relieve inclinado con pendiente alrededor de 7% (Figura 1b) y posee problemas de mal drenaje con nivel freático alto la mayor parte del tiempo (Figura 1a); se encuentra bajo cobertura vegetal de gramas. El clima de la zona es frío húmedo.

El sitio experimental ha estado sometido a explotación agropecuaria (no se tiene información sobre el tiempo que duró la misma) y, en los últimos 5 años antes de hacer el trabajo, estuvo utilizado en recreación (finca de descanso) con siembra y fertilización (elementos mayores y materia orgánica) esporádica de frutales (manzano, aguacate), sin mucho éxito, y de gramas naturales.

En general, los suelos presentan un horizonte A oscuro que tiene un espesor promedio de 32 cm (Figura 1a), de textura media (FL) y bien estructurado en bloques subangulares finos. Son Andisoles con régimen de humedad ácuico y de temperatura isomésico y al nivel de subgrupo se clasificaron como Typic Endoaquand. Según **Jaramillo** (2008) son ligeramente ácidos y tienen bajo contenido de fósforo disponible y de bases intercambiables y una alta CIC variable. Están limitados en su profundidad efectiva por la presencia de un nivel freático alto, evidenciado por una fuerte gleización y moteos que empiezan a aparecer a una profundidad promedio de 41 cm (Figura 1a).

Muestreo

Se realizó un muestreo intensivo en red flexible con el que se recolectaron en total 63 muestras espaciadas, en promedio, 8,66 m. En cada sitio de muestreo se midió el espesor del horizonte A (EHA, cm) y se determinó su color Munsell. Luego se tomó una muestra disturbada del horizonte superficial y se empacó en una bolsa plástica hermética que se destinó para hacer los análisis de laboratorio respectivos.

Propiedades evaluadas en el laboratorio

En las muestras traídas al laboratorio se determinó el contenido de materia orgánica del suelo (MOS, %) y se hizo la caracterización espectroscópica de dicha materia orgánica, haciendo una extracción con NaOH 0,1 M, en una proporción 1:10. El extracto obtenido fue acidificado con H_2SO_4 hasta alcanzar un pH entre 1 y 2, con lo cual se obtiene un precipitado (ácido húmico) y un extracto en el cual queda disuelta la fracción fúlvica; se separan las dos fracciones y en cada una se determina el contenido de carbono teniendo así el contenido de carbono de los ácidos húmicos (CAH, %) y el de carbono en los ácidos fúlvicos (CAF, %); con estos resultados se estableció la razón de humificación mediante la relación CAH/CAF (**Tan**, 1978). Todas las determinaciones de carbono se hicieron con el método de Walkley y Black (**Motta et al.**, 1990). Con los valores de aluminio extraído con pirofosfato de sodio (Alp), tomados de **Jaramillo** (2008) y transformando MOS en carbono orgánico (Corg), mediante la ecuación $[Corg = MOS/1,724]$, se estableció la relación Corg/Alp (**García-Rodeja et al.**, 2004).

Adicionalmente, en el extracto obtenido se hizo la caracterización de los ácidos húmicos por el método de Nagoya, descrito por **Kumada** (1987) y se estableció su índice melánico (IM) por el método de Honna *et al.*, descrito por **Icomand** (1988). Además, se estableció su relación E4/E6 con las absorbancias a 465 nm (E4) y a 665 nm (E6) (**Chen et al.**, 1977).

Análisis estadísticos

Los resultados obtenidos con todas las variables fueron sometidos a análisis exploratorios para determinar los estadísticos que las caracterizaron: media, desviación

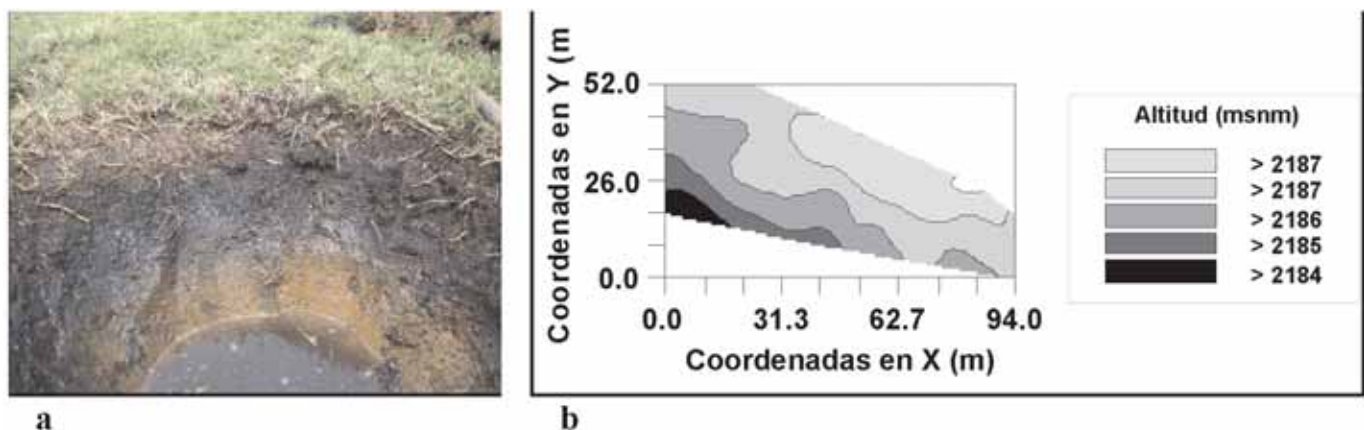


Figura 1. a. Perfil del suelo y nivel freático. b. Mapa topográfico del terreno.

estándar, valores máximo y mínimo, coeficiente de variación y asimetría, así como para determinar si su distribución correspondía a la de una normal (Shapiro-Wilk). También se hicieron análisis de correlación lineal entre las propiedades determinadas en este trabajo y otras tomadas de **Jaramillo** (2008, 2009). Todos los análisis estadísticos se hicieron con el programa Statgraphics Centurion.

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se presentan los estadísticos básicos de las propiedades analizadas. Cabe destacar que casi todas las propiedades evaluadas presentan una fuerte asimetría y una distribución que no corresponde con la normal: sólo tiene distribución simétrica el chroma y distribución normal la MOS. La variabilidad que se presenta en buena parte de las variables estudiadas es alta y se refleja en los coeficientes de variación relativamente altos y en la amplitud de los rangos de valores que ellas exhiben.

Puede apreciarse en la Tabla 1 que el suelo estudiado presenta en promedio, en el horizonte A, un espesor considerable, color oscuro, alto contenido de materia orgánica, mayor contenido de ácidos húmicos que de ácidos fúlvicos, una baja relación E4/E6 y un IM bajo. Los AH presentaron valores bajos de $\Delta \log k$ y de RF. Estos resultados permiten decir que la fracción húmica de la MOS de estos Andisoles, en promedio, está conformada por AH de alto peso molecular, con bajo grado de polimerización, debido al bajo valor de la relación E4/E6 según criterios de **Bravo et al.** (2007); el bajo valor de la relación CAH/CAF indica un bajo grado de condensación de compuestos aromáticos, según **Rivero y**

Paolini (1994) y **Zamboni et al.** (2006) y puede implicar, según **Broquen et al.** (2005), una relativamente alta actividad de la materia orgánica debida a un contenido alto de grupos funcionales en los AF.

Obsérvese que la cantidad de sustancias húmicas recuperadas de estos suelos es bastante baja, teniendo en cuenta la alta cantidad de materia orgánica que tienen. Ésto implica que hay poca cantidad de ellas en el suelo pues, como lo expone **Andreux** (2005), los materiales orgánicos poco transformados producen poca cantidad de extracto, lo que quiere decir que la mayor parte de la MOS está compuesta por residuos orgánicos no húmicos y, además, que el contenido de complejos órgano-minerales en el horizonte superficial es bajo, según **Zamboni et al.** (2006), lo que se traduce en poca estabilidad de los agregados en él.

El valor promedio de la relación E4/E6, aunque fue bajo, no lo fue tanto como el encontrado por **Avellaneda et al.** (2005) en Andisoles dedicados a explotación cafetera y también fue más baja que la encontrada por **Mosquera et al.** (2007) en Andisoles agrícolas del Cauca (Colombia). **Correa** (2005) reporta estudios en Andisoles de la zona cafetera colombiana donde la relación E4/E6 en Fulvudands y en Melanudands fue menor que la encontrada en este trabajo y donde los AH, en los Melanudands, correspondieron al tipo A; este comportamiento implica un mayor grado de humificación en estos suelos, comparados con los hidromórficos estudiados, lo que se confirma con el hecho de que éstos no cumplieron con el requisito de color (value y chroma ≤ 2) exigido para el epipedón melánico por **Soil Survey Staff** (2006).

Tabla 1. Principales estadísticos* de las propiedades de la materia orgánica del horizonte superficial de Andisoles hidromórficos del Oriente Antioqueño, Colombia (n = 63).

Propiedad	Media \pm DE	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	CV (%)	Asimetría	Valor p de Shapiro-Wilk
EHA (cm)	31,23 \pm 13,29	10,0	75,0	22,0	38,0	42,55	3,08988	0,00689
Value	2,64 \pm 0,28	2,5	4,0	2,5	3,0	10,43	7,84144	0
Chroma	1,62 \pm 0,58	1,0	3,0	1,0	2,0	35,82	0,918378	5,55E-16
MOS (%)	17,65 \pm 2,72	8,2	23,8	15,8	19,6	15,42	-2,01724	0,48605
Corg/Alp	8,64 \pm 2,42	3,87	16,72	7,26	10,29	27,94	3,38737	0,003786
CAH (%)	2,45 \pm 0,94	1,2	6,4	1,9	2,8	38,51	6,18293	2,229E-8
CAF (%)	1,82 \pm 1,19	0,6	6,0	1,1	2,0	65,46	6,45393	2,606E-13
CAH/CAF	1,76 \pm 1,03	0,22	5,43	1,07	2,23	58,54	3,98322	0,000269
E4/E6	3,55 \pm 0,69	1,42	5,2	3,29	3,88	19,35	-2,82361	0,00004835
$\Delta \log k$	0,5406 \pm 0,1014	0,1524	0,716	0,5172	0,5883	18,76	-6,56404	1,3244E-11
RF	17,58 \pm 10,93	3,94	55,57	10,45	19,95	62,17	5,54497	2,411E-9
IM	1,615 \pm 0,076	1,4992	1,8706	1,5707	1,6595	4,72	2,68985	0,00481

* DE: Desviación estándar. CV: Coeficiente de variación. Q1 y Q3: Cuartiles inferior y superior, respectivamente.

Los resultados presentados en la Tabla 2 permiten caracterizar mejor las propiedades evaluadas. En ellos se evidencia que en la mayoría de los sitios muestreados los horizontes poseen un alto contenido de materia orgánica. Además, en menos del 25% de las muestras predominan los AF sobre los AH (relación CAH/CAF<1) y sólo en un 10 % de ellas hay un IM > 1,7, lo que indica un alto grado de humificación en muy pocos de los sitios muestreados (Figura 2).

García-Rodeja et al. (2004), considerando que la relación Corg/Alp depende fuertemente del grado de humificación de la MOS y de su composición química, la proponen como un índice para establecer ese grado de humificación, con la posibilidad de que también sirva para estimar el grado de saturación del humus con aluminio. Estos investigadores encontraron un valor promedio de 13 (variando entre 10 y 26) para la relación Corg/Alp en horizontes ándicos de Andisoles de Italia, Azores e islas Canarias, el cual estuvo en concordancia con los valores promedios obtenidos para Andisoles de Japón, citados por ellos mismos. En Andisoles de Islandia con mal drenaje y con menor grado de descomposición de la MOS debido al clima frío, la relación varió entre 31 y 37 y en horizontes O, fue mayor de 114.

En los Andisoles del presente trabajo la relación Corg/Alp varió entre 3.87 y 16.72, con promedio de 8.64 (Tabla 1); además, el 95% de las muestras presentaron un valor de Corg/Alp < 13 (Tabla 2), es decir, menor que el promedio obtenido para los Andisoles europeos (13) por **García-Rodeja et al.** (2004) y para Andisoles de Chile (13,8) por **Matus et al.** (2008). Lo anterior, según **García-Rodeja et al.** (2004), estaría indicando una alta saturación del humus con aluminio y un grado alto de evolución de la MOS lo que no corresponde con lo observado en estos suelos: **Jaramillo** (2008, 2009) extrajo en promedio 1,22 % de aluminio con pirofosfato y sólo 15 de 64 muestras presentaron aluminio intercambiable (extractable con KCl). Por lo tanto, en estos suelos la MOS presenta un bajo grado de evolución y su alta acumulación no se relaciona con el contenido de Al, como lo encontraron en Andisoles de Chile, **Matus et al.** (2006, 2008) y de México, **Campos et al.** (2001). La acumulación y poca evolución de la MOS en los Andisoles estudiados parece estar controlada por el clima frío húmedo y por el mal drenaje, tal como lo propusieron **Buytaert et al.** (2007) para Andisoles del Ecuador.

El análisis de caracterización de los AH por el método de **Kumada** (1987) confirmó ampliamente el bajo grado de humificación que presenta la MOS de estos suelos. En la

Tabla 2. Percentiles de las principales propiedades de la materia orgánica del horizonte superficial de Andisoles hidromórficos del Oriente Antioqueño, Colombia.

Percentil (%)	Value	Chroma	MOS (%)	CAH	CAF	CAH/CAF	Corg/Alp	E4/E6	Δlog k	RF	IM
1	2,5	1,0	8,2	1,2	0,6	0,22	3,87	1,42	0,1524	3,94	1,499
5	2,5	1,0	13,8	1,3	0,7	0,48	5,76	1,95	0,2894	4,49	1,512
10	2,5	1,0	14,1	1,5	0,9	0,68	5,99	2,96	0,4708	8,58	1,518
25	2,5	1,0	15,9	1,9	1,1	1,07	7,26	3,29	0,5172	10,45	1,572
50	2,5	2,0	17,95	2,4	1,5	1,56	8,18	3,62	0,5586	14,48	1,618
75	2,75	2,0	19,6	2,8	2,0	2,23	10,29	3,88	0,5883	19,95	1,66
90	3,0	2,0	20,5	3,6	3,3	3,0	11,68	4,19	0,6217	29,3	1,7
95	3,0	2,0	21,2	3,8	4,6	3,22	12,48	4,43	0,6469	42,16	1,745
99	4,0	3,0	23,8	6,4	6,0	5,43	16,72	5,2	0,716	55,57	1,871

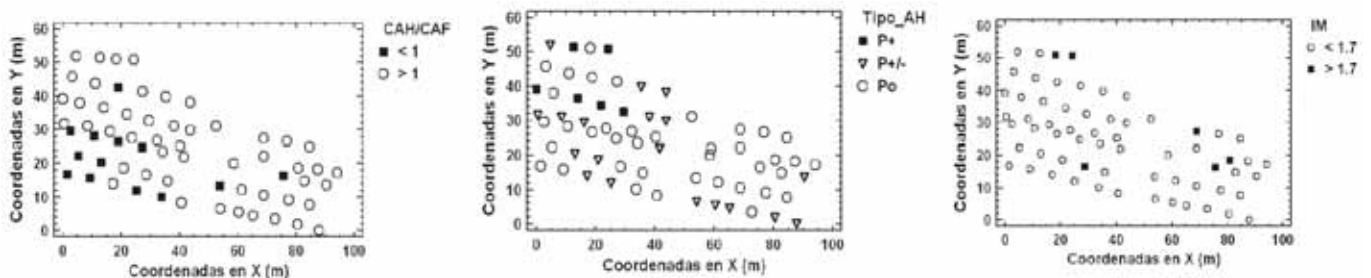


Figura 2. Variación espacial de las propiedades que caracterizan la MOS en el horizonte superficial de Andisoles hidromórficos del Oriente Antioqueño, Colombia.

Figura 3 se puede ver que los AH de todas las muestras analizadas correspondieron al tipo P y dentro de éstos, la mayor parte fue del tipo Po. Además, los bajos valores del $\Delta \log k$ y del RF caracterizan un bajo grado de humificación de la MOS. En el horizonte superficial de Andisoles del Oriente Antioqueño (Colombia), bajo coberturas de pastos, papa y rastrojo, **López** (1996) también encontró un bajo grado de evolución de la MOS y unos AH correspondientes, en su gran mayoría, al tipo Po (sólo una muestra correspondió al tipo Rp). **Jaramillo et al.** (2006), en horizontes A superficiales de Andisoles de la cuenca de Piedras Blancas (Antioquia) bajo cobertura de ciprés (*Cupressus lusitanica*) encontraron AH tipo Po y en horizontes A enterrados encontraron AH tipo P \pm . **González** (2008) también encontró un amplio predominio de los AH tipo P en los suelos de la zona cafetera que estudió.

Al llevar a cabo un análisis de correlación lineal entre las variables estudiadas y entre éstas y otras evaluadas en estos mismos suelos en otros trabajos (**Jaramillo**, 2008, 2009) se encontraron los resultados que se presentan en la Tabla 3.

Contrario a lo que se ha encontrado en otros trabajos (**Matus et al.**, 2006, 2008), en éste no hubo correlación significativa entre los contenidos de alofano y de ferrihidrita (**Jaramillo**, 2009) con ninguna de las formas de materiales orgánicos extraídos de estos suelos (MOS, CAH, CAF, Csh, Csht, Cr) ni con los índices establecidos para caracterizar la calidad de la MOS (CAH/CAF, E4/E6, Corg/Alp, $\Delta \log k$, RF, IM).

Es interesante notar las estrechas correlaciones que se presentan entre algunos de los índices de evaluación de la calidad de la MOS: E4/E6, $\Delta \log k$ y RF, lo que está mostrando que prácticamente todos miden lo mismo. También es destacable el hecho de que el IM y la relación Corg/Alp se correlacionan significativamente con varias propiedades químicas de los suelos: color, pH, CICE y CIC y que, además, el IM también correlaciona con los contenidos de los nutrientes P, Ca, Mg y K.

Como puede apreciarse en la Tabla 3, no hubo correlación entre el contenido de materia orgánica del suelo (MOS) y los contenidos de sustancias húmicas (CAH, CAF, Csh,

Tabla 3. Coeficientes de correlación lineal, significativos al 95 %, entre algunas de las propiedades de la MOS y químicas del suelo* en el horizonte superficial de Andisoles hidromórficos del Oriente Antioqueño, Colombia.

	X	Y	Altitud	Cota NF	MOS	Corg/Alp	CAH	CAF	Csh	Cp	Csht	Cr	E4/E6	$\Delta \log k$	IM	Value
Y	-0.5932															
Altitud	0.5610	0.2606		0.9687												
Cota NF	0.6737															
Corg/Alp					0.2582											
CAH		-0.2874							0.2508							
CAF	-0.3141		-0.6561	-0.5890												
CAH/CAF	0.3068		0.3854	0.3856			0.4765	-0.6262		0.3208						
Csh		-0.3153	-0.5232	-0.4392			0.6637	0.8067				-0.6570				
Csht			-0.4231	-0.3420			0.6815	0.6919	0.9243	0.4820		-0.7005				
Cr			0.3552	0.2633	0.5811	0.3395	-0.3961	-0.5615	-0.6570	-0.3160	-0.7005					
$\Delta \log k$													0.9790			
RF													-0.7355	-0.7815		
IM		0.4473	0.3480			0.3602	-0.3992		-0.3731		-0.3353	0.2683				
Value	-0.3472	0.3783		-0.2793	-0.2515		-0.2966				-0.2904					0.2946
Chroma						0.2625										0.3248
pHa		0.3304				0.5828	-0.3414		-0.3407		-0.3208					0.5343
pHk		0.3617				0.6255	-0.4097		-0.3823		-0.3799					0.5544
pHn						-0.5152										-0.4493
CICE						0.6377										0.5138
CIC	-0.2938	0.3697			0.3209	0.2779			-0.2491			0.4306				0.3975
P																0.4513
Ca																0.5355
Mg																0.4270
K																0.4283
Alofana			-0.3554	-0.3280												
Ferrihidrita		0.3914														

* Cota NF: Cota del nivel freático (msnm). Corg: C orgánico= MOS/1,724 (%). Csh: C de sustancias húmicas extraídas con NaOH(%)= CAH+CAF. Cp: C orgánico extraído con pirofosfato de Na. Csht: C de sustancias húmicas totales = Csh + Cp. Cr: C orgánico no extraído por los anteriores extractantes = (Corg-Csht) (%). Las demás como se han definido en el texto.

Valores de Altitud, Cota NF, pHa, pHk, pHn, CICE, CIC, P, Ca, Mg, K, Alp, Alofana y Ferrihidrita tomados de **Jaramillo** (2008, 2009).

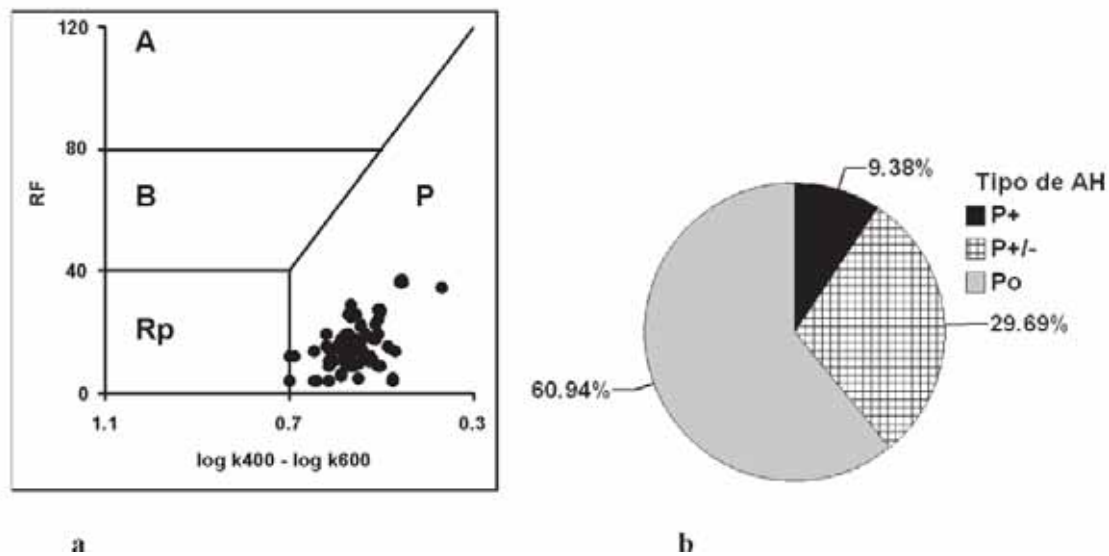


Figura 3. Caracterización de los AH del horizonte superficial de Andisoles hidromórficos del Oriente Antioqueño, Colombia. **a.** Tipo de AH. **b.** Distribución de la frecuencia de los AH presentes en los suelos estudiados.

Csht). Nótese que varias de las propiedades de la MOS presentaron correlación significativa con las coordenadas, con la altitud y con la cota del nivel freático en los puntos de muestreo, lo que implica que hay un efecto topográfico en la distribución de los contenidos de ciertos tipos de materiales húmicos (ver el mapa topográfico del terreno en la Figura 1b), comportamiento que está ligado a la solubilidad de los diferentes ácidos de esta fracción.

La correlación negativa entre la altitud y CAF, Csh y Csht está indicando que en las partes más altas del terreno se acumula menor cantidad de AF y de sustancias húmicas en general. Además, la relación positiva de la altitud con Cr indica que en las partes altas se acumula mayor cantidad de sustancias orgánicas poco humificadas y menos solubles. La acumulación de sustancias menos humificadas en las partes más elevadas también la confirma la relación positiva entre la altitud con la relación CAH/CAF y con el IM.

La falta de correlación significativa entre el contenido de materia orgánica del suelo y los índices que la califican (CAH, CAF, CAH/CAF, Csh, Csht, E4/E6, $\Delta \log k$, RF e IM) indica que la calidad de la materia orgánica que se acumula en el suelo depende, en buena medida, de otros factores diferentes a la cantidad de ella que se le aporta a éste y confirma las observaciones hechas por **Bottner et al.** (2006), **Nierop et al.** (2007) y **González** (2008).

En los resultados del análisis de correlación (Tabla 3) se aprecia que, aparte del comportamiento del IM y de la

relación Corg/Alp, ya mencionado anteriormente, hay muy pocas correlaciones significativas entre la MOS y los otros índices que la evalúan, con las propiedades químicas y de fertilidad del suelo, resultados muy similares a los encontrados por **González** (2008).

Conclusiones

Los Andisoles hidromórficos estudiados presentan alto contenido de MOS poco humificada, con baja producción de sustancias húmicas, con AH de alto peso molecular, bajo grado de polimerización y de condensación de compuestos aromáticos. Los AH correspondieron, en su gran mayoría al tipo Po de Kumada.

No se presentó correlación significativa entre la cantidad de materia orgánica del suelo y los índices que se utilizaron para calificarla lo que implica que la calidad de la MOS no depende de la cantidad de ella que se le aporte al suelo. El IM fue el índice que correlacionó con mayor cantidad de propiedades químicas y nutricionales del suelo, seguido por la relación Corg/Alp; los demás índices no correlacionaron con ninguna de ellas. Se alcanzó a detectar un efecto significativo de la topografía sobre algunos contenidos y/o índices de calidad de la MOS.

Agradecimientos

Al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, por la realización de los análisis.

Bibliografía

- Andreux, F.** 2005. La materia orgánica del suelo desde la perspectiva pedogenética. En: Memorias Seminario Materia Orgánica y microorganismos en la Agricultura Colombiana. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 24 p.
- Avellaneda, L.; Lozano, A. & Zamudio, A.** 2005. Efecto del uso y la cobertura del suelo sobre el perfil de polidispersidad de ácidos húmicos extraídos de un Andisol del departamento de Caldas, Colombia. *Revista Colombiana de Química* **34**(2):189-200.
- Bendeck, M.** 2003. Origen y formación del humus. En: Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 9 p.
- Bravo, I.; Marquinez, L. & Potosí S.** 2007. Fraccionamiento del fósforo y correlación con la materia orgánica en dos suelos del departamento del Cauca. *Suelos Ecuatoriales* **37**(2):147-154.
- Bottner, P.; Pansu, M.; Sarmiento, L.; Hervé, R.; Callisaya-Bautista & Metselaar, K.** 2006. Factors controlling decomposition of soil organic matter in fallow systems of the high tropical Andes: A field simulation approach using ¹⁴C- and ¹⁵N-labelled plant material. *Soil Biology & Biochemistry* **38**:2162-2177.
- Broquen, P.; Lobartini, J. C.; Candan F. & Falbo G.** 2005. Allophane, aluminum, and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic ash soils of Argentina. *Geoderma* **129**:167-177.
- Buytaert, W.; Deckers, J. & Wyseure, G.** 2007. Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena* **70**:143-154.
- Campos, A.; Oleschko K.; Cruz, L.; Etchevers J. & Hidalgo C.** 2001. Estimación de alofano y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra* **19**(2):105-116.
- Chen, Y.; Senesi, N. & Schnitzer, M.** 1977. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Science Society American Journal* **41**:352-358.
- Correa, A.** 2005. Pasado y futuro de los estudios de la materia orgánica del suelo en Colombia. En: Memorias Seminario Materia Orgánica y microorganismos en la Agricultura Colombiana. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 21 p.
- Favoretto, C. M.** 2007. Caracterização da matéria orgânica humificada de um Latossolo Vermelho Distrófico a través da espectroscopia de fluorescencia inducida por laser. Dissertação (Mestrado na área de Química Aplicada). Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 99 p.
- García-Rodeja, E.; Novoa, J. C.; Pontevedra, X.; Martínez-Cortizas, A. & Buurman, P.** 2004. Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *Catena* **56**:155-183.
- González, H.** 2008. Caracterización de la materia orgánica en algunos suelos representativos de la zona cafetera del departamento de Caldas. Tesis Maestría Geomorfología y Suelos. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 75 p.
- Icomand.** 1988. Circular letter N° 10. Leamy, M. L. Editor. New Zealand Soil Bureau. New Zealand. 80 p.
- Jaramillo, D. F.** 2000. Caracterización preliminar de los compuestos hidrofóbicos removidos de Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* **53**(1):801-821.
- _____. 2008. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **61**(2):4588-4599.
- _____. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente Antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. **62**(1):4907-4921.
- _____; **Flórez M. T. & Parra, L. N.** 2006. Caracterización de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Oriente Antioqueño, Colombia. *Suelos Ecuatoriales* **36**(1):61-71.
- Kononova, M.** 1982. Materia orgánica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación. Oikos-Tau. Barcelona. 365 p.
- Kumada, K.** 1987. Chemistry of soil organic matter. Japan Scientific Societies Press. Tokio. 240 p.
- López, M. N.** 1996. Clasificación de ácidos húmicos de Andisoles del Oriente Antioqueño. Trabajo de Grado Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 66 p.
- Matus, F.; Amigo, X. & Kristiansen, S. M.** 2006. Aluminium stabilization controls organic carbon levels in Chilean volcanic soils. *Geoderma* **132**:158-168.
- Matus, F.; Garrido, E.; Sepúlveda N.; Cárcamo, I.; Panechini M. & Zagal E.** 2008. Relationship between extractable Al and organic C in volcanic soils of Chile. *Geoderma* **148**:180-188.
- Mosquera, C.; Bravo, I. & Hansen, E.** 2007. Comportamiento estructural de los ácidos húmicos obtenidos de un suelo Andisol del departamento del Cauca. *Revista Colombiana de Química* **36**(1):31-41.
- Motta, B.; Rodríguez, C.; Montenegro, H.; Marulanda, J.; Correa, A. & Bendeck, M.** 1990. Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos. 5ª ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- Nierop, K.; Tonnejck, F.; Jansen B. & Verstraten, J.** 2007. Organic matter in volcanic ash soils under forest and páramo along an Ecuadorian altitudinal transect. *Soil Science Society of American Journal* **71**:1119-1127.
- Piccolo, A.** 1988. Characteristics of soil humic extracts obtained by some organic and inorganic solvents and purified by HCl-HF treatment. *Soil Science* **146**(6):418-426.
- Rivero, C. & Paolini, J.** 1994. Caracterización de la materia orgánica de tres suelos venezolanos. *Revista Facultad de Agronomía (Maracay)* **20**:167-176.
- Ruiz, M.; Elizalde, G. & Paolini, J.** 1997. Caracterización de las sustancias húmicas presentes en microagregados de suelos de dos toposecuencias. *Agronomía Tropical* **47**(4):381-395.

- Ruiz, O.** 2003. Sustancias húmicas e índices de humificación. En: Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 13 p.
- Shoji, S.; Dahlgren, R. & Nanzyo, M.** 1993. Genesis of volcanic ash soils. In: Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. Shoji S., M. Nanzyo and R. Dahlgren, editors. Developments in Soil Science 21. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. pp. 37-71.
- Soil Survey Staff.** 2006. Keys to soil taxonomy. Tenth Edition. USDA. Washington D. C. 332 p.
- Stevenson, F.** 1982. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. Wiley. New York. 443 p.
- Tan, K. H.** 1978. Variations in soil humic compounds as related to regional and analytical differences. Soil Science **125**(6):351-358.
- Zagal, E. & Córdova, C.** 2005. Indicadores de calidad de la materia orgánica del suelo en un Andisol cultivado. Agricultura Técnica **65**(1):186-197.
- Zagal, E.; Rodríguez, N.; Vidal, I. & Flores, A. B.** 2002. La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil. Agricultura Técnica **62**(2):284-296.
- Zamboni, I.; Ballesteros, M.I. & Zamudio, A.M.** 2006. Caracterización de ácidos húmicos y fúlvicos de un Mollisol bajo dos coberturas diferentes. Revista Colombiana de Química **35**(2):191-203.

Recibido: diciembre 10 de 2009.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

EFECTO DEL ENRIQUECIMIENTO POR NITRÓGENO Y FÓSFORO EN LOS CAMBIOS NETOS DE NUTRIENTES Y PRODUCCIÓN FITOPLANCTÓNICA EN LA DESEMBOCADURA DEL RÍO SEVILLA, CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA

René M. Sánchez¹, Maribeb Castro-González², Sven Zea³

Resumen

Sánchez R.M., M. Castro-González, S. Zea: Efecto del enriquecimiento por nitrógeno y fósforo en los cambios netos de nutrientes y producción fitoplanctónica en la desembocadura del río Sevilla, Ciénaga Grande de Santa Marta. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 35-43, 2011. ISSN 0370-3908.

En la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) Caribe colombiano se han registrado altos valores de producción primaria (PP) respecto a otros sistemas acuáticos del mundo. Como el N parece ser el elemento limitante de la PP debido a su baja concentración relativa respecto al P, se desarrollaron experimentos de adición de nutrientes para evaluar la respuesta de la comunidad pelágica en términos de su uso o liberación y de la PP en la boca del río Sevilla, área representativa de la alta actividad biológica observada en esta laguna costera tropical. Para esto, se determinaron los cambios netos de concentración de los diferentes iones y la evolución del oxígeno disuelto en períodos de 4 horas. En general se presentó una liberación neta leve de N y P en controles sin adición de nutrientes y una tendencia al consumo en los experimentos con adición. La PP neta sólo se incrementó significativamente cuando se adicionó amonio o nitrato+fósforo a baja concentración. Los resultados mostraron que subsidios adicionales de N y P pueden ser aprovechados rápidamente por la comunidad planctónica aunque éstos no conllevaron a aumentos inmediatos en la PP, la que al parecer descendió en altas concentraciones de nutrientes, posiblemente por efecto de inhibición y/o competencia entre procesos fisiológicos.

Palabras clave: Cambios Netos de Nutrientes, Producción Fitoplanctónica, Bioensayos, Ciénaga Grande de Santa Marta.

¹ Geoingeniería, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: rene.sanchez@geoingenieria.com

² Universidad del Tolima, Departamento de Biología. Fac. de Ciencias, A.A. 546, Ibagué-Colombia. Correo electrónico: mcastro@ut.edu.co

³ Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Biología, Centro de Estudios en Ciencias del Mar - CECIMAR; INVEMAR, Cerro Punta de Betín, Apartado 10-16, Santa Marta, Colombia. Correo electrónico: szea@invemar.org.co

Abstract

At the Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) in the Colombian Caribbean, high primary production (PP) values in comparison to other aquatic ecosystems of the world has been registered. As N appears to be the limiting element to PP, owing to its relatively low concentration with respect to P, nutrient addition experiments were carried out to evaluate the response of the pelagic community in terms of its use or release and of primary production in the mouth of Sevilla river, a representative area of high biological activity observed in this tropical coastal lagoon. The concentration's net changes of the various ions and the evolution of dissolved oxygen were determined after 4 hrs. In general, there was slight net release of N and P in controls without nutrient additions and a trend for consumption in the experiments with additions. Net primary production increased significantly only when ammonium or nitrate plus phosphorous were added at low concentration. These results show that additional subsidies of N and P may be quickly used by the planktonic community although this was not accompanied by immediate increases in primary production, the latter of which could even decrease at high concentrations of nutrients, possibly by the effect of inhibition and/or competition between physiological processes.

Key words: Nutrients Net Changes, Nutrients, Phytoplankton Production, Bioassays, Ciénaga Grande de Santa Marta.

Introducción

Las concentraciones instantáneas de nutrientes inorgánicos disueltos en los sistemas acuáticos están reguladas por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos (p.e. intercambio con otros sistemas, reciclamiento bentónico y reciclamiento pelágico interno), que pueden condicionar sus proporciones relativas y por ende su disponibilidad. La disponibilidad de estos compuestos puede limitar y regular la producción primaria si las proporciones relativas de Nitrógeno inorgánico disuelto (NID) y Fósforo inorgánico disuelto (PID) no se encuentran dentro de los requerimientos de los productores primarios (Parsons *et al.*, 1984; Howarth, 1988), que debería ser 16:1 molar para las poblaciones fitoplanctónicas marinas. En general, las lagunas costeras son ambientes altamente productivos y sistemas ecológicamente complejos en donde la productividad primaria puede estar dominada por el fitoplancton, por algas macro-micro bentónicas, por macrófitas o, en algunos casos, por una combinación de éstas (Harrison, 1983; Knoppers, 1994). En la laguna costera Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) en el Caribe colombiano, se han registrado valores de producción primaria fitoplanctónica en un intervalo de 1149.8 y 1554.9 g C/m².año (Hernández y Gocke, 1990; Hernández y Márquez, 1991, Gocke *et al.* 2003), cifras muy altas en comparación con otros sistemas acuáticos. La CGSM se ha caracterizado por su gran heterogeneidad espacial y temporal en las concentraciones de ortofosfatos y nutrientes nitrogenados disueltos. Entre 1996-1997 se reportó una tendencia al incremento del fósforo, y una relación directa y positiva entre la cantidad de nutrientes inorgánicos disueltos en la columna de agua y la producción primaria en el área cercana a la desembocadura del

Rio Sevilla (Sánchez y Zea, 2000) la cual fue estimada en ~912.5 g C/m².año (Gocke *et al.*, 2003 a). Al respecto, los autores sugirieron que aunque el NID sería el nutriente limitante en relación con el PID, que siempre está en exceso, lograba mantener alta la producción primaria y solo deficiencias ocasionales de NID en el medio requerirían de ser compensadas a través del uso de reservas o procesos de reciclaje (Sánchez y Zea, 2000). Sin embargo, estudios que se han venido desarrollando en la CGSM desde 1999, después de la apertura de los canales cerca al área costera, muestran que el sistema lagunar en general, presenta una tendencia a la disminución de las concentraciones de nutrientes inorgánicos (INVEMAR, 2003, 2004, 2005, 2006). De ahí la importancia de analizar el efecto que tendría la adición de nutrientes sobre la producción primaria en este tipo de ecosistemas. Para esto han sido usados bioensayos de tiempo corto en los cuales se adicionan nutrientes a cultivos puros de algas para medir con C¹⁴ su crecimiento o tasas de incorporación, como también se ha usado la adición de nutrientes a botellas de agua que contienen la comunidad planctónica natural para medir el efecto de éstos sobre el crecimiento o producción a través del incremento en biomasa, clorofila o asimilación de C¹⁴ (Howarth, 1988). Aunque este tipo de ensayos se ha realizado en períodos de unos pocos días a una semana, son varios los estudios que muestran que luego de la adición de un nutriente limitante, se puede observar un incremento rápido en la tasa fotosintética en períodos de 4 a 6 horas (Lean y Pick, 1981).

Asimismo, se ha planteado que el estudio experimental de cambios netos de concentración de nutrientes inorgánicos disueltos, tales como nitrógeno y fósforo durante el

proceso de producción primaria, pueden ser una aproximación útil para definir la tendencia de variación de estos compuestos en la columna de agua en un sistema dado y contribuir al entendimiento de mecanismos funcionales del ecosistema (Doering *et al.*, 1995). En la CGSM el comportamiento temporal y espacial de las concentraciones instantáneas de NID y PID y de su metabolismo son muy heterogéneos; no se evidencia ningún patrón sistemático de consumo o liberación, con excepción de una tendencia general al consumo neto del nitrato y a la liberación neta de fósforo, éste último particularmente en la noche (Sánchez, 1998; Sánchez y Zea, 2000). La posible explicación a esta gran variabilidad es que los cambios netos de concentración involucran una serie de procesos que realizan los diferentes componentes biológicos del sistema y que, además, estos organismos se encuentran enmarcados dentro de un entorno con características fisicoquímicas espacial y temporalmente heterogéneas. Por esto, suponemos que adiciones experimentales de nutrientes en el sistema podrían dar indicios de la existencia de algún tipo de limitación para la producción primaria, y darían luces sobre la existencia de una relación cercana entre el consumo y la demanda para la producción primaria. Para ello se desarrollaron incubaciones experimentales de corta duración, con muestras de agua de la CGSM a las cuales se adicionaron nutrientes para medir sus cambios netos y su efecto sobre la producción primaria fitoplanctónica.

Área de experimentación

La Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM), Colombia, tiene un área aproximada de 450 km² y se extiende entre los 10°40' - 10°59' latitud norte y 74°26' - 74°38' longitud oeste. Se considera una laguna costera que hace parte del delta exterior del río Magdalena y cuenta con un sistema adyacente de caños, ciénagas y pantanos de manglar. Presenta influencia marina en el sector de la Boca de la Barra y recibe agua de los ríos Aracataca, Sevilla y Fundación provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta. Para la realización de los bioensayos, se recolectaron durante tres días contínuos durante la época seca (Febrero-Marzo) 3 litros de agua superficial que se transportó al laboratorio inmediatamente para realizar los bioensayos. El agua se tomó cerca a la desembocadura del Río Sevilla (Figura 1) el segundo río más grande que desemboca en la CGSM y donde se han reportado condiciones físico-químicas y biológicas similares a las observadas en el área central de la CGSM.

Materiales y métodos

Los ensayos consistieron en la adición de NaNO₃, NH₄Cl, K₂PO₄ y NaNO₃·K₂PO₄ (solos o en combinación)

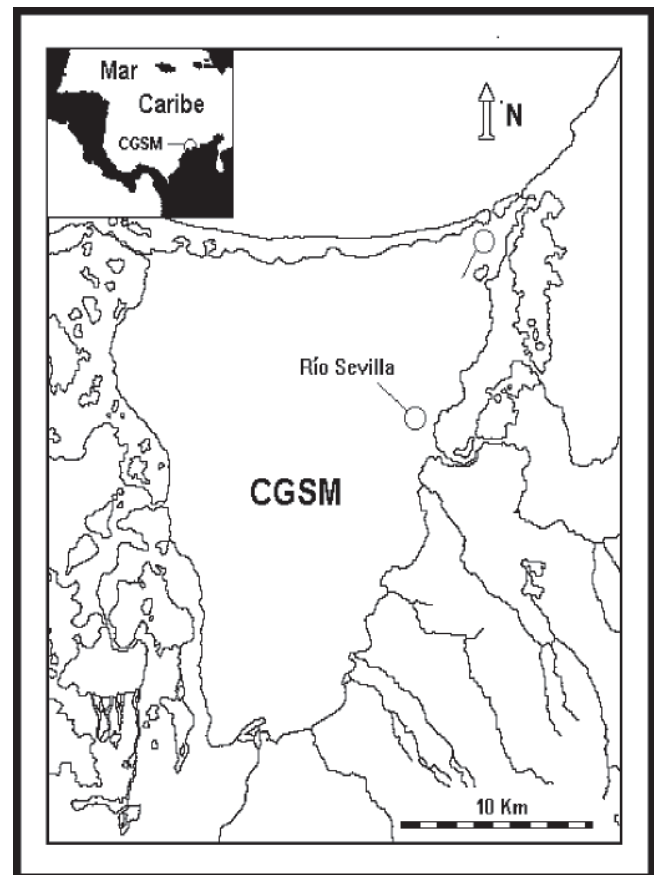


Figura 1. Localización del sitio de toma de muestras de agua, en una zona adyacente a la desembocadura del Río Sevilla en la Ciénaga Grande de Santa Marta.

a sistemas experimentales con 500 mL de agua proveniente de la CGSM. Se adicionó 50 y 125 mmolL⁻¹ en tres repeticiones de cada adición en días separados y con aguas separadas. Se obtuvo un total de 24 sistemas experimentales independientes. Cada uno contó con tres réplicas y con sus respectivos controles, a los cuales no se les adicionó ningún nutriente. Los sistemas experimentales consistían de botellas ISO de 500 mL, prelavadas con HCl (10 %), enjuagadas con agua desionizada y adaptadas para que no se formaran burbujas, las cuales se colocaron en acuarios de vidrio instalados a cielo abierto, regulando la temperatura por adición continua de agua, en un periodo de incubación de 4 horas. Las incubaciones se realizaron entre las 10:00 y 16:00 horas.

Las concentraciones de nitrato (NO₃⁻¹), nitrito (NO₂⁻¹), amonio (NH₄⁺) y ortofosfatos (PO₄⁻³) fueron determinadas utilizando la metodología estándar de la APHA-AWWA-WPCF (1975), siguiendo las modificaciones propuestas por

Gocke (1987). Para determinar las concentraciones iniciales de estos compuestos, al inicio de las incubaciones se filtraron 50ml de las muestras de agua de cada ensayo por membranas de $0,45\mu$ de tamaño de poro y se congelaron a -20°C para el posterior análisis de nutrientes por colorimetría. Asimismo, al terminar el periodo de incubación, se determinaron las concentraciones de estos compuestos en cada una de las botellas utilizadas. Los cambios netos de cada compuesto se estimaron restando de la concentración al final de la incubación (C_t) la concentración inicial (C_0), dividido por el tiempo de experimentación en horas ($DC=(C_t - C_0)/t$). Por otro lado, la producción fitoplanctónica se estimó utilizando la técnica de “evolución de oxígeno en botellas claras y oscuras” modificada; para lo cual se midió la concentración de oxígeno en las mismas botellas empleadas para los análisis de nutrientes y se adicionaron botellas oscuras para medir la respiración planctónica. Las concentraciones de oxígeno disuelto se determinaron con el método de Winkler y la conversión del oxígeno (O_2) liberado en carbono (C) fijado se realizó aplicando el cociente fotosintético 0,85 considerando que 1 mg de O_2 liberado equivale aproximadamente a 0,313 mg de C fijado de acuerdo con **Parsons et al.**, (1984). Para determinar diferencias significativas en los cambios netos de los iones de N y P y en la producción primaria neta (PPN) durante las incubaciones con la adición extra de iones, se realizaron por separado análisis en un ANOVA mixto para cada ion, la PPN y cada concentración adicionada (50 mmolL^{-1} y 125 mmolL^{-1}), tomando como factores principales Tratamiento (fijo) y Ensayo (como bloques aleatorios de repetición de experimentos), cuyos cuadrados medios esperados siguieron el siguiente modelo (obtenidos de la orden “random”, opción “/test” del módulo GLM del programa SAS, siendo tratados como aleatorios los ensayos y la interacción).

Fuente	Cuadrados medios esperados (tipo III)
Tratamiento	$\text{Var}(\text{Error}) + 3 \text{ Var}(\text{Tratamiento}*\text{Ensayo}) + \text{Q}(\text{Tratamiento})$
Ensayo	$\text{Var}(\text{Error}) + 3 \text{ Var}(\text{Tratamiento}*\text{Ensayo}) + 15 \text{ Var}(\text{Ensayo})$
Tratamiento*Ensayo	$\text{Var}(\text{Error}) + 3 \text{ Var}(\text{Tratamiento}*\text{Ensayo})$
Error	$\text{Var}(\text{Error})$

Siendo Var la varianza aleatoria y Q la varianza aditiva debida al tratamiento. Con ello, los valores de F para los factores principales fueron calculados usando como denominador los cuadrados medios de la interacción. En la mayoría de los casos la variable cambio neto de concentración no cumplió con los supuestos de homogeneidad de varianzas

entre celdas (tratamiento*ensayo), ni de normalidad de los residuos del modelo, ni siquiera después de realizar transformaciones Box-Cox. Al no haber una prueba no-paramétrica para este diseño complejo, se optó por incluir estos resultados tomándolos como tentativos. La PPN sí cumplió con los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad de residuos.

Resultados

Las características físicas y químicas, y posiblemente las biológicas, del agua utilizada para los ensayos variaron entre los diferentes experimentos, debido a que su toma se realizó en días diferentes. El pH del agua fue ligeramente básico ($7,99 \pm 0,22$, $n=12$), con salinidad intermedia ($18,56 \pm 2,14$, $n=12$) debido a la influencia de las aguas del río Sevilla. La intensidad lumínica en cada día de ensayo fue variable, con un intervalo de $252 - 1110 * 50000 \text{ LUX}$ ($812,06 \pm 271,00 * 50000 \text{ LUX}$, $n=30$) y la temperatura del sistema de incubación varió entre 28 y $35,2^{\circ}\text{C}$ ($32,74 \pm 1,92^{\circ}\text{C}$, $n=30$). Las concentraciones iniciales en los sistemas control para los diferentes iones fueron: $1,037 \pm 0,533 \text{ mmolN L}^{-1}$ de nitrato ($n=13$), $0,036 \pm 0,030 \text{ mmolN L}^{-1}$ de nitrito ($n=13$), $2,37 \pm 1,069 \text{ mmolN L}^{-1}$ de amonio ($n=13$) y $2,791 \pm 0,718 \text{ mmolP L}^{-1}$ de ortofosfatos ($n=13$). Estas concentraciones representan los nutrientes inorgánicos disueltos disponibles para la comunidad planctónica al inicio de las incubaciones, los cuales se encontraban en una proporción de N respecto al P de $1,251 \pm 0,301$.

La concentración inicial de NO_3^{-1} en los tratamientos con adición de 50 mmol L^{-1} y 125 mmol L^{-1} de NaNO_3 fue de $6,562 \pm 4,069$ y $17,176 \pm 8,074 \text{ mmol N L}^{-1}$, respectivamente. La concentración inicial de NH_4^{+1} para los ensayos con adición de NH_4Cl fue de $2,972 \pm 0,750 \text{ mmol N L}^{-1}$ para adición de 50 mmol L^{-1} y $19,880 \pm 2,886 \text{ mmol N L}^{-1}$ para adición de 125 mmol L^{-1} . Respecto a los tratamientos con adición de 50 y 125 mmol L^{-1} de K_2PO_4 , se obtuvieron concentraciones iniciales de PO_4^{-3} de $20,162 \pm 6,116$ y $35,075 \pm 10,221 \text{ mmol P L}^{-1}$, respectivamente. En los experimentos en los que se adicionó una mezcla de $\text{NaNO}_3 + \text{K}_2\text{PO}_4$, la concentración inicial de NO_3^{-1} en los ensayos fue de $24,474 \pm 6,912$ y $28,260 \pm 12,077 \text{ mmol N L}^{-1}$ en la adición de 50 y 125 mmol L^{-1} respectivamente, mientras que para el PO_4^{-3} la concentración fue de $9,487 \pm 4,126 \text{ mmol P L}^{-1}$. De los datos anteriores se hace evidente que hubo gran variabilidad en las concentraciones iniciales en los diferentes sistemas de incubación, y son muy disímiles a lo que se esperaría teóricamente al adicionar una solución con una concentración determinada a un volumen definido. Por esto, fue muy importante, la medición de la concentración inicial para tener el valor real con el cual se empezaron las incubaciones.

Los cambios netos promedio de concentración para NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ y PO_4^{3-} en los controles tuvieron una tendencia a ser positivos, o sea de liberación neta (Figura 2), siendo los promedio más altos los del ión NO_3^- con valores de

$0,233 \pm 0,327 \text{ mmolNL}^{-1}\text{h}^{-1}$. Cambios netos promedio negativos, de utilización neta, sólo se presentaron en algunos controles para PO_4^{3-} ($-0,031 \pm 0,086 \text{ mmolPL}^{-1}\text{h}^{-1}$). Respecto a los sistemas experimentales con adición de nutrientes se

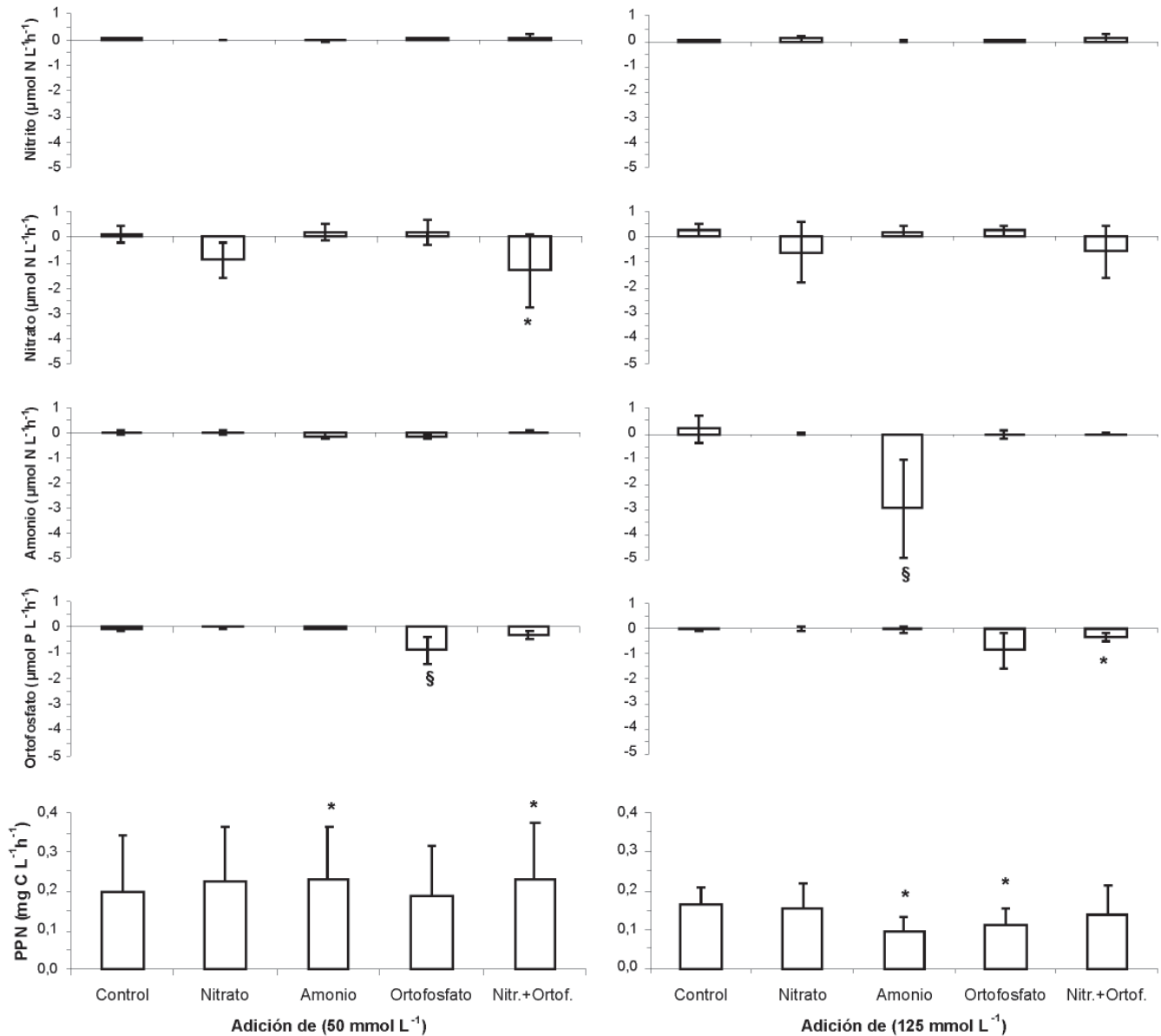


Figura 2. Cambios netos de nitrógeno, fósforo ($\mu\text{mol L}^{-1}\text{h}^{-1}$), y producción primaria neta asociada ($\text{mg C L}^{-1}\text{h}^{-1}$) durante las incubaciones. Los datos son promedios \pm desviación estándar. En las gráficas de la izquierda se adicionaron 50 mmol L^{-1} de cada ion y combinación, mientras que en las de la derecha se adicionaron 125 mmol L^{-1} de cada ion por separado, y 125 mmol L^{-1} de nitrato + 50 mmol L^{-1} de ortofosfatos en combinación. Los asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de cada tratamiento en comparación con los controles (prueba de Dunnett) en un ANOVA mixto tomando ensayos como bloques aleatorios (3 ensayos por nivel de adición y 3 réplicas de cada tratamiento por ensayo). § indica que aunque hubo diferencias significativas con respecto a los controles, una interacción significativa tratamiento*ensayo muestra que las diferencias con el control variaron con cada ensayo. Hay casos en que la altura de las barras de un tratamiento significativo es similar a la del control, porque hay variación en la magnitud de la respuesta entre los ensayos, pero el efecto del tratamiento es consistentemente mayor o menor en todos.

encontró gran heterogeneidad en los cambios netos de concentración, aunque se observó una tendencia a que cuando se adicionó un nutriente, los cambios de concentración promedio fueron negativos para el ión adicionado, indicando utilización neta (Figura 2). Al respecto, sólo se presentaron diferencias significativas con los controles cuando se añadió $\text{NaNO}_3 + \text{K}_2\text{PO}_4$ en una concentración de 50 mmolL^{-1} , en donde hubo una absorción significativa de NO_3^- ($-1,292 \pm 1,448 \text{ mmolNL}^{-1}\text{h}^{-1}$ vs. $0,137 \pm 0,327 \text{ mmolNL}^{-1}\text{h}^{-1}$ del control). Cuando se añadió K_2PO_4 , solo (50 mmolL^{-1}) o combinado con NaNO_3 (125 mmolL^{-1}), hubo absorción neta de PO_4^{3-} ($-0,868 \pm 0,530 \text{ mmolPL}^{-1}\text{h}^{-1}$ vs. $-0,031 \pm 0,085 \text{ mmolPL}^{-1}\text{h}^{-1}$ del control). Para que hubiera absorción neta significativa de amonio hubo que añadirse 125 mmolL^{-1} de NH_4Cl ($-2,991 \pm 1,935 \text{ mmolNL}^{-1}\text{h}^{-1}$ vs. $0,169 \pm 0,563 \text{ mmolNL}^{-1}\text{h}^{-1}$ del control). Para el resto de ensayos no hubo diferencias significativas con los controles.

Con relación a la PPN promedio se encontró en los controles un intervalo de $0,054 \pm 0,015$ y $0,368 \pm 0,020 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$. En los ensayos con adición de nutrientes la PPN se comportó muy similar a los controles y sólo en algunos casos se presentaron diferencias estadísticamente significativas (Figura 2). La PPN se vio aumentada solamente al añadir cantidades moderadas (50 mmolL^{-1}) de NH_4Cl ($0,229 \pm 0,132 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$ vs. $0,199 \pm 0,141 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$ de los controles) y $\text{NaNO}_3 + \text{K}_2\text{PO}_4$ ($0,233 \pm 0,140 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$ vs. $0,199 \pm 0,141 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$ de los controles). En cambio la PPN descendió cuando se añadieron en mayor cantidad (125 mmolL^{-1}) NH_4Cl ($0,094 \pm 0,036 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$ vs. $0,164 \pm 0,044 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$ del control) y K_2PO_4 ($0,113 \pm 0,042$ vs. $0,164 \pm 0,044 \text{ mgCL}^{-1}\text{h}^{-1}$ del control).

Discusión

La CGSM es un ecosistema complejo, heterogéneo y dinámico, cuyas características físicas, químicas y biológicas presentan gran variabilidad espacial y temporal. Debido a esta condición, es presumible pensar que los diferentes procesos metabólicos que realizan los organismos que habitan en la columna de agua se encuentren estrechamente relacionados con las condiciones preponderantes en un momento dado. Es así como la variabilidad observada, sumada a las condiciones atmosféricas presentes durante los días de experimentación, se ven reflejadas en las características de los sistemas de incubación (p.e. salinidad, pH, intensidad lumínica, abundancia y composición del plancton, T° , etc.) y en las respuestas metabólicas obtenidas en cada uno de los ensayos.

Los cambios netos de concentración de nutrientes inorgánicos disueltos, medidos como la diferencia entre

las concentraciones finales e iniciales de un ion determinado en cada uno de los sistemas de incubación, son el resultado de esa interacción de procesos que realizan cada uno de los componentes del plancton. En general, los cambios netos negativos, en los ensayos en que se observa disminución en las concentraciones iniciales, indican que en el intervalo de tiempo analizado, los procesos de toma de nutrientes predominaron sobre los procesos de producción. Por el contrario, los cambios positivos estarían indicando que los procesos de generación (p.e. excreción, remineralización, etc.) predominan sobre los de toma. Así mismo, si no se encuentra ningún cambio en la concentración al final de la incubación, podría indicar que existe un balance entre las salidas y entradas al *stock* de nutrientes o que no pasó nada dentro del margen detectable por la metodología implementada durante el período del experimento. Además, cabe señalar que cada uno de los nutrientes se ven involucrados en procesos que realizan cierto grupo de organismos. Por ejemplo, los cambios de concentración de amonio dependen de procesos de remineralización bacteriana, exudación por el fitoplancton, pastoreo y excreción por parte del zooplancton que aportan este nutriente y por procesos de toma por parte de fitoplancton y bacterias que lo consumen (Corner y Biddanda, 2002); de la misma forma, respecto a los cambios de concentración de nitrato, estos dependen de procesos de nitrificación de nitrito, que aporta nitrato al sistema y por procesos de toma llevado a cabo por bacterias y fitoplancton (Howarth, 1988, Paerl y Pinckney, 1996).

A pesar que el NID se encuentra en bajas concentraciones y en proporciones muy bajas respecto al PID, no se aprovechó al máximo el N suministrado en diferentes formas, al menos dentro de las 4 horas posteriores a su adición. También se observó gran variabilidad en los cambios netos de los diferentes iones analizados ya que al adicionar N en forma de NH_4^+ o NO_3^- , principalmente para concentraciones altas de amonio (125 mmolL^{-1} de NH_4Cl) y bajas de nitrato (50 mmolL^{-1} de NaNO_3) se observó una tendencia a la disminución significativa de concentraciones al final de los experimentos. En algunos de estos sistemas en donde se adicionó amonio, gran parte del nutriente agregado fue consumido durante el periodo de incubación, registrándose cambios netos negativos que se pueden considerar elevados (p.e. $-4,702 \text{ mmolNL}^{-1}\text{h}^{-1}$). Es factible pensar que cada uno de los organismos que conforman la comunidad planctónica al encontrarse con deficiencia de NID, con relación al PID disponible, aproveche cualquier suministro de este nutriente con el fin de optimizar sus procesos metabólicos y fisiológicos. Asimismo, este consumo elevado en un periodo de tiempo corto, puede ser atribuible a que se ha reportado que células menores de 3

mm son más rápidas para tomar y asimilar nutrientes que células de mayor tamaño (**Brenfang y Takahashi**, 1983). De hecho, se ha reportado que la comunidad planctónica de la desembocadura del río Sevilla al igual que el centro de la CGSM está dominada por células bacterianas con una abundancia de entre $20\text{-}50 \times 10^6 \text{ cel/ml}$ (**Gocke et al.**, 2003b) y fitoplancton (de 0.2-2mm) principalmente cianofitas (**Gocke et al.**, 2003a), las cuales a su vez incrementan su abundancia en la época seca entre marzo-abril a $\sim 415 \times 10^6 \text{ cel/ml}$ (**De la Hoz**, 2004). Si bien, este alto consumo de N puede ser atribuible principalmente al fitoplancton, no podemos descartar que las bacterias nitrificantes puedan estar oxidando amonio a nitrato y aunque dicha actividad puede ser inhibida por la luz, se ha descrito que tal efecto es menor en ambientes estuarinos (**Ward**, 2000). Estos resultados, también dan indicios de que la producción de “amonio regenerado” a través de procesos heterotróficos, no alcanza a satisfacer los requerimientos fisiológicos del fitoplancton y quizá de las bacterias nitrificantes, a pesar que se han reportado las más altas tasas de producción secundaria ($37.5 \mu\text{gC/l/h}$) y de respiración bacteriana (49% de la respiración de la comunidad planctónica) en la desembocadura del Río Sevilla en época seca (**Gocke et al.** 2003b). Sin embargo, se deben tener en cuenta los efectos de realizar experimentos en botellas, lo cual puede determinar cambios en los sustratos disponibles y perturbar los flujos de nutrientes para la comunidad planctónica, respecto de lo que se espera observar *in situ*.

Aparentemente, en las condiciones mostradas al inicio de las incubaciones, la comunidad planctónica de la CGSM prefiere tomar amonio más que nitrato. Cuando se adicionó este último ion a los sistemas experimentales, los cambios netos en las concentraciones se diferenciaron significativamente respecto a los tratamientos control solo cuando se adicionaron nitratos a baja concentración junto con ortofosfatos; no obstante, sus cambios netos fueron de menor magnitud que los registrados con el amonio. Este suceso podría explicarse al relacionar varios aspectos. Primero, aunque los organismos planctónicos pueden utilizar diferentes compuestos inorgánicos disueltos nitrogenados, el amonio, al ser una forma reducida, confiere ventajas energéticas a los organismos, al no gastar energía en la biosíntesis de enzimas que reducen formas oxidadas en metabolitos aprovechables como si se hace con el nitrato (**Eppley et al.**, 1969). Segundo, las tasas de toma de cada uno de estos iones pueden ser diferentes debido a que el amonio entra a las células por medio de difusión o transporte activo secundario, mientras que el nitrato por transporte activo primario (**Wheeler**, 1983). Tercero, en algunos trabajos se ha determinado que células fitoplanctónicas

de mayor tamaño tienen preferencia por toma de nitrato (**Harrison**, 1983) y en la CGSM la abundancia relativa de fitoplancton de mayor tamaño, p.e. diatomeas y dinoflagelados, es reducida respecto a las cianofitas las cuales abarcan $>90\%$ de la abundancia en la CGSM (**De La Hoz**, 2002, **De la Hoz**, 2004). Y cuarto, algunos trabajos realizados en áreas costeras reportan efecto de inhibición sobre la comunidad planctónica en experimentos de adición de nitrato (**Smith**, 2006), así como inhibición de la actividad fotosintética del fitoplancton ante la adición de nutrientes, como fue también observado en la Ciénaga de Pajalar y río Fundación, atribuido posiblemente a estrés fisiológico. (**Vega**, 2002).

Es así como el amonio se puede considerar como un ion importante para el sostenimiento de la producción primaria en la CGSM, dado que se observó un leve incremento en la PPN con su adición. Resultados similares han sido observados recientemente en el Complejo Pajarales, el cual hace parte de la CGSM, donde se reporta que aumentos significativos en la producción primaria neta fueron impulsados principalmente por el amonio (**Rodríguez-Chila et al.**, 2009). Sin embargo, los resultados también sugieren que los procesos de nitrificación probablemente estén jugando un papel importante dentro de la utilización del amonio y producción de nitrato lo que explicaría en parte las mayores tasas de consumo observadas en la columna de agua ante la adición de altas concentraciones de amonio más que de nitrato, este último al parecer, es poco requerido por el fitoplancton dominante y por las bacterias heterotróficas. Por lo tanto, la adición de uno u otro nutriente no se refleja directamente en una alta PPN.

La CGSM es un ecosistema que se ha caracterizado por presentar en la columna de agua bajas proporciones N:P inorgánico disuelto, con notables variaciones inter e intra- anuales (INVEMAR, 2006) muy por debajo de los requerimientos planteados por Redfield de 16:1 molar para los organismos fitoplanctónicos. Debido a que estos iones son las formas principales en que los productores primarios asimilan sus demandas nutricionales y que el NID en este ecosistema se encuentra en bajas concentraciones relativas a las del fósforo, y que además se ha presentado una tendencia a la baja de los nutrientes inorgánicos disueltos en la última década para el área de estudio, sobre todo en los niveles de nitratos y de fosfatos que pasaron de entre $33\text{-}64 \text{ mgNL}^{-1}$ (1996-1997) a $5\text{-}20 \text{ mgNL}^{-1}$ (2006) y de $68\text{-}264 \text{ mgPL}^{-1}$ (1996-1997) a $10\text{-}100 \text{ mgPL}^{-1}$ (2006) respectivamente, y en menor medida del amonio que paso de $21\text{-}43 \text{ mgNL}^{-1}$ (1996-1997) a $10\text{-}100 \text{ mgNL}^{-1}$ (2006), lo que hace pensar que la producción primaria fitoplanctónica podría estar siendo limitada por nitrógeno inorgánico. En este

sentido, se ha propuesto que si un nutriente determinado es adicionado en la columna de agua y la PPN se incrementa, el sistema es considerado como limitado por este nutriente. Gran parte de modelos empíricos en donde se ha relacionado la biomasa fitoplanctónica y productividad en ecosistemas marinos han mostrado una fuerte correlación entre producción primaria y disponibilidad de nitrógeno (Smith, 2006). Aunque sólo en uno de los experimentos llevados a cabo con suministro de NID se observó incrementos significativos en las tasas de PPN, existe una tendencia a que la adición de NID incrementa la absorción neta de los iones adicionados. Respecto a la disminución en las tasas de PPN, Lean y Pick (1981) plantean que después de la adición de un nutriente que se encuentra en concentraciones muy bajas, puede haber competencia por ATP y agentes reductores entre la toma de nutrientes y la fotosíntesis. Asimismo, se ha demostrado que el metabolismo está dirigido primero hacia la toma de nutrientes y asimilación y luego a la conversión de carbón almacenado en constituyentes necesarios para sostener el incremento en el crecimiento (Healey, 1979) y que factores como la sucesión de tipos de fitoplancton adaptados a diferentes necesidades nutricionales y el control de la biomasa del fitoplancton por la herbivoría pueden incidir en la falta de correlación entre adición de nutrientes e incremento en la PPN (Zea *et al.*, 1998). Aunque se ha propuesto que la escala de tiempo fisiológico para la utilización de N por parte del fitoplancton es del orden de minutos o menos (Harrison, 1983), es posible que, en este tipo de experimentos, el tiempo de incubación se deba prolongar para poder obtener resultados en las respuestas fotosintéticas por parte de estos organismos. Por lo tanto, debido a que las mediciones se realizaron después de 4 horas de la adición de nutrientes, las reducciones o ningún cambio significativo de PPN en algunos experimentos con suministro de N, pueden atribuirse a estos factores que producen disminuciones y retrasos en el incremento de las tasas fotosintéticas por lo cual se debe optimizar el tiempo del análisis y reducir las variables ambientales para poder analizar la respuesta de los organismos fitoplanctónicos en este tipo de ensayos.

En síntesis, se puede decir que el análisis de los cambios netos de concentración de nutrientes inorgánicos disueltos, nitrógeno y fósforo, fueron una herramienta útil para analizar la variación de dichos compuestos en la columna de agua. Para este caso, se trabajó con la comunidad planctónica de la desembocadura del Rio Sevilla, un área que comparte muchas características físico-químicas (salinidad, alcalinidad, % saturación de oxígeno, pH) y biológicas (concentración de Clorofila a, composición fitoplanctónica, respiración planctónica y actividad

heterotrófica) con el área central de la CGSM (Gocke *et al.*, 2003a, Gocke *et al.*, 2003b, De la Hoz, 2004), lo cual nos permite extrapolar en parte, nuestros resultados al complejo lagunar, sin embargo, debemos tener en cuenta la alta variabilidad intra e interanual que se observa en esta laguna y la complejidad de interacción entre los componentes bióticos y abióticos y entre los procesos metabólicos que se ven involucrados, lo que determina que los resultados encontrados presenten gran variabilidad y que no se pueda establecer un patrón definido, además que, corresponden a unas características específicas encontradas en un momento dado. No obstante, los resultados indican que la tendencia de los organismos que constituyen el plancton en esta área de la CGSM es la de aprovechar cualquier suministro de nutrientes inorgánicos presente en la columna de agua, lo cual se ve reflejado por el incremento significativo en los cambios netos negativos, en este caso, principalmente para la toma del amonio, aunque no se refleje siempre de inmediato en un aumento de la producción primaria. Además, hay que tener en cuenta que probablemente tal comportamiento se mantiene en diferentes áreas de la CGSM años después de la apertura de los canales, dado que se ha reportado recientemente que el NID podría estar limitando la PP en la columna de agua del complejo Pajarales (Rodríguez-Chila, 2009), sin embargo, para poder establecer una tendencia en el comportamiento de la comunidad planctónica sería necesario realizar un monitoreo continuo que tenga en cuenta la variabilidad espacio-temporal de los factores físico-químicos y biológicos que inciden directamente en los procesos metabólicos de la comunidad autotrófica y heterotrófica, así como en su acoplamiento en esta laguna costera tropical.

Agradecimientos

Este trabajo hace parte del proyecto “Procesos Reguladores de la Producción Biológica en Lagunas Costeras Tropicales”, financiado por el Fondo Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y Tecnología – COLCIENCIAS (Cod. 1101-09-031-93), por la Universidad Nacional de Colombia (CINDEC) y por el Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras – INVEMAR. Sinceros agradecimientos a los profesores Néstor Campos y Gabriel Guillot por su contribución y apoyo y a los demás investigadores del proyecto.

Bibliografía

- Brenfang, P.K. y M. Takahashi. 1983. Ultraplankton growth rates in a subtropical ecosystem. *Mar. Biol.*, **76**: 213-218.
- Corner, J.B. y B.A. Biddanda. 2002. Small players, large role: microbial influence on biogeochemical in pelagic aquatic ecosystems. *Ecosystems*, **5**: 105-121.

- De La Hoz, M.V.** 2002. Estructura de la comunidad fitoplanctónica de la Ciénaga Grande de Santa Marta para el año 1996-1997. Informe final, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Santa Marta. 86 Págs.
- _____, **M.V.** 2004. Dinámica del fitoplancton de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost* **33**:159-179.
- Doering, P.H., C.A. Oviatt, B.L. Nowicki, E.G. Klos y L.W. Reed.** 1995. Phosphorous and nitrogen limitation of primary production in a simulated estuarine gradient. *Mar. Ecol. Prog. Ser* **124**: 271-287
- Eppley, R.V., J.L. Coatworth y L. Solorzano.** 1969. Studies of nitrate reductase in marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr* **24**: 495-509.
- Gocke, K.** 1987. Manual para determinar los procesos de producción y degradación en biotopos marinos, especialmente en lagunas costeras y manglares. Mimeógrafo en la biblioteca del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras INVEMAR. Santa Marta, Colombia. 56 pp.
- Gocke, K., J.E. Mancera-Pineda, L.A. Vidal y D. Fonseca.** 2003a. Planktonic primary production and community respiration in several coastal lagoons of the outer delta of the rio Magdalena, Colombia. *Bol. Invest. Mar. Cost* **32**:125-144.
- _____, **A. Vallejo.** 2003b. Heterotrophic microbial activity and organic matter degradation in coastal lagoons of Colombia. *Rev.Biol.Trop* **51**(1):85-98.
- Harrison, W.G.** 1983. The time-course of uptake of inorganic and organic nitrogen compounds by phytoplankton from the Eastern Canadian Arctic: A comparison with temperate and tropical populations. *Limnol. Oceanogr* **28** (6): 1231-1237.
- Healey, F.P.** 1979. Short-term responses of nutrient deficient algae to nutrient addition. *J. Phycol* **15**: 289-299.
- Hernández, C.A. y K. Gocke.** 1990. Productividad primaria en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *An. Inst. Invest. Mar. Punta de Betín* **19-20**: 101-119.
- _____, **y G.E. Márquez.** 1991. Producción primaria en el ecosistema Ciénaga Grande de Santa Marta, laguna costera del caribe colombiano. *Trianea* **4**: 385-407.
- Howart, R.W.** 1988. Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Ann. Rev. Ecol* **19**: 89-110.
- INVEMAR.** 2003, Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales de las comunidades vegetales y de los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe Técnico final 2003. INVEMAR, Santa Marta, Colombia, 73 p.
- _____. 2004. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe 2004. INVEMAR, Santa Marta, Colombia. 106 p.
- _____. 2005. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe Final 2005. INVEMAR, Santa Marta, Colombia. 108 p.
- _____. 2006. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y de recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe Final 2006. INVEMAR, Santa Marta, Colombia. 103 p.
- Knoppers, B.** 1994. Aquatic primary production in coastal lagoons. En: Kjerfve, B. (Ed.). *Coastal lagoon processes*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. Pág. 243-286.
- Lean, D.R.S. y F.R. Pick.** 1981. Photosynthetic response of lake plankton to nutrient enrichment: A test for nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr* **26**(6): 1001-1019.
- Paerl, H.W. y J.L.Pinckney.** 1996. A mini-review of microbial consortia: their roles in aquatic production and biogeochemical cycling. *Microb. Ecol* **31**: 225-247.
- Parsons, T.R., M.Takahashi y B.Hargrave.** 1984. *Biological oceanographic processes*. Pergamon Press, Oxford 330 pp.
- Rodríguez-Chila, J.D., J.E. Mancera-Pineda y H.J. López-Salgado.** 2009. Efectos de la recomunicación del Río Magdalena con su antigua Delta: cambios en la producción primaria fitoplanctónica y respiración en el complejo Pajarales, 1989 A 2005. *Bol. Invest. Mar. Cost* **38**(2):119-144.
- Sánchez, R.M.** 1998. Metabolismo del nitrógeno y fósforo en la columna de agua y su relación con la producción fitoplanctónica en una laguna costera tropical (Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano). Tesis de grado Magister Scientiae en Biología. Universidad Nacional de Colombia-INVEMAR. Bogotá, 95 pp.
- _____, **y S. Zea.** 2000. Metabolismo de nitrógeno y fósforo inorgánicos disueltos en la columna de Agua en una Laguna Costera Tropical (Caribe Colombiano). *Carib. J. Sci* **36**(1-2): 127-140.
- Smith, V.H.** 2006. Responses of estuarine and coastal marine phytoplankton to nitrogen and phosphorus enrichment. *Limnol. Oceanogr* **51**(1, part 2): 377-384.
- Vega, D.** 2002. Efectos del enriquecimiento con nitrógeno y fósforo sobre el metabolismo de la comunidad fitoplanctónica en la Ciénaga de Pajarales y Río Fundación, Caribe Colombiano. Tesis Biología. Universidad del Magdalena, Santa Marta, 60 p.
- Ward, B.** 2000. Nitrification and the marine nitrogen cycle. En Kirchman D.L. (Eds). *Microbial ecology of the oceans*. Pp: 427-449.
- Wheeler, P.A.** 1983. Phytoplankton nitrogen metabolism. En Carpenter E.J. y D.G Capone. (Eds.). *Nitrogen in the marine environment*. Academic press, INC. New York. pp: 309-346.
- _____, **y D.L. Kirchman.** 1986. Utilization of inorganic and organic nitrogen by bacteria in marine systems. *Limnol. Oceanogr* **31**(5): 998-1009.
- Zea, S., R. Giraldo H., J.E. Mancera y J. Martínez-C.** 1998. Relaciones contemporáneas y rezagadas entre variables físico-químicas y biológicas en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe Colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost* **27**: 67-85.

Recibido: febrero 9 de 2010.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

MARIPOSAS (LEPIDOPTERA: HESPERIOIDEA - PAPILIONOIDEA) DE LAS ÁREAS CIRCUNDANTES A LAS CIÉNAGAS DEL DEPARTAMENTO DE CÓRDOBA, COLOMBIA

Lina R. Campos-Salazar¹, Jimena Gómez Bulla², M. Gonzalo Andrade-C.³

Resumen

Campos-Salazar, L.R., J. Gómez Bulla, M. Gonzalo Andrade-C.: Mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea - Papilionoidea) de las áreas circundantes a las Ciénagas del Departamento de Córdoba, Colombia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 45-60, 2011. ISSN 0370-3908.

Se registraron 51 especies de mariposas, pertenecientes a seis familias y 17 subfamilias en las ciénagas de Córdoba y zonas adyacentes. Se registraron por primera vez para el Caribe colombiano las especies *Pseudolycaena marsyas*, *Zaretis itis* y *Phocides polybius polybius*. El complejo de humedales del río San Jorge presentó un mayor número de especies frente al complejo del Sinú (Lorica y Martinica). Se elaboró una lista de 211 especies que incluye las especies encontradas en Córdoba y en las ciénagas del Cesar: Zapatosa (98), Mata de Palma–la Pachita (66) y la Jagua de Ibirico (85). Se destaca que las ciénagas de Córdoba mostraron altos patrones de afinidad (50% de especies compartidas), mientras que en la llanura del Caribe (Jagua de Ibirico), encontramos valores cercanos al máximo de valor de disimilitud, uno.

Palabras clave: mariposas, humedales, biodiversidad, conservación, Córdoba, Colombia.

Abstract

51 species of butterflies, belonging to six families and 17 subfamilies, were found in Córdoba's wetlands and adjacent areas. The species *Pseudolycaena marsyas*, *Zaretis itis* and *Phocides polybius polybius* are registered for the first time in the Caribbean area. The wetland complex of the San Jorge river has a higher number of species in comparison with the Sinu complex (Lorica and Martinica). A list of 211 species was elaborated including the species found in Córdoba and the

¹ Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Correo electrónico linacamp@gmail.com

² Museo de Historia Natural de Paris. Correo electrónico: jimenopectera@gmail.com

³ Profesor Asociado, Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 30 No. 45 – 03 Edificio 425 oficina 207, Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: mgandradec@unal.edu.co

species of Cesar's wetlands: Zapatosa (98) and Mata de Palma, the Pachita (66) and La Jagua de Ibirico (85). We emphasize that the Córdoba's wetlands show high affinity patterns (50% of shared species), while in the Caribbean swamps (Jagua de Ibirico), we found values approaching the maximum value of dissimilarity.

Key words: butterflies, wetlands, biodiversity, conservation, Córdoba, Colombia.

Introducción

El complejo de ciénagas de Córdoba, en las cuencas del río San Jorge y Sinú, abarca una gran extensión de espejos de agua (110.000 hectáreas). Las ciénagas de Ayapel (40.000 hectáreas), ciénaga Grande de Lorica (38.000 hectáreas), Betancí (3.250 hectáreas), Martinica (2.000 hectáreas), El Arcial (2.000 hectáreas), El Porro (1.500 hectáreas) y Cintura (1.000 hectáreas), contribuyen al mantenimiento de diferentes ecosistemas y tipos de vegetación que dependen directa o indirectamente de estos ambientes acuáticos. (Cárdenas-Arévalo *et al.* 2010). Adicionalmente constituyen la única fuente de agua potable para los habitantes de la región.

Las diferentes actividades antrópicas ligadas a los complejos de humedales: pesca artesanal, Cultivos agrícolas semestrales (arroz *Oryza sativa*) en porciones de terrenos seminundables, desecación de terrenos para uso en la ganadería extensiva, tala de las áreas circundantes, entre otros; han causado cambios drásticos en la dinámica del agua y en la función biológica que cumplen estos ambientes acuáticos en las áreas del valle del río Sinú, San Jorge y sus llanuras inundables. Estos procesos han degradado y alterado la composición vegetal y en consecuencia, alterado la estructura de la comunidad faunística, entre ellas las mariposas pertenecientes a estas dos grandes superfamilias (Hesperioidea y Papilionoidea), son uno de los grupos que mejor pueden reflejar estos cambios, así mismo responder a las características ambientales y su adaptación a los hábitat disponibles (Fagua, 1996; Fagua *et al.* 1999). Es por esto que articular trabajos de vegetación y de grupos faunísticos como las mariposas y otras especies capaces de reflejar el estado de conservación de los ecosistemas, se convierte en una herramienta importante en el establecimiento de planes de manejo y conservación de hábitats (Coddington *et al.* 1991).

En los trópicos de América la diversidad de lepidópteros alcanza 180.000 especies, de las cuales 17.950 son mariposas diurnas (Andrade-C., 2007). Para Colombia, se registran 3.274 de las cuales 350 son endémicas. En el presente estudio se obtuvieron datos importantes sobre las especies de mariposas de las ciénagas de Córdoba y sus áreas de influencia, ya que estas aportan un número signifi-

ficativo de especies a la fauna de mariposas del Caribe Colombiano y que, hasta la fecha no se tenían registros que ampliaran los rangos de distribución para Colombia de las especies presentes. Se incluyen además, datos sobre la diversidad al interior de las ciénagas que conforman este complejo, y una comparación de la composición y riqueza del complejo de ciénagas de Córdoba con las ciénagas del Cesar y áreas de las llanuras en el Caribe como La Jagua de Ibirico en el Cesar, obtenidos en estudios precedentes.

Métodos

Área de estudio

El trabajo se desarrolló en el nor-orienté del departamento de Córdoba, en los alrededores del complejo de humedales del valle inundable del río San Jorge, en altitudes comprendidas entre los 40 y 100 metros. Se efectuaron salidas de campo a varias localidades de la ciénaga de Ayapel en el municipio del mismo nombre, y las ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura en el municipio de Pueblo Nuevo, estas tres últimas ciénagas se tomaron como una unidad, por su cercanía e interconexión. Otra parte del estudio incluyó el complejo de ciénagas y llanuras de inundación que hacen parte del valle del río Sinú, este sistema lagunar presenta dos áreas importantes: Betancí y Montería, ubicadas en el municipio de Montería y la ciénaga Grande de Lorica en el municipio del mismo nombre. En la ciénaga de Ayapel, las colectas se realizaron en cinco localidades, La Balsa, La Ceja, La Cucharita, La Escobilla y Playa Blanca, entre los meses de abril y marzo del 2004. En las ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura las localidades estudiadas fueron ocho, hacienda Praga, hacienda Toronto, vereda La Coroza en la hacienda La Baqueta, inmediaciones del corregimiento Arcial, sector Playón de Cintura, corregimiento Café Pisaó en la hacienda La María, corregimiento el Porro, en la hacienda La Embajada y en la parcela de La Aranza, en sector anexo a la ciénaga el Porro, en el mes de julio del mismo año. En las ciénagas del valle del río Sinú los muestreos se realizaron en el sector La Isla, Abisnia (ITA), Cubinca (ciénaga de Lorica), sitio el Tiestico (ciénaga de Lorica), sitio La Peinada (ciénaga de Lorica), Corregimiento el Sillón (ciénaga de Lorica), San Sebastián

(ciénaga de Lorica), vereda de Martinica (Ciénaga de Martinica), entrada al caserío de Martinica, hacienda Diluvio (Ciénaga de Martinica), corregimiento Betanci, en la margen de la ciénaga, margen izquierda del poblado y en las inmediaciones Escuela Mixta Maracayo, en los meses de julio-noviembre y diciembre de 2004.

Descripción de los ambientes adyacentes de las ciénagas

La vegetación que circunda los complejos de las ciénagas pertenecen a Bosque Seco Tropical, donde se puede encontrar vegetación de tipo arbórea y arbustiva, dispersa o formando pequeños parches con diferentes grados de conservación por lo cual es posible encontrar desde áreas bien conservadas hasta sectores con relictos de formaciones originales (Rivera-Díaz, 2010). En las localidades pertenecientes al complejo de humedales del río San Jorge, son predominantes las intervenciones de tipo antrópico, que corresponden a las actividades de entresaca, tala y pastoreo; esta disposición del uso del suelo evidencia la ausencia de coberturas vegetales que incentiven la regeneración natural del bosque (Rangel et al. 2010). En

general el complejo de ciénagas de San Jorge (Arcial-El porro y Cintura) presenta aún fragmentos grandes de bosques (Cárdenas-Arévalo et al. 2010). En contraste el complejo cenagoso del bajo Sinú, presenta una vegetación típica de bosque seco tropical, caracterizado por áreas destinadas a las prácticas agroforestales y pecuarias que han dado origen a áreas más homogéneas dominadas por potreros y pequeños relictos de bosque muy intervenidos que parecen comportarse como ecotonos por su tamaño (Cárdenas-Arévalo et al. 2010).

Diseño de colecta

Para cada una de estas localidades se dedicó un día de colecta, en las cuales se recorrieron transectos lineales de 100 x 2 m en zonas de bosque y borde de bosque; se usó la técnica de captura con jama entomológica y trampas Van Someren Rydoncon cebo (pescado descompuesto) que se instalaban en la mañana y se recogían en horas de la tarde. La totalidad del esfuerzo de muestreo se realizó durante las horas del día (09:00-16:00) realizando la mayor cantidad de recorridos posible. Para cada ciénaga el esfuerzo de muestreo fue de siete horas/hombre/día, abarcando

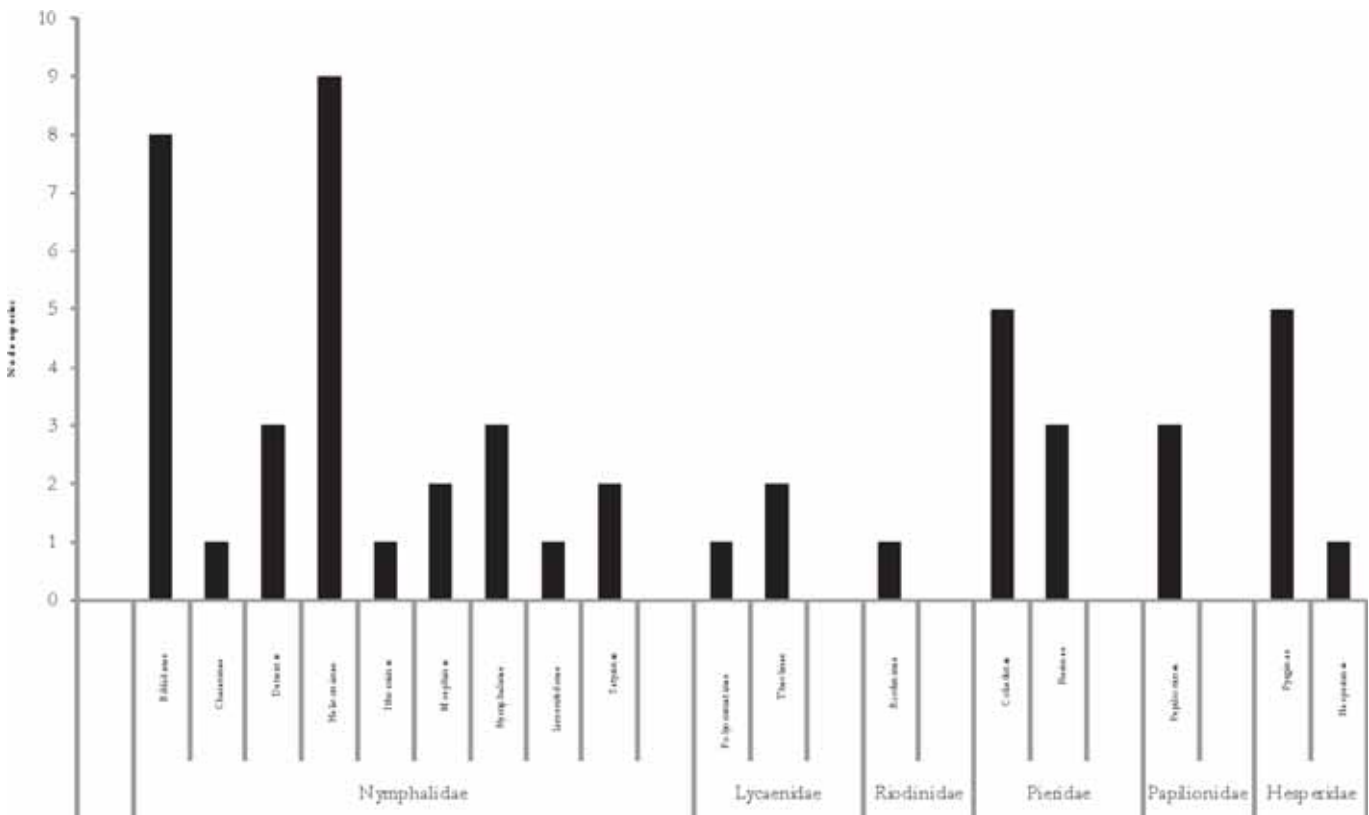


Figura 1. Riqueza de especies para cada unas de las familias y subfamilias presentes en el complejo de ciénagas de Córdoba.

homogéneamente cada unidad de vegetación. Los muestreos incluyeron diferentes unidades vegetales como: bosques con diferentes estados de intervención y conservación (bosque seco tropical), áreas abiertas, pastizales, cercas vivas, potreros, rastrojos y bosques inundables. Los ejemplares fueron sacrificados por presión digital en el tórax y depositados en sobres de papel milano blanco con los datos de colecta (localidad, sitio, fecha, colector, altitud), se anotaron datos de observaciones de las plantas hospederas, las horas de actividad y zonas donde fueron encontradas; una vez los ejemplares llegaron al laboratorio, se procedió a realizar su extendido, montaje, etiquetado, catalogación y determinación por medio de claves e ilustraciones, siguiendo a **Adams**(1985), **Le Crom et al.** (2004) y **DeVries**(1987,1988). Se utilizó la revisión taxonómica editada por **Lamas et al.** (2004) y la referencia de la colección del Instituto de Ciencias Naturales de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá (**ICN-MHN-L**) para la identificación taxonómica.

Análisis de datos

Los datos de riqueza se generaron a partir del número total de especies presentes para cada localidad de estudio. Los datos de abundancia fueron tomados como el número de individuos para cada especie, (Anexo 1). Se determinó la riqueza específica con el índice de Margalef que presupone una relación funcional entre el número de especies y el número total de individuos, y se obtuvo la equitatividad por medio del índice de Shannon-Wiener que expresa la uniformidad de los valores de importancia a través de todas las especies de la muestra (**Magurran**, 1988). En el análisis comparativo de cada una de las ciénagas construida a partir de los datos de diversidad (Shannon-Wiener), se utilizó la grafica de cajas y bigotes que representa la distribución estadística unidimensional que refleja cinco parámetros: límite inferior, primer cuartil, mediana, tercer cuartil y límite superior; siendo una medida de la simetría o asimetría de la distribución, del sesgo y de la dispersión de los datos (**Sokal & Rolf**, 1985). Mediante un análisis de varianza se contrastaron los resultados de estos índices de diversidad de especies dentro de las ciénagas, con el fin de comparar las medias de las diversidades y verificar si las diferencias numéricas son significativas (**Magurran**, 1988). Para medir la diversidad Beta, se realizó un análisis de similitud y complementariedad de la composición de especies entre el complejo de ciénagas de Córdoba, a partir de la riqueza total y las especies comunes entre las ciénagas comparadas, empleando los datos de presencia/ausencia para hacer las combinaciones en pares de biotas (**Cowell & Coddington**, 1994), en este caso mientras más disímiles son las localidades compara-

das el valor se acerca más a uno (**Moreno**, 2001). Adicionalmente, se realizó una comparación nominal y porcentual de la lista de las especies de mariposas registradas en este trabajo frente a las listas de especies reportadas en otros estudios de las ciénagas del Caribe colombiano, tal como en la ciénaga de Zapatosa, municipio de Chimichagua, departamento de Cesar (**Pulido-B.**, 2008), ciénagas de Mata de Palma y La Pachita, municipio El Paso, departamento del Cesar (**Pulido-B.**, 2008) al igual que las especies del municipio de la Jagua de Ibirico, en el departamento del Cesar (**Pulido-B.**, 2008), presentes en áreas cenagosas o en áreas planas del Caribe. Para esto se tomaron como una localidad los sectores del valle inundable del río San Jorge (ciénaga de Ayapel y las ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura), y como otra localidad las que hacen parte del valle del río Sinú (ciénagas de Lórica, Martinica y Betanci).

Resultados

Para el complejo de ciénagas de Córdoba se encontraron 215 individuos pertenecientes a 51 especies, 17 subfamilias y seis familias; Hesperidae (dos subfamilias, seis géneros), Papilionidae (una subfamilia, dos géneros), Pieridae (dos subfamilias, seis géneros), Riodinidae (una subfamilia, un género), Lycaenidae (dos subfamilias, tres géneros) y Nymphalidae (nueve subfamilias, 21 géneros) (Anexo 1). **Figura 1.** Riqueza de especies para cada una de las familias y subfamilias presentes en el complejo de ciénagas de Córdoba.

La subfamilia Heliconiinae es la que presentó el mayor número de especies (ocho) y géneros (seis), con igual número de especies Biblidinae con ocho y cinco géneros, Nymphalinae y Danainae con igual número de especies (tres) y con dos y un géneros respectivamente; las subfamilias Charaxinae, Ithomiinae y Limenitidinae solo estuvieron representadas por una sola especie en cada caso (Figura 1, Anexo 1). Las ciénagas de Ayapel y Betanci presentaron la mayor riqueza de especies con igual número 23, seguida por la ciénaga grande de Lórica con 22, las ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura con 21, mientras que la ciénaga de Martinica presenta la menor riqueza, 17 especies (Anexo 1, Figura 2).

El sistema de humedales del río San Jorge: Arcial. El Porro y Cintura presentó 21 especies pertenecientes a 11 subfamilias, donde Heliconiinae fue la subfamilia más rica (Figura 2). En la subfamilia Charaxinae las especies *Zarethis itis*, y en Biblidinae la especie *Callicore pitheas* fueron los dos únicos registros para las ciénagas de Córdoba.

Se estableció en forma general que las ciénagas influenciadas por el río San Jorge presentaron un mayor número de especies frente a las del complejo del Sinú (Lorica y Martinica), sin embargo la ciénaga grande de Lorica, aumenta los valores de riqueza a partir de los registros de Nymphalinae con especies como *Anartia jatrophae*. Aunque Betanci iguala en número de especies a las presentadas por Ayapel (San Jorge) debido en gran medida a especies de Heliconiinae como *Heliconius melpomene*, *Dryas iulia* y *Agraulis vanillae*.

Los análisis de diversidad, realizados a partir de los datos de riqueza y número de individuos para cada una de las ciénagas (Tabla 1), muestran que no existen diferencias estadísticamente significativas entre la diversidad de las ciénagas (índice de Shannon-Wiener: $F_{(4,101;0,05)} = 1,31$; $p = 0,27$).

Los valores de diversidad por ciénagas no presentaron diferencia estadística, debido a que la dispersión de los datos claramente se sobrepone entre sí (Figura 3). La me-

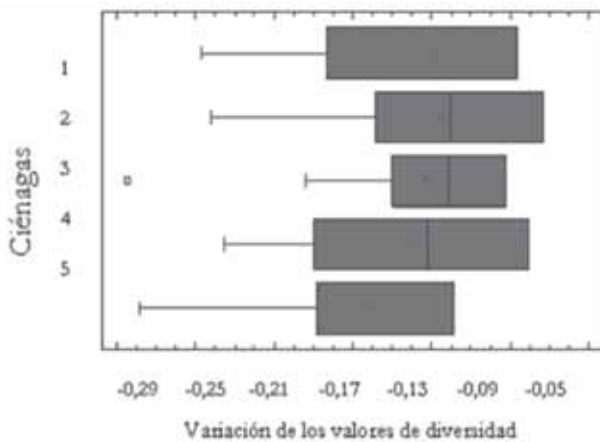


Figura 3. Diagrama de cajas y bigotes, donde se muestra la variación de los valores del índice de diversidad de Shannon-Wiener para las ciénagas de Córdoba, 1. Arcial, El Porro y Cintura, 2. Ayapel, 3. Betanci, 4. Lorica, 5. Martinica.

dia de la diversidad para cada sitio de muestreo en cuanto a la composición de especies, expresan un patrón de uniformidad similar (Tabla 1).

Tabla 1. Índices de diversidad para el complejo de ciénagas de Córdoba; 1. Ayapel, 2. Grande de Lorica, 3. De Martinica, 4. Betanci y 5. Arcial y Porro y Cintura.

Índices	1	2	3	4	5
Shannon-Wiener	2,99	2,84	2,72	2,93	2,97
Margalef	5,49	5,42	4,80	5,96	5,29
Uniformidad	0,75	0,73	0,82	0,79	0,78

De acuerdo con los valores de complementariedad y las especies encontradas en los diferentes sitios, se estableció una baja afinidad en la similitud y composición de los ensamblajes de especies; además se encontró que entre Lorica-Arcial, El Porro y Cintura se presentó la mayor disimilitud, seguida por Martinica-Arcial, El Porro y Cintura y Ayapel-Arcial, El Porro y Cintura, con igual proporción de especies compartidas; en cuanto a Lorica y Betanci son los que comparten la mayor proporción de especies (Tabla 2).

Entre Lorica-Arcial, El Porro y Cintura, y entre Ayapel-Arcial, El Porro y Cintura, se presentaron el más alto número de especies únicas 31 y 30 respectivamente, en cuanto a Lorica-Martinica y Lorica-Betanci, presentaron los más bajos valores de especies únicas, 19 cada una de ellas, seguidas por Martinica-Betanci con 18 especies compartidas (Tabla 2).

En Ayapel, se registró como especies únicas individuos de *Polites vibex*, *Phocides polibius polybius*, *Heliconius erato*, *Caligo illioneus oberon* y *Adelpha iphichlus iphichlus*, siendo exclusivas para ésta ciénaga, mientras que *Chioides catillus*, *Leptotes cassius*, y *Nica flavilla* se presentaron como especies únicas para Betanci (Anexo 1). *Arawacus oetolus* y *Anartia amatheas* solo se presentaron en Lorica; mientras que Arcial, El Porro y Cintura presenta-

Tabla 2. Índice de complementariedad y porcentaje de especies compartidas entre las ciénagas de Córdoba.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Núm. especies compartidas	12	9	10	7	10	13	6	11	6	9
Núm. especies total entre localidades	33	31	36	37	29	32	37	29	32	35
Núm. especies únicas	21	22	26	30	19	19	31	18	26	26
% especies compartidas	36,4	29,0	27,8	18,9	34,5	40,6	16,2	37,9	18,8	25,7
Complementariedad entre sitios	0,64	0,71	0,72	0,81	0,66	0,59	0,84	0,62	0,81	0,74

1. Ayapel-Lorica, 2. Ayapel-Martinica, 3. Ayapel-Betanci, 4. Ayapel-Arcial, El Porro y Cintura, 5. Lorica-Martinica, 6. Lorica-Betanci, 7. Lorica-Arcial, El Porro y Cintura, 8. Martinica-Betanci, 9. Martinica-Arcial, El Porro y Cintura, 10. Betanci-Arcial, El Porro y Cintura.

ron el mayor número de especies únicas, entre las que se encuentran *Morpho helenor peleides*, *Marpesia alcibiades*, *Zarethis itis*, *Battus polydamas* y *Theope virgilius* (único ejemplar de la familia Riodinidae colectado en el estudio); entre tanto Martinica registró el menor número de especies (17), de las cuales *Danaus plexippus* y *Heraclides thoas* fueron especies únicas para la localidad.

Al contrastar las especies halladas en las ciénagas de Córdoba con otras regiones del Caribe, se encuentra un total de 211 especies, asociadas a áreas de ciénagas y llanuras del Caribe, el mayor número de especies la registra Zapatosa (98), seguido por La Jagua de Ibirico (85), y Mata e Palma (Cesar) (66), mientras que las ciénagas de Córdoba presentan bajos valores de riqueza (Anexo 2).

En general, entre las ciénagas muestran patrones de afinidad, mientras que se marcó una gran diferencia con la llanura del Caribe (Jagua de Ibirico); sin embargo, se resalta las diferencias de composición de especies entre las ciénagas de Córdoba y Cesar, el caso de Lorica-Martinica y Betanci con La Jagua de Ibirico con tan solo el 4,3% de especies compartidas, incluso presentando esta última el mayor número de especies únicas (110) (Tabla3).

La composición de especies entre las ciénagas de Córdoba son muy afines con el 50% de especies compartidas, estas dos áreas tienen la mayor similitud de especies, mientras que al compararlas con las especies presentes en la llanura de Caribe (La Jagua de Ibirico), se presentan valores que casi alcanzan el máximo valor de disimilitud (uno) (Tabla3).

Especies como *Dryadula phaetusa*, *Euptoieta hegesia*, *Heliconius erato hydara*, *Adelpha iphichlus iphichlus*, *Ascia monuste monuste* y *Theope virgilius* se presentan únicamente en áreas de ciénagas, sin que se encuentren para otros sitios de la llanura del Caribe, también sobresalen *Pseudolycaena marsyas*, *Phocides polybius polybius*, *Marpesia alcibiades* y *Caligo illioneus oberon* registrados para las ciénagas del valle del río San Jorge.

Se resalta la captura de *Mechanitis polymnia* único Ithomiinae que se registró en áreas aledañas a las ciénagas de Córdoba, sin que se haya sido registrado aun en las ciénagas del Cesar y llanuras del Caribe (Anexo 2). Para las ciénagas del valle del río Sinú, se capturaron *Nica flavilla*, *Heraclides anchisiades*, como especie única, así como *Pyrisitia proterpia* y *Hesperocharis nera*, únicas para éstas ciénagas (Figura 4 y Anexo 2).

Heliconiinae aparece como la subfamilia con mayor número de especies para las ciénagas de Córdoba por encima de las ciénagas de Zapatosa y Mata de Palma en el Cesar, mientras que Biblidinae aparece como la segunda subfamilia con mayor número de especies con respecto a Mata de Palma ya que Zapatosa registró un número más alto de especies en esta subfamilia (Figura 4). De igual forma Mata e Palma superan la riqueza de especies de Ayapel en Córdoba.

Discusión

En las ciénagas de Córdoba, se encontraron representadas las diferentes familias de mariposas tropicales. La familia Nymphalidae aportó el mayor número de géneros y especies, esto concuerda con la mayoría de los estudios realizados en Colombia ya que ésta familia presenta el mayor número de subfamilias y el mayor número de especies, por esta razón, las comparaciones a nivel de familias no aporta información diferencial. Sin embargo al interior del complejo de ciénagas influenciadas por el río San Jorge y el río Sinú se evidencian diferencias en la composición y la riqueza de especies.

La ciénaga de Ayapel registró el mayor número de especies, esto puede deberse en gran parte a una matriz mixta de vegetación. Se encontraron áreas bien demarcadas, fragmentos de bosque poco intervenidas como el bosque La Cucharita y áreas abiertas muy degradadas como el sector de Playa Blanca. En este sector se encontraron especies como *Polites vibex*, *Phocides polybius polybius* que prefieren las áreas abiertas. En las áreas de bosque La

Tabla 3. Comparación nominal de especies compartidas entre las ciénagas de Córdoba, Cesar y llanuras del Caribe colombiano¹, Ayapel-Arcial, El Porro y Cintura (Córdoba)², Lorica-Martinica y Betanci (Córdoba)³, Zapatosa (Cesar) (Pulido-B., 2008)⁴, Mata de Palma (Cesar) (Pulido-B., 2008)⁵, La Jagua de Ibirico (Cesar) (Pulido-B., 2008).

	1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	3-5	4-5
Núm. especies compartidas	24	18	18	6	17	15	5	42	12	6
Núm. especies total entre localidades	48	117	85	116	62	86	115	122	171	145
Núm. especies únicas	24	99	67	110	45	71	110	80	159	139
% especies compartidas	50,0	15,4	21,2	5,2	27,4	17,4	4,3	34,4	7,0	4,1

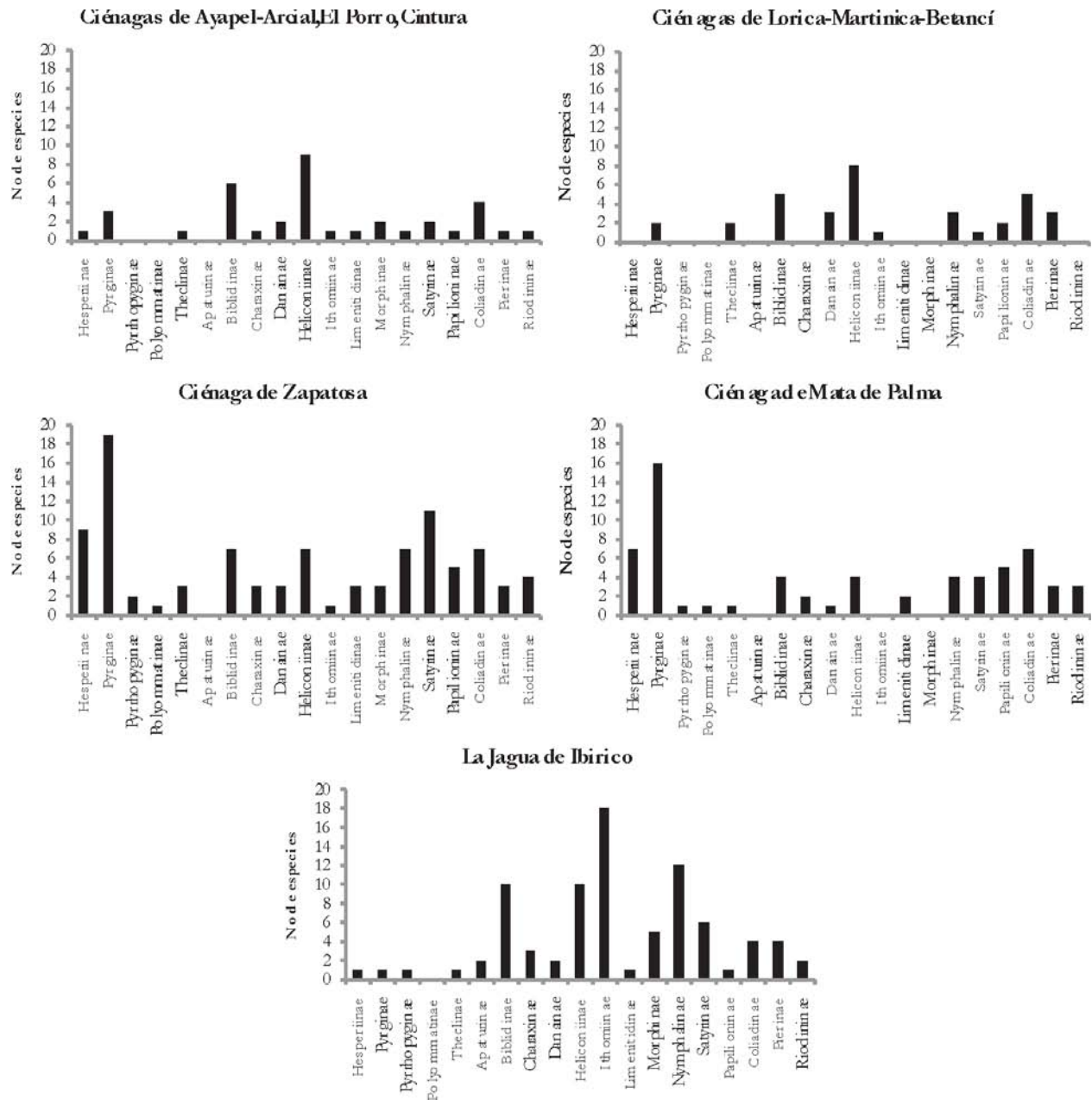


Figura 4. Número de especies por subfamilias presentes en las distintas localidades.

Cucharita se hallaron dos ejemplares de *Pseudolycaena marsyas* (macho y hembra), asociadas a áreas con abundante vegetación y presencia de claros, donde puede encontrar alimento fácilmente, este Lycaenidae es una especie de difícil captura, debido a aspectos ecológicos como la estacionalidad y preferencias por espacios abiertos sobre la copas de los árboles (De la Maza, 1987). Otras especies que aparecen como exclusivas para la ciénaga de Ayapel

son *Heliconius erato*, especie típica de áreas intervenidas y abiertas (Andrade-C. et al. 2007A), *Caligo illioneus oberon* y *Adelpha iphiclus iphiclus* asociados a bosques de ribera que aumentan la riqueza para esta ciénaga. El incremento en la heterogeneidad del hábitat y el acceso a fuentes de néctar en los márgenes del bosque o parches de vegetación en zonas despejadas facilitaron registro de especies de Theclinae y Limenitidinae, que normalmente

no abandonarían el dosel (**Raguso & Llorente, 1997**), así mismo de mariposas “saltarinas” pertenecientes a Pyrginae y Hesperinae que poseen cuerpo robusto y alas pequeñas que les otorgan un vuelo rápido, por lo que requieren de áreas abiertas e iluminadas al igual que una alta oferta de flores para desarrollar sus actividades (**Vélez, 1989**), estas se encuentran asociadas a sitios donde les es posible conseguir lugares de percha para recibir el sol y áreas despejadas para su potente vuelo (**Andrade-C. et al. 2007**).

En el sistema de humedales del río San Jorge: Arcial. El porro y Cintura, se encontraron especies como: *Zarethis itis*, *Callicore pitheas*, *Theope virgilius*, *Marpesia alcibiades* y *Taygetis laches* que además de aparecer como únicas para este complejo, toman importancia debido a que son poco colectadas y sus requerimientos de hábitat se restringen a áreas poco alteradas o al menos a fragmentos de bosque y áreas de borde donde les es fácil acceder a la oferta de alimento. Heliconiinae aparece como la subfamilia más diversa y abundante en las ciénagas de Córdoba, esto en gran medida se puede atribuir a su estrecha relación con plantas de la familia Passifloraceae con hábito de crecimiento tipo trepador (hospedera) y cuyo néctar es la fuente de alimentación en estado adulto (**Gilbert, 1984; Prieto & Constantino, 1996**), varias especies de estas plantas se encontraron en el estrato herbáceo de los relictos de bosque de la Ciénaga de Ayapel, al igual que en la vegetación de bosques de galería presentes en la ciénaga de Lórica, y en parches de vegetación herbácea de áreas anegadas como la presentada por las ciénagas de Arcial, el Porro y Cintura.

Se observó una relación entre las zonas de bosque con un menor grado de intervención y el aumento de la riqueza de especies. Tal es el caso las ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura y de algunos sectores en la Ciénaga de Ayapel, donde encontramos un gran número de especies exclusivas (30) en comparación con las ciénagas del complejo Sinú. La ciénaga de Betanci en valle del río Sinú, presentó igual riqueza que la ciénaga de Ayapel, sin embargo es una de las ciénagas con el menor número de especies exclusivas (3), lo que sugiere que la disminución del tamaño del bosque disminuye a su vez la diversidad de especies. Un gran número de especies encontradas en esta zona se encuentran igualmente asociadas a hábitats tanto intervenidos como poco alterados, tales como *Heliconius melpomene*, *Hesperocharis nera* y *Urbanus simpliciis*, en general las especies allí registradas se encuentran asociadas a áreas abiertas de potreros y clara tolerancia a este tipo de hábitats.

La ciénaga de Martinica es la que presenta el menor número de especies y menor número de especies exclusi-

vas, esto concuerda con el estado de alteración de la zona: diferentes procesos como desecación y tala de la vegetación del área de influencia para convertirlos en potreros, han causado la transformación del hábitat original. Las especies con amplia distribución, tolerancia por hábitats alterados y generalistas en el uso del hábitat como *Danaus eresimus* y *Danaus gilippus* pudieron ser registradas en esta zona.

Es importante tener en cuenta que a pesar de que en general las áreas con alto grado de intervención presentaron valores significativos de diversidad, las especies presentes allí son en su gran mayoría especies consideradas como generalistas, ya que son capaces de colonizar diferentes hábitats y no requieren de condiciones ambientales específicas para su establecimiento, por lo tanto no pueden ser consideradas como indicadores de un buen estado de conservación de un ecosistema. Entre estas encontramos: *Anartia amathea*, *Anartia jatrophae* y *Phoebis sennae* (**Campos-Salazar, 2008**). En este mismo sentido, especies como *Phoebis argante* y *Ascia monuste* son propias de dosel, sin embargo, cuando se reduce la cobertura vegetal también pueden hallarse en áreas abiertas aumentando la riqueza en la ciénaga de Lórica. Tal como lo indica **Kremen** (1992), el incremento aparente en la riqueza puede ser ocasionado por las especies típicas de hábitats muy intervenidos que se encuentran junto a las especies del bosque.

De otra parte, al comparar los resultados de las ciénagas de Córdoba con las ciénagas del Cesar y llanuras del Caribe, especies como *Dryadula phaetusa* y *Euptoieta hegesia* de la familia Heliconiinae, pasan a tomar especial importancia, ya que a pesar de ser especies de amplia distribución en Colombia, no se registran para otras áreas del Caribe como La jagua de Ibirico.

La fauna de mariposas en las ciénagas de Córdoba, se diferencia de la fauna presentada en las ciénagas del Cesar, con valores de hasta 0,85 en complementariedad, un resultado muy alto para ser áreas con similares condiciones biológicas. De igual forma, al comparar la composición de las especies de mariposas con áreas como la Jagua de Ibirico se encontró que son completamente disímiles. Estos resultados permiten sugerir que las diferencias presentadas en la composición de la vegetación es un aspecto valioso a tener en cuenta, para esto es importante recordar que una gran proporción de mariposas se alimentan en estado inmaduro de plantas herbáceas y bejucos (**Kremen et al. 1993; Ehrlich & Raven, 1964**) y que su reducción en las áreas con fuerte intervención podría condicionar la riqueza de mariposas.

Finalmente hay que destacar que las diferencias encontradas entre los complejos de ciénagas evaluadas, las cuales albergan numerosas especies exclusivas, refuerzan la importancia de este estudio y la necesidad de conservación de los ambientes de humedales del Caribe y de su flora y fauna asociada.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional de los Valles del río Sinú y río San Jorge (CVS) y a la Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias por la cofinanciación del presente trabajo y al Instituto de Ciencias Naturales (ICN) por su apoyo, el presente trabajo se ejecutó dentro del Grupo de Biodiversidad y Conservación del ICN. Así mismo agradecemos a Hannier Pulido por facilitarnos la información de las mariposas de su tesis de grado para compararla con el presente manuscrito.

Bibliografía

- Adams, M.J.** 1985. Speciation in the Pronophilinae butterflies (Satyridae) of Northern Andes, Second Symposium on Neotropical Lepidopterology (Arequipa, Perú). *J. Res. Lep.*, Supplement: 133-49.
- Andrade-C., M.G.** 2007. http://www.mariposasandinas.org/colombia_sp.html EnEl Proyecto Diversidad de las Mariposas Andinas Tropicales.
- Andrade-C., M. G., Campos-Salazar, L.R., González-Montaña, L.A. & H.W. Pulido-B.** 2007A. Santa María, mariposa alas y color. Serie de Guías de Campo del Instituto de Ciencias Naturales N° 2. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. D. C., Colombia. 248 pp.
- Campos-Salazar, L. R.** 2008. Estudio de la riqueza y composición de la comunidad de mariposas (Hesperioidea: Papilionoidea) en la cordillera oriental, bosque galilea (Tolima-Colombia). Tesis de Maestría en Entomología Facultad de Ciencias. Inédito. 87 pp.
- De Vries, P. J.** 1987. The Butterflies of Costa Rica and their natural history: Papilionidae, Pieridae, Nymphalidae, volumen I. Princeton University Press, New Jersey. 288 pp.
- Cárdenas-Arévalo, G., O.V. Castaño-Mora, Carvajal-Cogollo, J.E.** 2010. Comunidad de reptiles en humedales y áreas aledañas del departamento de Córdoba. Pp. 365-358. En J.O. Rangel Ch. (ed) 2010. Colombia Diversidad Biótica IX Ciénagas de Córdoba: Biodiversidad, ecología y Manejo Ambiental. Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia
- Coddington, J.A., Grisworld, E. Silva, D., Peñaranda, E. & Scott, S.** 1991. Designing and Testing Samplings Protocols to Estimate Biodiversity in Tropical Ecosystems, pp. 44-60.
- Colwell, R.K. & Coddington, J.A.** 1994. Estimating terrestrial biodiversity through extrapolation. *Philosophical Transactions of the Royal Society, series B*, 345:101-118.
- De la Maza, R.** 1987. Mariposas Mexicanas. Guía para colecta y determinación. Fondo de Cultura Económica, S.A.302 pp.
- De Vries, P.J.** 1988. Stratification of fruit-feeding nymphalid butterflies in a Costa Rican rainforest. *Journal of Research on the Lepidoptera*, 26:98-101.
- Ehrlich, P.R. & P.H. Raven.** 1964. Butterflies and plants: an study in coevolution. *Evolution* 18:586-608.
- Fagua, G.** 1996. Comunidad de Mariposas y Artropofauna Asociada con el Suelo de Tres Tipos de Vegetación de la Serranía de Taraira (Vaupés, Colombia). Una Prueba del Uso de Mariposas como Bioindicadores. *Revista Colombiana de Entomología*, 22(3):143-152.
- Fagua, G., Amarillo, A. & Andrade-C., M. G.** 1999 Mariposas como Indicadores del Grado de Intervención en la Cuenca del Río Pato (Caquetá-Colombia). En Andrade, M. G., G. Amat & F. Fernández (Eds). *Insectos de Colombia, Estudios Escogidos. Colección Jorge Álvarez Lleras 13: 285-315.* Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Bogotá.
- Gilbert, L. E.** 1984. The Biology of Butterfly Communities. En Vane-Wright R. I. & P. R. Ackery (eds). *The Biology of Butterflies (Symposia of the Royal Entomological Society of London, 11)*. London: Academic Press, 41-54.
- Kremen, C.** 1992. Assessing the Indicator Properties of Species Assemblages for Natural areas Monitoring. *Ecological Applications*, 2(2):303-217
- Kremen, C., R.K. Colwell, T.L. Erwin, D.D. Murphy, R.F. Noss & M.A. Saujayan.** 1993. Terrestrial arthropod assemblages: their use in conservation planning. *Conservation Biology*, 7(4):796-808.
- Lamas, G., Callaghan C.J., Casagrande, M.M., Mielke, O.H., Pyrcz, T.W., Robbins, R.K. & Vilorio A.L.** 2004. Checklist: Part 4ª Hesperioidea-Papilionoidea. Scientific Publishers. Gainesville, Florida 439 pp.
- Le Crom, J.F., Llorente J., Constantino, L.M. & Salazar, J.A.** 2004. Mariposas de Colombia, Tomo 2 Pieridae. Carlec Ltda., Colombia, Bogotá. 133 pp.
- Magurran, A.E.** 1988. *Ecological Diversity and Its Measurement*. Princeton University Press, New Jersey 179 pp.
- Moreno, C.E.** 2001. Manuales y Tesis SEA 1, Métodos para Medir la Biodiversidad. Zaragoza 84 pp.
- Prieto, M. & Constantino, L.M.** 1996. Abundancia, distribución y diversidad de mariposas (Lep. Rophalocera) en el río Tatabro, Buenaventura (Valle-Colombia). *Bol. Mus. Ent. Univ. Valle*. 4(2):11-18.
- Pulido-B., H.W.** 2008. Las mariposas (Lepidoptera: Hesperioidea, Papilionoidea) de la serranía del Perijá, Colombia. Análisis de distribución y diversidad. Facultad de Ciencias, departamento de Biología. Tesis de grado. Maestría en Ciencias. 120 pp.
- Raguso, R.A. & Llorente, J.** 1997. Papilionoidea. En González, E. S.R. Dirzo & R. C. Vogt (eds.) *Historia Natural de los Tuxtlas*. Instituto de Ciencias de Biología, UNAM. México, pp. 257-291.
- Rangel-Ch., J.O., Garay-Pulido, H. & Avella, A.** 2010. Bosques Húmedos y secos circundantes a los complejos de humedales

(ciénagas), en el departamento de Córdoba. Pp 214-216. En J.O. Rangel Ch. (ed) 2010. Colombia Diversidad Biótica IX Ciénagas de Córdoba: Biodiversidad, ecología y Manejo Ambiental. Instituto de Ciencias Naturales-Universidad Nacional de Colombia.

Rivera-Díaz, O. 2010. Flora. En: J. Orlando Rangel Ch. (ed.) Colombia Diversidad Biótica IX, Ciénagas de Córdoba:

biodiversidad-ecología y manejo ambiental. Instituto de Ciencias naturales. Bogotá, pp 125-128.

Vélez, J. 1989. Mariposas de la zona cafetera en Colombia. Revista Lámpara, **23**(108):10-19.

Recibido: abril 9 de 2010.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

Anexo 1. Lista de especies y abundancia de las mariposas del complejo de ciénagas de Córdoba. **1.** Ciénaga de Ayapel, en el municipio de Ayapel. **2.** Ciénaga Grande de Lorica en el municipio de Lorica. **3.** Ciénaga de Martinica, municipio de Montería. **4.** Ciénaga de Betanci, Municipio de Montería. **5.** Ciénagas de Arcial, El Porro y Cintura, en el municipio de Pueblo Nuevo.

Familia	Subfamilia	Especie	1	2	3	4	5		
NYMPHALIDAE	Biblidinae	<i>Hamadryas februa</i> (Hübner, [1823])	0	0	1	1	0		
		<i>Hamadryas feronia</i> (Linnaeus, 1758)	3	1	0	3	3		
		<i>Hamadryas arinome</i> (Lucas, 1853)	1	0	1	2	0		
		<i>Temenis laothoe</i> (Cramer, 1777)	0	0	0	0	1		
		<i>Callicore pitheas</i> (Latreille, [1813])	0	0	0	0	1		
		<i>Nica flavilla</i> (Godart, [1824])	0	0	0	0	1		
		<i>Marpesia petreus</i> (Cramer, 1776)	1	1	0	0	0		
		<i>Marpesia alcibiades</i> (Staudinger, 1876)	0	0	0	0	1		
		Charaxinae	<i>Zarethis itys</i> (Cramer, 1777)	0	0	0	0	1	
			Danainae	<i>Danaus gilippus</i> (Cramer, 1775)	1	0	1	0	1
		<i>Danaus eresimus</i> (Cramer, 1777)		0	0	1	0	0	
		<i>Danaus plexippus</i> (Linnaeus, 1758)		2	4	2	0	1	
		Heliconiinae	<i>Euptoieta hegesia</i> (Cramer, 1779)	0	0	1	1	1	
	<i>Actinote melampeplos</i> Godman & Salvin, 1881		0	0	0	0	1		
	<i>Heliconius hecale</i> (Fabricius, 1776)		3	1	0	2	3		
	<i>Heliconius sara</i> (Fabricius, 1793)		0	0	0	0	4		
	<i>Heliconius melpomene</i> (Linnaeus, 1758)		1	3	0	1	4		
	<i>Heliconius erato</i> (Linnaeus, 1758)		4	0	0	0	0		
	<i>Dryadula phaetusa</i> (Linnaeus, 1758)		1	3	4	0	2		
	<i>Dryas iulia</i> (Fabricius, 1775)		0	0	0	2	2		
	<i>Agraulis vanillae</i> (Linnaeus, 1758)		0	1	1	1	2		
	Ithomiinae		<i>Mechanitis polymnia</i> (Linnaeus, 1758)	3	0	2	3	5	
	Limnithidinae	<i>Adelpha iphiclus</i> (Linnaeus, 1758)	3	0	0	0	0		
	Morphinae	<i>Caligo illioneus oberon</i> (Butler, 1870)	1	0	0	0	0		
		<i>Morpho helenor peleides</i> (Cramer, 1776)	0	0	0	0	2		
	Nymphalinae	<i>Junonia evarete</i> (Cramer, 1779)	0	1	1	1	0		
		<i>Anartia amathea</i> (Linnaeus, 1758)	0	2	0	0	0		
		<i>Anartia jatrophae</i> (Linnaeus, 1763)	0	4	0	2	1		
	Satyrinae	<i>Hermeuptychia hermes</i> (Fabricius, 1775)	0	1	0	1	0		
		<i>Taygetis laches</i> (Fabricius, 1793)	0	0	0	0	1		
	LYCAENIDAE	Theclinae	<i>Pseudolycaena marsyas</i> (Linnaeus, 1758)	3	0	0	0	0	
			<i>Arawacus aetolus</i> (Sulzer, 1776)	0	1	0	0	0	
		Polyommatainae	<i>Leptotes cassius</i> (Cramer, 1775)	0	0	0	2	0	
RIODINIDAE	Riodininae	<i>Theope vilgillus</i> (Fabricius, 1793)	0	0	0	0	1		
PIERIDAE	Colianinae	<i>Phoebis sennae sennae</i> (Linnaeus, 1758)	6	2	2	6	3		
		<i>Phoebis argante</i> (Fabricius, 1775)	3	0	0	0	0		
		<i>Pyrisitia proterpia</i> (Fabricius, 1775)	1	0	0	1	0		
		<i>Pyrisitia venusta</i> (Boisduval, 1836)	3	5	2	1	0		
		<i>Eurema agave</i> (Cramer, 1775)	1	0	1	1	0		
	Pierinae	<i>Glutoprhissa drusila</i> (Cramer, 1777)	0	4	0	0	0		
		<i>Ascia monuste orseis</i> (Godart, 1819)	4	5	3	3	0		
		<i>Hesperocharis nera</i> (Hewitson, 1852)	0	2	0	1	0		
		PAPILIONIDAE	Papilioninae	<i>Heraclides anchisiades</i> (Esper, 1788)	0	2	1	2	0
				<i>Battus polydamas</i> (Linnaeus, 1758)	0	0	0	0	2
<i>Heraclides thoas</i> (Linnaeus, 1771)	0			0	2	0	0		
HESPERIDAE	Pyrginae	<i>Chioides catillus</i> (Cramer, 1779)	0	0	0	2	0		
		<i>Heliopetes arsalte</i> (Linnaeus, 1758)	0	2	0	2	0		
		<i>Pyrgus orcus</i> (Stoll, 1780)	1	1	0	0	0		
	Hesperiinae	<i>Polites vibex</i> (Geyer, 1832)	2	0	0	0	0		
		Pyrginae	<i>Urbanus simplicius</i> (Stoll, 1790)	5	3	2	1	0	
			<i>Phocides polybius polybius</i> (Fabricius, 1793)	1	0	0	0	0	
No. de especies			2	2	17	2	21		
Abundancia de sp.			5	4	2	4	4		
			4	9	8	2	4		

Anexo 2. Lista de especies de mariposas para algunas ciénagas y municipios de la región del Caribe. **1.** Ciénagas de Ayapel, Arcial, El Porro y Cintura, en el departamento de Córdoba. **2.** Ciénagas de Lorica, Martinica y Betanci, en el departamento del Córdoba. **3.** Ciénaga de Zapatosa, en el departamento de Cesar (**Pulido-B.**, 2008). **4.** Ciénagas de Mata de Palma y La Pachita, en el departamento del Cesar (**Pulido-B.**, 2008). **5.** Municipio de la Jagua de Ibirico, en el departamento del Cesar (**Pulido-B.**, 2008).

Familia	Subfamilia	Especies	1	2	3	4	5	
Hesperiidae	Carystoides noseda	<i>Panoquina fusina</i>			X	X		
		<i>Panoquina lucas</i>			X			
		<i>Panoquina ocola</i>			X	X		
		<i>Lerema ancillaris</i>			X	X		
		<i>Nastra neamathla</i>				X		
		<i>Polites vibex</i>	X		X	X		
		<i>Mnasicles hicetaon</i>					X	
		<i>Callimormus saturnus</i>					X	
		<i>Nyctelius nyctelius</i>					X	
		<i>Thracides cleantes</i>				X		
		<i>Vettius marcus</i>						X
		<i>Wallengrenia otho</i>				X		
		Pyrginae	<i>Antigonus emorsa</i>				X	X
	<i>Antigonus erosus</i>					X	X	
	<i>Astraptus anaphus</i>					X		
	<i>Astraptus aulus</i>					X		
	<i>Autochton neis</i>					X		
	<i>Chioides catillus</i>				X	X	X	
	<i>Cogia calchas</i>							X
	<i>Heliopetes arsalte</i>					X		X
	<i>Paches loxus</i>					X	X	
	<i>Pyrgus orcus</i>		X			X	X	
	<i>Timochreon satyrus</i>						X	
	<i>Urbanus belli</i>							X
	<i>Urbanus dorantes</i>					X	X	
	<i>Urbanus simplicius</i>		X			X	X	
	<i>Gorgythion beggina</i>					X		
	<i>Nisoniades ephora</i>					X		
	<i>Quadrus contubernalis</i>					X		
	<i>Staphylus imperspicua</i>					X	X	
	<i>Viola egra</i>					X		
	<i>Pyrgus orcynoides</i>					X	X	
	<i>Urbanus procne</i>						X	
	<i>Aguna metophis</i>					X		
	<i>Achlyodes mithridates thraso</i>					X		
	<i>Typhedanus undulatus</i>						X	
	<i>Ocyba calathana calathana</i>					X		
	<i>Mylon pelopidas</i>						X	
	<i>Urbanus tanna</i>					X		
	<i>Phocides polybius polybius</i>	X						
	<i>Mysoria barcastus</i>				X	X		
	<i>Pyrrhopyge phidias</i>				X		X	
	Lycaenidae	Polyommatae	<i>Leptotes cassius</i>					X
			<i>Hemiargus hanno</i>			X	X	
		Theclinae	<i>Arawacus aetolus</i>		X	X		
			<i>Calycopis origo</i>		X		X	
			<i>Ministrymon una</i>				X	
		<i>Panthiades phaleros</i>			X			
		<i>Strymon bazochii</i>			X			
		<i>Pseudolycaena marsyas</i>	X					
Nymphalidae	Apaturinae	<i>Doxocopa laurentia cherubina</i>					X	
		<i>Doxocopa pavon</i>					X	
	Biblidinae	<i>Biblis hyperia hyperia</i>					X	
		<i>Catonephele chromis chromis</i>					X	

Continuación Anexo 2

	X				
	<i>Diaethria gabaza</i>				X
	<i>Callicore pitheas</i>	X		X	X
	<i>Dynamine postverta</i>			X	
	<i>Epiphile epicaste epicaste</i>				X
	<i>Eunica malvina</i>			X	
	<i>Hamadryas februa ferrentina</i>		X	X	X
	<i>Hamadryas feronia</i>	X	X	X	X
	<i>Hamadryas arinome</i>	X	X		
	<i>Marpesia alcibiades</i>	X			
	<i>Marpesia petreus</i>	X	X		
	<i>Marpesia zerynthia</i>				X
	<i>Mestra dorcas hypermestra</i>				X
	<i>Pyrrhogyra neaerea kheili</i>			X	X
	<i>Temenis laothoe</i>	X		X	X
	<i>Nica flavilla</i>		X		
	<i>Archaeoprepona demophon</i>				
Charaxinae	<i>muson</i>			X	
	<i>Consul fabius bogotanus</i>				X
	<i>Consul panariste panariste</i>				X
	<i>Hypna clytemnestra clytemnestra</i>				X
	<i>Hypna clytemnestra rufescens</i>				X
	<i>Memphis philumena</i>				X
	<i>Prepona philipponi</i>			X	
	<i>Zaretis ellops</i>			X	
	<i>Zaretis itis</i>	X			
Danainae	<i>Danaus plexippus</i>		X	X	X
	<i>Danaus eresimus</i>	X	X		
	<i>Lycorea halia cleobaea</i>			X	
	<i>Lycorea halia atergatis</i>				X
	<i>Danaus gilippus xanthippus</i>	X	X	X	X
Heliconiinae	<i>Actinote pellenea equatoria</i>			X	
	<i>Actinote antea</i>				X
	<i>Actinote melamplepos</i>	X			
	<i>Agraulis vanillae</i>	X	X		X
	<i>Altinote stratonice marthae</i>				X
	<i>Altinote stratonice stratonice</i>				X
	<i>Dione juno</i>				X
	<i>Dione moneta butleri</i>				X
	<i>Dryadula phaetusa</i>	X	X	X	X
	<i>Dryas iulia</i>	X	X	X	
	<i>Eueides aliphera aliphera</i>				X
	<i>Eueides arquata isabella</i>			X	
	<i>Euptoieta hegesia</i>	X	X	X	X
	<i>Heliconius charithonia</i>				X
	<i>Heliconius clysonymus clysonymus</i>				X
	<i>Heliconius erato hydara</i>	X	X	X	X
	<i>Heliconius hecale</i>	X	X		
	<i>Heliconius sara</i>	X	X		
	<i>Heliconius melpomene</i>	X	X	X	X
Ithomiinae	<i>Aeria eurimedia</i>			X	
	<i>Mechanitis menapis</i>	X	X		
	<i>Ceratinia tutia</i>				X
	<i>Dircenna jemina</i>				X
	<i>Dircenna klugii</i>				X
	<i>Hypoleria ocalea ocalea</i>				X
	<i>Hypothyris euclea</i>				X
	<i>Ithomia agnosia</i>				X
	<i>Ithomia iphianassa</i>				X

Continuación Anexo 2

		<i>Ithomia terra</i>							X
		<i>Melinaea lilis</i>							X
		<i>Napeogenes stella</i>							X
		<i>Oleria amalda amaldina</i>							X
		<i>Oleria phenomoe phenomoe</i>							X
		<i>Oleria santineza santineza</i>							X
		<i>Pagyris cymothoe</i>							X
		<i>Pteronymia latilla nigricans</i>							X
		<i>Pteronymia laura</i>							X
		<i>Pteronymia picta</i>							X
		<i>Pteronymia primula auricula</i>							X
	Limenitidinae	<i>Adelpha basiloides</i>				X			
		<i>Adelpha fessonia ernestoi</i>				X	X		
		<i>Adelpha iphiclus iphiclus</i>	X			X	X		
		<i>Adelpha lycorias lara</i>							X
	Morphinae	<i>Opsiphanes cassina</i>				X			
		<i>Opsiphanes invirae</i>				X			
		<i>Opsiphanes tamarindi</i>				X			X
		<i>Caligo atreus dionysos</i>							X
		<i>Caligo telamoniuss memnon</i>							X
		<i>Dynastor darius stygianus</i>							X
		<i>Caligo illioneus oberon</i>	X						
		<i>Morpho helenor peleides</i>	X						X
	Nymphalinae	<i>Anartia amathea</i>		X	X	X	X		
		<i>Anartia jatrophae</i>	X	X	X	X	X		
		<i>Anthanassa drusilla lelex</i>							X
		<i>Castilia eranites</i>							X
		<i>Chlosyne lacinia</i>				X			X
		<i>Chlosyne narva</i>							
		<i>Colobura dirce</i>				X			
		<i>Eresia polina</i>							X
		<i>Historis odius odius</i>							X
		<i>Hypanartia dione</i>							X
		<i>Hypanartia lethe</i>							X
		<i>Janatella leucodesma</i>							X
		<i>Junonia evarete</i>		X	X	X	X		
		<i>Microtia elva</i>				X	X		
		<i>Tegosa anieta</i>							X
		<i>Vanessa virginiensis</i>							X
		<i>Siproeta epaphus epaphus</i>							X
		<i>Siproeta stelenes</i>				X			X
	Satyrinae	<i>Cissia pompilia</i>				X			
		<i>Corades pannonia ploas</i>							X
		<i>Euptychoides laccine</i>							X
		<i>Hermeuptychia hermes</i>	X	X	X	X	X		
		<i>Magneuptychia libye</i>				X			
		<i>Pareuptychia ocirrhoe</i>				X	X		
		<i>Pedaliodes cledonia</i>							X
		<i>Pedaliodes phrasicla phrasicla</i>							X
		<i>Pierella luna luna</i>				X			
		<i>Posttaygetis penelea</i>				X			
		<i>Taygetis kerea</i>				X			
		<i>Taygetis laches laches</i>	X			X	X	X	
		<i>Ypthimoides argyrospila</i>				X			
		<i>Ypthimoides peloria</i>							X
		<i>Ypthimoides urbana</i>				X	X		
		<i>Taygetis sylvia</i>				X			
Papilionidae	Papilioninae	<i>Battus polydamas</i>	X					X	
		<i>Heraclides homothoas</i>						X	

Continuación Anexo 2

		<i>Heraclides thoas nealces</i>		X		X	
		<i>Heraclides torquatus torquatus</i>			X		
		<i>Heraclides anchisiades</i>		X			
		<i>Parides anchises serapis</i>			X	X	
		<i>Parides eurimedes arriphus</i>			X		
		<i>Parides eurimedes emilius</i>				X	
		<i>Parides eurimedes eurimedes</i>			X		
		<i>Parides sesostris sesostris</i>			X		X
Pieridae	Coliadinae	<i>Aphrissa statira</i>				X	
		<i>Anteos maerula</i>					X
		<i>Eurema agave agave</i>	X	X		X	
		<i>Eurema albula marginella</i>			X		X
		<i>Eurema दौरa lydia</i>			X	X	X
		<i>Eurema elathea vitellina</i>			X	X	
		<i>Eurema gratiosa</i>			X	X	
		<i>Eurema salome salome</i>					X
		<i>Eurema venusta</i>	X	X			
		<i>Phoebis agarithe agarithe</i>				X	
		<i>Phoebis philea philea</i>			X		
		<i>Phoebis sennae marcellina</i>			X	X	
		<i>Phoebis sennae sennae</i>	X	X			
		<i>Phoebis argante</i>	X	X			
		<i>Pyrisitia limbica</i>			X	X	
		<i>Pyrisitia proterpia</i>		X			
	Pierinae	<i>Archonias tereas critias</i>					X
		<i>Ascia monuste monuste</i>	X	X	X	X	
		<i>Glutophrissa drusilla</i>		X	X		
		<i>Itaballia demophile calydonia</i>			X	X	
		<i>Leptophobia penthica penthica</i>					X
		<i>Perrhybris malenka bogotana</i>				X	X
		<i>Pieriballia mandela</i>					X
		<i>Hesperocharis nera</i>		X			
Riodinidae	Riodininae	<i>Calospila lucianus</i>			X	X	
		<i>Charis anius</i>			X		X
		<i>Melanis electron</i>				X	
		<i>Nymphidium onaeum</i>				X	
		<i>Perophtalma lasus</i>			X		
		<i>Theope phaeo</i>					X
		<i>Theope virgilius</i>	X		X		
Núm. de especies		37	35	98	66	85	

ETIOLOGÍA DE LA MUERTE DESCENDENTE DEL DURAZNERO [*PRUNUS PERSICA* (L.) BATSCH] EN LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y VILLAMARÍA, DEPARTAMENTO DE CALDAS

Luz Dary Rivera- Hoyos¹, Jairo Castaño- Zapata²

Resumen

Rivera Hoyos, L. D., J. Castaño Zapata: Etiología de la muerte descendente del duraznero [*Prunus persica* (L.) Batsch] en los municipios de Manizales y Villamaría, departamento de Caldas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 61-69, 2011. ISSN 0370-3908.

En los municipios de Villamaría y Manizales (Caldas) se presentó una enfermedad en los árboles de duraznero [*Prunus persica* (L.) Batsch] con incidencia del 100%. Los síntomas eran flacidez en las hojas, defoliación y secamiento de ramas. Éstas presentaban lesiones con aspecto de cáncer con exudados de goma. Una bacteria Gram negativa, fluorescente, fue aislada de tejidos enfermos en medios King's B y agar nutritivo. Las pruebas LOPAT revelaron: levano positivo; oxidasa, pudrición blanda de papa y arginina dihidrolasa negativa; y reacción de hipersensibilidad positiva en tabaco. La patogenicidad fue confirmada inoculando plántulas de duraznero de un año, las cuales presentaron síntomas similares a los observados en campo. Pruebas bioquímicas y fisiológicas indicaron que la bacteria que causa la Muerte descendente del duraznero en Caldas pertenece a *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*.

Palabras clave: bacteria, Muerte descendente, duraznero, patogenicidad, *Pseudomonas syringae*.

Abstract

A disease in peach trees [*Prunus persica* (L.) Batsch] was detected in the municipalities of Villamaría and Manizales (Caldas) with an incidence of 100%. The symptoms of the disease were flaccidity of the leaves, defoliation and drying of branches. Infected plants showed lesions resembling cankers with gum exudation. A Gram negative and fluorescent bacterium was isolated from diseased tissues in King's B and nutrient agar media. The LOPAT tests showed: levano positive; oxidase, potato soft rot, arginine dihydrolase negative; and positive tobacco hypersensitivity reaction in

¹ Maestría en Fitopatología, Universidad de Caldas. Correo electrónico: orellanasumapaz@hotmail.com

² Coordinador Maestría en Fitopatología, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Caldas, Correo electrónico: jairo.castano_z@ucaldas.edu.co

tobacco plants. The pathogenicity of the bacterium was demonstrated by inoculating one year old peach trees, which showed similar symptoms to those observed in the field. Both biochemical and physiological tests indicated that the bacterium causing the dieback in peach at the department of Caldas belongs to *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*

Key words: bacterium, Dieback, peach, pathogenicity, *Pseudomonas syringae*

Introducción

Los frutales caducifolios tienen una creciente demanda comercial a nivel de fruta fresca; ésta demanda requiere técnicas que permitan incrementar las cosechas como base para competir con una producción abundante y de buena calidad (Pachón & Bridg, 1993). La producción nacional de duraznero ha estado representada en huertos caseros y algunos cultivos ubicados en los departamentos de Boyacá, Cundinamarca, Santander, Antioquia, Caldas y Nariño. Debido a la introducción de materiales con bajo requerimiento de frío, las áreas se han incrementado en estas regiones del país pasando de 450 a 850 ha en el año 2005 (Molina & Parra, 2007). Para el 2009, los departamentos que se destacaban por su producción eran: Boyacá con 915 ha y el Norte de Santander con 321 ha con rendimientos de 13 y 11,9 ton ha⁻¹, respectivamente (Agronet, 2009). Se observa un incremento muy significativo en el área cultivada ya que en el año 1986, fue de 260 ha en todo el país (Campos, 1993). En los municipios de Villamaría y Manizales (Caldas), específicamente en las fincas Valles y Guamal en Villamaría y Los Manzanos en Manizales, ubicadas entre 2.100 y 2.200 msnm, respectivamente, se presentó una enfermedad en los cultivos de duraznero, afectando a las variedades Newball, Sapote, Florida y Amarillo. Los síntomas externos observados eran flacidez de las hojas, con posterior defoliación y secamiento de ramas. Las ramas presentaban lesiones con aspecto de cáncer con exudados gomosos y finalmente los árboles morían. Al hacer cortes transversales de ramas se observaba una coloración parda oscura, que iba en forma descendente a través de ramas y tallos.

Las observaciones de campo y la percepción de los cultivadores de la región indicaban un incremento en la severidad de la enfermedad en épocas lluviosas y húmedas, mientras que en épocas secas, la enfermedad tendía a estabilizarse. La razón de la severidad de la enfermedad era desconocida, pero parecía factible que una combinación de factores predisponentes, particularmente climáticos de suelo, y el uso de materiales susceptibles favorecían su expresión. En los cultivos de duraznero de Boyacá, Cundinamarca y Nariño no se reportaban daños de ésta naturaleza.

En duraznero se presentan diferentes enfermedades con características devastadoras como: Cáncer bacteriano provocado por *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* Van Hall y *P. syringae* pv. *persicae* (Prunier *et al.*) Young *et al.*, el cual conduce a la muerte de plantas jóvenes en un lapso de un año y de adultas en dos ó tres años (Noval, 1991). Hattingh *et al.* (1989) reportan la muerte de más de un millón de árboles de duraznero en Francia por causa de ésta enfermedad. Entre los hongos que causan marchitamientos y daños en tallo y ramas se encuentran los géneros *Leucostoma*, *Verticillium*, *Ceratocystis*, *Phomopsis* y *Botryosphaeria* (Gubler, 1995).

El agente causante de la enfermedad aún no se ha identificado y se desconocen los factores predisponentes que favorecen su desarrollo impidiendo el diseño de estrategias efectivas de manejo. Esta investigación propuso abordar los procedimientos adecuados para el diagnóstico correcto del agente o los agentes causantes de la Muerte descendente del duraznero como paso fundamental para el diseño de prácticas de manejo que permitan proteger los cultivos con la perspectiva de mejorar la rentabilidad de las inversiones sin deteriorar el ecosistema por el uso de prácticas inadecuadas de manejo.

Materiales y métodos

La investigación se inició con el muestreo en la finca Guamal localizada en el municipio de Villamaría (Caldas) ubicada a 2.100 msnm; con temperatura promedio anual de 15,5°C, precipitación promedio acumulada anual de 2.100 mm y una humedad relativa del 80%; y en el municipio de Manizales en la finca Los Manzanos, localizada en la vereda Maltería, ubicada a 2.200 msnm; con temperatura promedio de 17°C y precipitación promedio acumulada anual de 2.200 mm y una humedad relativa del 88%. Las pruebas preliminares se llevaron a cabo en el laboratorio de Caducifolios, del departamento de Fitotecnia, de la Universidad de Caldas, Manizales, cuyas características son: temperatura promedio 18 °C, humedad relativa 73,3 % y altitud 2.200 msnm.

Toma de muestras y procesamiento. Se recolectaron muestras de ramas, tallo, y raíces de árboles de tres años y medio de edad, de las variedades Newball, Florida, Sapote y Amarillo, sembradas a una distancia de 4x5 m. Básicamente

el manejo sanitario de las plantaciones consistió en realizar podas y aplicación de benomil sobre las heridas en dosis de $1 \text{ cm}^3 \text{ L}^{-1}$ de agua. Las ramas fueron tomadas principalmente donde se observaba el avance de la enfermedad. Las muestras se colocaron bajo un estereoscopio, para observar crecimientos miceliales ó estructuras de algún hongo. Una parte de cada muestra se colocó en cámara húmeda (Del Río & Saucedo, 1997). Luego de ésta observación se procedió a realizar siembras por aislamiento directo, así: se lavaron las partes colectadas enfermas con agua corriente y luego se sumergieron en una solución de hipoclorito de sodio al 2% durante 2 ó 3 min y se enjuagaron nuevamente con agua destilada estéril. Luego en una cámara de aislamiento y con un bisturí estéril, se hicieron cortes de 1 a 2 mm^2 en la zona de avance de la enfermedad y se depositaron durante 2 min en una caja Petri que contenía una solución de hipoclorito de sodio al 2%, posteriormente se pasaron con una pinza estéril a otra caja Petri conteniendo agua destilada estéril. Finalmente, fueron depositados en papel secante estéril para retirar el exceso de humedad. Estas muestras se sembraron en papa, dextrosa, agar (PDA) acidificado, el cual se preparó disolviendo 39 g de PDA en 1 L de agua y esterilizado en autoclave a $121 \text{ }^\circ\text{C}$ y 15 lb de presión, durante 20 min. Se vertió de 20 a 25 mL por caja Petri, y se adicionó dos gotas de ácido láctico al 25% con el propósito de bajar el pH entre 4 y 5 para inhibir el desarrollo de bacterias (Del Río & Saucedo, 1997); igualmente se sembraron tejidos en agar nutritivo (AN) marca Oxoid (agar 15 g; peptona 5 g; extracto de carne 4 g), para el aislamiento de bacterias, el cual se preparó disolviendo 24 g de AN en 1 L de agua, se dejó hervir por 1 min, se esterilizó en autoclave y se vertió en cajas Petri. Las siembras se dejaron a una temperatura de 26°C , en una estufa de temperatura controlada marca DIES, por espacio de 72 h. Al desarrollarse bacterias alrededor del tejido, se hizo resiembra para separar las colonias y se procedió a purificar las bacterias por el método de estría o agotamiento, el cual consiste en hacer trazos sobre el medio de cultivo para ir diseminando la bacteria sobre la superficie del medio. Para esto se tomaron cuatro cajas Petri con AN, las cuales se sembraron así: se tomó el asa previamente flameada y fría con el crecimiento bacteriano alrededor del tejido y se trazaron estrías en forma de zig zag en las placas una y dos sin flamear la aguja, se repitió la operación con las placas tres y cuatro pero trazando estrías, se dejaron incubar a 26°C durante 24 a 36 h. Las cajas fueron observadas diariamente registrando el tiempo de aparición y las características de la colonia como color, forma y brillo. A partir de éstas colonias puras aisladas, se realizó la resiembra en medio King's B (Peptona 20 g, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 2,5 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 6 g, glicerol 15 mL, agar 15 g), para la detección de pigmentos fluorescentes y se dejaron en incubación durante 72 h al

cabó de los cuales fueron examinadas bajo una lámpara de luz ultravioleta. Además se sembró en medio D-4, el cual contiene glicerol, sucrosa, caseína enzimática hidrolizada, NH_4Cl , NaHPO_4 , dodecil sulfato de sodio y agar, selectivo para bacterias del género *Pseudomonas* fluorescentes, oxidasa negativa (Shaad, 1980). La bacteria fue conservada en tubos de ensayo con agar infusión cerebro – corazón, BHI, marca Oxoid (infusión cerebro, 200 g; infusión corazón, 250 g; peptona, 10 g; NaCl , 5 g; fosfato disódico, 2,5 g; dextrosa, 2 g y agar 15 g).

Pruebas morfológicas. A partir de los cultivos puros se hicieron las pruebas morfológicas de tinción de Gram, solubilidad en KOH, movilidad en gota suspendida, catalasa y tinción de flagelos (Del Río & Saucedo, 1997; Shaad, 1988; Noval, 1991).

Pruebas de patogenicidad. Para éstas pruebas se preparó una suspensión bacteriana, tomando una asada de siembra estéril de bacterias procedentes de un cultivo joven (24-26 h), la cual se depositó sobre agua estéril, se homogenizó y se ajustó su densidad basada en la escala de opacidad de McFarland que se prepara mezclando las dos soluciones siguientes: A) Cloruro de bario (Cl_2Ba) al 6% y B) Ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 1% (Noval, 1991). Las lecturas se efectuaron comparando al trasluz la opacidad del tubo problema con la opacidad de los de la escala; para éstas pruebas se utilizaron tubos con concentraciones mayores al número uno, con una densidad de 3×10^7 bacterias / mL de agua.

Inoculación en frutos de durazno. En dos campanas provistas de agua en el fondo, se colocaron seis duraznos maduros previamente lavados y desinfectados con hipoclorito de sodio al 2%. Cuatro de los seis frutos fueron pinchados con una aguja estéril y luego con una jeringuilla se puso una gota de suspensión bacteriana a una concentración de 3×10^7 bacterias/mL. Los orificios fueron cubiertos con algodón empapado en agua destilada estéril y se aseguraron con parafilm. Los frutos se dejaron en incubación de 48 a 72 h. De la misma forma se inocularon dos frutos de cada campana con agua destilada estéril como control.

Inoculación en hojas de duraznero. En 10 cajas Petri estériles, sobre cuatro capas de papel filtro humedecido estéril, se colocaron cuatro hojas de duraznero previamente lavadas y desinfectadas con hipoclorito de sodio al 0,5%, las cuales fueron inoculadas utilizando dos cuchillas de afeitar tipo Minora, puestas en un mango de madera tipo valso y aseguradas con chinches. Se realizaron heridas en la nervadura principal y en los bordes, luego de ser sumergida en la misma suspensión bacteriana utilizada en la prueba anterior. Los controles se realizaron haciendo el mismo corte en las hojas, pero con agua destilada estéril.

Postulados de Koch. Para aplicar estos postulados, se utilizaron plantas de duraznero (*Prunus persica* L.) de un año de edad, variedad Florida Bell, sobre patrón Durazno Blanco Común, provenientes del vivero Frutales de Nariño (Ipiales, Nariño) donde no se ha reportado ésta enfermedad. Las plantas fueron sembradas en bolsas plásticas de 5 kg con una mezcla de arena:suelo (1:2), abonado con gallinaza y se ubicaron bajo techo en el jardín botánico de la Universidad de Caldas, ubicado a 2.150 msnm con unas condiciones climáticas de humedad relativa de 82,6 % y una temperatura promedio de 18°C. Las plantas fueron fertilizadas con 15-15-15 (NPK) a una dosis de 1,44 g por planta cada tres semanas. La bacteria fue inoculada a una concentración de $1,5 \times 10^8$ bacterias/mL de agua (Tello *et al.*, 1991) correspondiente al tubo dos de la escala de opacidad de MacFarland, utilizando cuatro plantas en cada método de inoculación y dos como testigo, las cuales fueron tratadas de igual forma pero con agua destilada estéril. Luego de ser inoculadas, las plantas fueron asperjadas con agua, cubiertas completamente con bolsas de polietileno sostenidas por palos de valso y amarradas con cauchos en la parte inferior alrededor de la bolsa para así proveer una cámara húmeda, las cuales fueron retiradas a los tres días después de la inoculación. Se hizo observación de los síntomas desarrollados y se procedió a hacer un nuevo aislamiento del patógeno.

Tratamiento 1. La suspensión bacteriana fue inyectada con una jeringa de tuberculina en los internudos inmediatamente debajo del pecíolo de la quinta hoja expandida de cada rama; las hojas anterior y posterior se marcaron con una X usando un marcador indeleble.

Tratamiento 2. Se inyectó la suspensión bacteriana en el punto de inserción de las ramas con el tallo principal.

Tratamiento 3. Se realizaron cortes en los ápices de las ramas y se inyectaron con la suspensión bacteriana.

Tratamiento 4. Se hizo inoculación en hojas asperjándolas previamente con carborundum, para provocar heridas y así permitir la entrada de la bacteria. Se hizo presión de la hoja entre el dedo pulgar sobre la haz y el envés sostenido con los otros dedos, luego se asperjó la suspensión bacteriana sobre las hojas a tratar con un aspersor manual casero marca Plasti hogar.

Pruebas fisiológicas y bioquímicas. Se realizaron las pruebas LOPAT (Levano, Oxidasa, Papa, Arginina y Tabaco), claves para discriminar *Pseudomonas* fluorescentes, propuestas por Lelliott *et al.* (1966). Como referencia se utilizó una cepa de *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* a la que se denominó (Pst). Igualmente la bacteria en estudio se codificó como (P001). Otras pruebas realizadas fueron: reducción

de nitratos, hidrólisis de la gelatina, utilización de la glucosa O/F, desarrollo a 41°C, hidrólisis de la esculina e hidrólisis de la arbutina (Shaad, 1988).

Producción de la toxina siringomicina. De un aislamiento bacteriano desarrollado en caldo nutritivo por 24 h, fue puesta una gota de 10 mL en el centro de una caja Petri con papa-dextrosa-agar (PDA) y dejado 6 días a temperatura ambiente. Luego se hizo una suspensión con el hongo *Geotrichum candidum*, tomando el hongo cultivado por estriado en dos cajas de PDA. A cada una se le agregó 5 mL de agua destilada estéril, raspando suavemente el inóculo con una asa para no arrastrar PDA, y se vació en un beaker estéril. La operación se repitió con la segunda caja y se agregó 40 mL más de agua destilada estéril. Luego se asperjaron las cajas con la ayuda de un aspersor de uso doméstico marca Plasti hogar. La zona de inhibición fue medida de las márgenes de la colonia bacteriana 24 h más tarde (Gross & DeVay, 1977). Se hicieron cuatro replicas y dos testigos los cuales solamente fueron asperjados con el hongo sin la bacteria presente.

Utilización de fuentes de carbono. Los cultivos de las bacterias P001 y Pst fueron sembrados en tubos que contenían el medio basal Hugh y Leifson (H y L); (peptona, 2 g; D(+) glucosa, 10 g; azul de bromotimol, 0,03 g; agar, 2,5 g; NaCl, 5 g y fosfato dipotásico, 0,3 g en 1L de agua) previamente esterilizados a 121°C por 20 min y enfriado. Se preparó la solución de cada azúcar a una concentración final de 0,1% y fue adicionada a los tubos previamente micro filtrados con filtros milipore GSWP 02500 con un tamaño de poro 0,22 μ en un portafiltro Swinnex 25 mm. La microfiltración es utilizada para preservar intactas las proteínas que sufren desnaturalización ó la descomposición de algunos azúcares por las temperaturas de esterilización (Shaad, 1988). Se adicionó a cada tubo 5 mL del medio basal. Las colonias bacterianas de 24 h de desarrollo en AN fueron inoculadas con un asa recta, de cada azúcar probada se dejó un tubo control el cual fue inoculado con agua destilada estéril. Un cambio de color verde a amarillo que contrasta con el verde del control y el crecimiento de la bacteria alrededor del punto de inoculación fue registrado como positivo para el desarrollo en presencia de la fuente de carbono evaluado, las cuales fueron: arabinosa, ribosa, xilosa, mannososa, cellobiosa, sucrosa, rhamnosa, maltosa, manitol, adonitol, inositol, sorbitol, betaine, trigonellina, erythitol, ácido L láctico, ácido L tartárico y tartrato. Los tubos fueron incubados durante 48 a 72 h a 26°C.

Resultados

Aislamiento de la bacteria. En cámara húmeda y en las siembras en PDA, no se encontraron crecimientos

fungosos. Es de anotar que en las raíces no se encontró la bacteria tal como lo describe **Byther** (1981). En los tallos y ramas donde se presentaban cánceres y en el avance de la muerte descendente de ramas y tallos se aisló por siembra directa en forma consistente una bacteria en medio agar nutritivo (AN) después de 72 h de crecimiento. Las características de la colonia bacteriana aislada de ramas y tallos en AN fueron: color: blanco – crema – brillante, forma circular, margen entera, elevación convexa. La bacteria creció en el medio D-4 selectivo para *Pseudomonas* fluorescentes, oxidasa negativa y en medio King's B, presentó un color verde manzana brillante bajo luz ultravioleta, lo que indica la presencia de fluorescencia.

Pruebas morfológicas. Estas pruebas revelaron que tanto la bacteria P001 como la Pst eran Gram (-), móviles con uno ó dos flagelos polares y catalasa positiva.

Pruebas de patogenicidad

Inoculación en frutos de durazno. Los durazos inoculados con el aislamiento P001, mostraron una coloración

café un poco hundida a los tres días después de inoculación; los durazos control no presentaron esta coloración.

Inoculación de hojas de duraznero. En el sitio de corte hubo necrosamiento y se formó un halo clorótico; en las hojas control se observó el corte sano.

Postulados de Koch. A los siete días después de la inoculación se evaluaron los tratamientos con los siguientes resultados:

Tratamiento 1. Las ramas inoculadas presentaron secamiento, amarillamiento y flacidez de las hojas cercanas al punto de inoculación. En la parte que se hizo la inyección empezó el necrosamiento hacia la parte terminal de la rama con caída posterior de hojas. Todas las ramas inoculadas presentaron síntomas. Las hojas de las plantas control permanecieron verdes y en posición horizontal (Figura 1A).

Tratamiento 2. Empezó el necrosamiento de la base de las ramas hacia arriba principalmente en las ramas tiernas. Se presentaron exudados gomosos en los puntos de inoculación y también hubo caída de hojas (Figura 1B).



A.



B.

Figura 1. A. Tratamiento 1. A. Inoculación por inyección en la 5ª hoja expandida. Observe el amarillamiento y flacidez de las hojas, necrosamiento en hojas y ramas. B. Tratamiento 2. Inoculación en el punto de inserción de la rama en el tallo. Obsérvese cánceres en el punto de inoculación, y marchitamiento en ramas inoculadas.



A. **B.**
Figura 2. A. Tratamiento 3. Inoculación por inyección en los ápices de las ramas. Observe el marchitamiento y necrosamiento en las ramas terminales y en las hojas. B. Tratamiento 4. Inoculación por aspersión en hojas. Se observa una quemazón en las hojas inoculadas, no hay marchitamiento.

Tratamiento 3. Hubo marchitamiento en los terminales de las ramas inoculadas y avanzando hacia la parte inferior; en algunas hojas, el necrosamiento avanzó por las nervaduras principal y secundarias (Figura 2A).

Tratamiento 4. Solamente se presentó una quemazón como daño mecánico y no se notó marchitamiento ni amarillamiento de las hojas (Figura 2B). No se presentó marchitamiento en ramas, como en los tratamientos 1, 2 y 3.

Características fisiológicas y bioquímicas. Las pruebas LOPAT revelaron colonias tipo levano positivo; oxidasa, podredumbre en papa y arginina dihidrolasa negativos; e hipersensibilidad en tabaco positivo. Los aislamientos bacterianos P001 y Pst fueron negativos en las pruebas reducción de nitratos, licuación de la gelatina, utilización de la glucosa O/F y no se desarrollaron a 41°C. Hidrolizaron la esculina y la arbutina útiles para determinar la producción de β -glucosidasa (Figura 3).

Producción de siringomicina. La zona de inhibición, medida desde la colonia bacteriana P001, fue en promedio de 11,5 mm, indicando que se produjo la toxina bacteriana siringomicina, evitando así el desarrollo del hongo alrededor de la colonia bacteriana, contrario al testigo, donde el hongo se desarrolló completamente en la caja Petri. La colonia bacteriana Pst probada, no inhibió el desarrollo del hongo, lo cual indica que este patovar no produce la toxina siringomicina (Figura 4).



Figura 3. Hidrólisis de la arbutina: Arbutina positiva en *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* y *Pseudomonas syringae* pv. *tomato*; en el centro, control negativo.



Figura 4. Producción de la toxina siringomicina por la bacteria *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* inhibiendo el desarrollo del hongo *Geotrichum candidum* (izquierda); la bacteria *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* no produjo la toxina (centro). En el control, se desarrolló el hongo en todo el medio (derecha).

Utilización de fuentes de carbono. La bacteria *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* (P001) y la cepa de referencia *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Pst) utilizaron como fuente de carbono: manitol, inositol, sorbitol, trigonelline, erythritol, ácido L láctico, ácido L tartárico, arabinosa, ribosa, xilosa, mannososa, y sucrosa. La bacteria no se desarrolló en presencia de adonitol, tartrato, cellobiosa, ramnosa y maltosa. En betaine, la bacteria presentó una reacción variable. En la Tabla 1, se resume los resultados de las pruebas realizadas.

Tabla 1. Características resultantes de las pruebas morfológicas, fisiológicas y bioquímicas de las bacterias *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* (P001) y *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Pst).

Pruebas	P001	Pst
Forma	Bastón recto	Bastón recto
Presencia de flagelos	Varios polares	
Color de las colonias	Blanco crema	Blanco crema
Reacción de Gram	-	-
Catalasa	+	+
Prueba O/F	Aeróbica	Aeróbica
Crecimiento a 41 °C	-	-
Fluorescencia en medio King's	+	+
Producción de levano	+	+
Oxidasa	-	-
Pudrición blanda de papa	-	-
Arginina dihidrolasa	-	-
Hipersensibilidad en tabaco	+	+
Reducción de nitratos	-	-
Licuefacción de gelatina	-	-
Hidrólisis de la esculina	+	+
Hidrólisis de la arbutina	+	+
Producción de siringomicina	+	-
Utilización para el desarrollo:		
Manitol	+	+
Adonitol	-	-
Inositol	+	+
Sorbitol	+	+
Betaine	V	V
Trigonelline	+	+
Erythritol	+	+
Acido L láctico	+	+
Acido L tartárico	+	+
Tartrato	-	-
Arabinosa	+	+
Ribosa	+	+
Xilosa	+	+
Mannosa	+	+
Cellobiosa	-	-
Sucrosa	+	+
Rhamnosa	-	-
Maltosa	-	-

Discusión

En los cultivos de duraznero [*Prunus persica* (L.) Batsch] se reportan diferentes microorganismos que provocan marchitamientos vasculares, cánceres y muerte descendente, características de la enfermedad que se presentó en los municipios de Villamaría y Manizales (Caldas). Entre los hongos citados se encuentran los géneros *Leucostoma*, *Verticillium*, *Ceratocystis*, *Phomopsis* y *Botryosphaeria* (Gubler, 1995). No obstante, en la investigación realizada, no se encontraron crecimientos fungosos ni en cámara húmeda ni en las siembras en PDA. Entre las enfermedades bacterianas, se han mencionado como causantes las bacterias *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* Van Hall y *P. s.* pv. *persicae* (Prunier et al.) Young et al. (Hatting et al., 1989). En la observación microscópica, luego de realizada la tinción de Gram, las bacterias aisladas en este trabajo aparecieron de color rosa-rojo, indicando que la bacteria es Gram negativa, reacción característica, según Del Río & Saucedo (1997), de la mayoría de bacterias patógenas de plantas. De los aislamientos realizados fue obtenida una bacteria que formó colonias de color blanco-crema-brillante, circular, convexa y de margen entera. La bacteria resultó catalasa positiva según la reacción descrita por Shaad (1988), aeróbica; con un tipo de metabolismo estrictamente respiratorio y no fermentativo. Las bacterias P001 y Pst. presentaron una reacción negativa a la prueba arginina dihidrolasa, oxidasa, y reducción de nitratos (Schaad, 1980).

Por las características mencionadas y según la descripción de Goto (1992), la bacteria objeto del estudio pertenece al género *Pseudomonas*: Gram negativa, con forma de bastón recto o de varillas levemente curvas de 0,5-1,0 x 1,5-5,0 mm, móviles, con uno ó dos flagelos polares. Por ser una bacteria fluorescente en medio King's B, oxidasa negativa, arginina dihidrolasa negativa, no reduce nitratos, no se desarrolla a 41°C y no utiliza como fuente de carbono celobiosa ni ramnosa para su desarrollo, pertenece a la especie *syringae*.

De los cuatro patovares de *Pseudomonas syringae* que atacan a los frutales caducifolios, en duraznero solo se han reportado los patovares *syringae* y *persicae* (Hatting et al., 1989). Teniendo en cuenta el esquema de Shaad (1988), el aislamiento P001 se ubica en el patovar *syringae* por ser levano y β -glucosidasa positiva, la cual utilizó para su desarrollo como fuente de carbono: manitol, inositol, sorbitol, erythritol, trigonelline y no se desarrolló en presencia de adonitol ni tartrato.

El aislamiento de la bacteria P001 presentó las siguientes características LOPAT propuestas por Lelliott et al.

(1966): produce colonias tipo levano, es negativa para oxidasa, actividad pectolítica (ablandamiento de la papa) y arginina dihidrolasa, y elicitó hipersensibilidad en tabaco, como lo señala **Young** (1995) para el patovar *persicae*. Pero se diferencia de éste porque *Pseudomonas syringae* pv. *persicae* no produce β -glucosidasa ni la toxina siringomicina, además no utiliza para su desarrollo inositol, erythritol ni trigonelline.

Pseudomonas syringae pv. *syringae* produce la toxina siringomicina, la cual inhibe el desarrollo de los hongos *Geotrichum candidum* y *Rodothorula pilimanae* (**Lacovellis et al.** 1992). El patovar *persicae* también produce toxinas llamadas persicomocinas las cuales presentan antibiosis a *Bacillus thuringiensis* (**Barzic & Guittet**, 1996). El aislamiento de la bacteria P001 produjo la toxina siringomicina ya que inhibió el desarrollo del hongo *Geotrichum candidum*. La bacteria *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Pst) no inhibió el desarrollo del hongo, lo que indica que este patovar no produce la toxina siringomicina como lo indican **Lacovellis et al.** (1992).

La sintomatología de la enfermedad desarrollada por las plantas inoculadas consistió en secamiento de ramas, amarillamiento y flacidez de las hojas con su posterior caída, necrosamiento de ramas terminales y cánceres en los puntos de inoculación y exudados gomosos de color ámbar. Las pruebas de inoculación hechas a través de las ramas corroboran las observaciones de **Hatting & Roos** (1995) quienes indican que la bacteria *P. syringae* pv. *syringae* penetra por heridas hechas durante la poda, remoción de chupones y caída de hojas. Estos investigadores afirman que la bacteria *P. syringae* pv. *syringae* también puede colonizar la superficie foliar epifíticamente y luego trasladarse sistémicamente a través de la planta. No obstante, en las plantas inoculadas a través de las hojas solamente se presentó una quemazón típica de daño mecánico, sin repercusión vascular como ocurre por la acción de un microorganismo. Es posible que la bacteria permanezca en las hojas en forma epífita para luego entrar por heridas en tallos y ramas y trasladarse vía xilema como lo indica **Agrios** (2005).

Además, las observaciones de campo reportadas por los cultivadores indican que en épocas secas la enfermedad tiende a estabilizarse, lo cual coincide con lo reportado por **Hatting et al.** (1989), en el sentido que los períodos de lluvia, las temperaturas frías y la alta humedad incrementan la severidad de la enfermedad y favorecen la dispersión e infección de *P. syringae* pv. *syringae*.

El procedimiento metodológico desarrollado en esta investigación permitió obtener la información suficiente para el diagnóstico correcto del agente causante de la Muerte

descendente del duraznero, reportada en la región objeto del estudio. Aunque es el primer trabajo de identificación en Colombia, la bacteria seguramente está presente en las otras áreas de desarrollo del duraznero como Boyacá, Cauca y Santander, pero no causa los daños reportados debido a factores ambientales menos favorables a la bacteria.

Conclusiones

La sintomatología de la enfermedad reportada en los cultivos de duraznero de las variedades Newball, Sapote, Florida y Amarillo de los municipios de Villamaría y Manizales (Caldas), ha sido descrita como flacidez de las hojas, con posterior defoliación, secamiento de ramas y muerte de la planta. Las ramas presentan lesiones con aspecto de cáncer con exudados gomosos; al hacerles cortes transversales, se observa una coloración parda oscura, que va en forma descendente a través de ramas y tallos. En las pruebas de inoculación hechas a través de las ramas, la bacteria rápida y consistentemente expresó la sintomatología observada en campo: marchitamiento, clorosis en hojas seguida por necrosamiento y posterior caída de las hojas, cánceres en los tallos con exudados gomosos y daños vasculares.

Las pruebas patológicas, fisiológicas y morfológicas realizadas indicaron de manera consistente que la causa de la enfermedad conocida como Muerte descendente o Cáncer bacteriano en duraznero (*Prunus persica*) en los municipios de Villamaría y Manizales es la bacteria *Pseudomonas syringae* pv. *syringae*.

La bacteria se encontró asociada con la enfermedad y fue aislada de ramas y tallos donde se presentaba el avance de la enfermedad. La bacteria se purificó y se inoculó en plantas sanas, las cuales expresaron los mismos síntomas observados en el campo. Finalmente, la bacteria fue re-aislada de las plantas inoculadas y a las pruebas realizadas se encontraron las mismas características de la bacteria inoculada, cumpliendo así con los postulados de Koch.

Bibliografía

- Agrios, N. G.** 2005. Plant pathology. 5th edition USA . Elsevier Academic Press. 922 p.
- AGRONET.** 2009. Análisis estadísticos. Web site: www.agronet.gov.co: 13 may. 2011.
- Barzic, M. R. & Guittet, E.** 1996. Structure and activity of persicomocins, toxins produced by a *Pseudomonas syringae* pv. *persicae*/*Prunus persica* isolate. European Journal of Biochemistry **239**:702-709.
- Byther, R. S.** 1981. Bacterial canker of *Prunus*. Bulletin. Washington N° 1013. pp. 1-2.

- Campos, T. E.** 1993. Historia de los frutales caducifolios en Colombia. En: Sarmiento, A. S. y Naranjo, C. O. Editores. Frutales Caducifolios. Bogotá. Presencia. 7p.
- Del Río, L. & Saucedo, N.** 1997. III. Bacterias fitopatógenas. En: Manual para el diagnóstico de hongos, bacterias, virus y nematodos fitopatógenos. Castaño-Zapata, J. y Del Río, L. Editores. Centro Editorial Universidad de Caldas-Zamorano Academic Press 210 p.
- Goto, M.** 1992. Fundamentals of bacterial plant pathology. San Diego. Academic Press 342 p.
- Gross, D. C. & DeVay, J. E.** 1977. Production and purification of syringomycin, a phytotoxin produced by *Pseudomonas syringae*. *Physiological Plant Pathology* **11**:13-28.
- Gubler, W.D.** 1995. Cankers, blights, and wood rots. In: Ogawa, J. M.; Zehr, E. Y.; Ritchie, D. F. and Uyemoto, J. K. (editors). In: Compendium of Stone Fruit Diseases St. Paul, APS Press. Pp. 41.
- Hattingh, M. J.; Roos, M. I. & Mansvelt E. L.** 1989. Infection and systemic invasion of deciduous fruit trees by *Pseudomonas syringae* in South Africa. *Plant Disease* **73**(10):784-789.
- . 1995. Diseases caused by bacteria: Bacterial canker. In: Compendium of Stone Fruit Diseases St Paul. APS Press. pp. 48-50.
- Lacobellis, N. S.; Lavermicocca, P.; Grgurina, I.; Simmaco, M. & Ballio, A.** 1992. A. Phytotoxic properties of *Pseudomonas syringae* pv. *syringae* toxins. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **40**:107-116.
- Lelliot, R. A., Billing, E. & Hayward, A. C.** 1966. A determinative scheme for the fluorescent plant pathogenic pseudomonads. *Journal Applied Bacteriology* **29**:470-489.
- Molina, G.D., & Parra, G. T.** 2007. Producción de durazno en América Latina y Colombia. Semillero de Investigación de Economía. Internet: (www.geomundos.com/cultura/corpoচিতাগা/produccion-de-durazno-en-america-latina-y-colombia_doc_17071.html). Acceso: 02 May. 2009.
- Noval, C.** 1991. Bacterias. Manual de laboratorio. Diagnóstico de hongos, bacterias y nemátodos fitopatógenos. Madrid : Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Pp.113-275.
- Pachón, G.O. & Bridg, H.** 1993. Micropropagación *in vitro* del durazno blanco común (*Prunus persica* L.). *Agricultura Tropical (Colombia)* **30**(1):101.
- Shaad, N. W.** 1988. Laboratory guide for identification of plant pathogenic bacteria. 2 ed. St. Paul. Minnesota : American Phytopathological Society pp.60-68.
- . 1980. Laboratory guide for identification of plant pathogenic bacteria. Departament of Plant Pathology. University of Georgia. Pp. 60-77
- Tello, J., Vares, F. & Lacasa, A.** 1991. Manual de laboratorio. Diagnóstico de hongos, bacterias y nematodos fitopatógenos. Madrid. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Pp. 79-82.
- Young, J. M.** 1995. Bacterial decline. In: Ogawa, J. M.; Zehr, E. Y.; Ritchie, D. F. and Uyemoto, J. K. (editors). In: Compendium of Stone Fruit Diseases. St Paul APS. Pp. 50.

Recibido: febrero 18 de 2011.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

PERFIL SÍSMICO VERTICAL EN UN POZO DESVIADO PARA ILUMINAR UN RESERVORIO CON ESTRUCTURAS DE BAJO BUZAMIENTO USANDO ONDAS CONVERTIDAS

José Martínez¹, Ovidio Almanza², Luis Montes³

Resumen

Martínez, J., O. Almanza, L. Montes: Perfil sísmico vertical en un pozo desviado para iluminar un reservorio con estructuras de bajo buzamiento usando ondas convertidas. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 71-77, 2011. ISSN 0370-3908.

Después de entubar y cementar un pozo direccional exploratorio se decidió adquirir un perfil sísmico vertical (VSP) para mapear un reservorio iluminando la zona alrededor y debajo del pozo mediante ondas de cizalla (PS). Restricciones ambientales alrededor del pozo reducían las posibles geometrías de adquisición.

El objetivo principal del presente artículo es establecer y aplicar la metodología para definir la apropiada geometría de adquisición del registro sísmico vertical en pozos desviados, y seleccionar tanto los parámetros como la secuencia adecuada de procesamiento de datos VSP a fin de lograr una imagen con la cual mapear y delimitar lateralmente tope y base del yacimiento de hidrocarburos.

Con registros sísmicos y de densidad se construyó un sismograma sintético que amarró muy bien la sección sísmica migrada a lo largo de la trayectoria del pozo. En un modelo geológico 2D construido a partir de secciones sísmicas y registros sísmicos y densidad, se simuló un trazado de rayos, proveyendo iluminaciones con diferentes geometrías de adquisición y seleccionando aquella que conseguía mayor cobertura. Con el modelo geológico y la configuración óptima se generaron sismogramas sintéticos VSP que fueron posteriormente procesados. Se adquirió el VSP en configuración óptima y el procesamiento de sus datos con la misma secuencia usada en VSP sintéticos confirmó el modelo en profundidad, iluminando la zona de interés.

Palabras clave: registro sísmico vertical, VSP, trazado de rayos, sismograma.

¹ Schlumberger S. A., Bogotá.

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

³ Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Edificio Manuel Ancizar. Of. 326. Tels.: 316500-16539. Correo electrónico: lamontesv@unal.edu.co

Abstract

After cementing and casing a deviated well, the acquisition of a Vertical Seismic Profile (VSP) was considered in order to map a reservoir imaging the zone below and around the hole using shear waves (PS). Environmental restrictions on the area limited the possible survey geometries.

The main objective of this paper is to define and apply the methodology to select the appropriate VSP survey in a deviated well, and also establish the parameters and VSP data processing sequence to provide an image on which to map and delimit laterally the top and base of the hydrocarbon reservoir.

Using sonic and density logs, a synthetic seismogram was build and tied to a migrated seismic section along the well path. With ray tracing modeling, different geometrical surveys were simulated in a 2D geologic model build through sonic and density logs, providing several imaging scopes from which the optimal configuration was chosen. By simulating the optimal VSP survey in the 2D geologic model a synthetic VSP data set was supplied and processed. A VSP survey with the optimal configuration was run providing a data set that after processed with the same sequence applied to synthetic VSP data confirming the subsoil model and imaging the target zone.

Key words: vertical seismic profile, VSP, waves, ray tracing, seismogram.

Introducción

Los registros VSP han sido usados por la industria del petróleo desde el siglo pasado, suministrando únicamente imágenes de la onda acústica (P) ya que la herramienta correspondiente para adquirir onda de cizalla (S) solo se desarrolló recientemente. En yacimientos es frecuente que la respuesta de algunas litologías a la onda P no permita discernir los topes de las formaciones debido al bajo contraste de impedancia acústica. Una razón es que en el VSP con onda P la señal obtenida en la configuración de receptores y fuentes se atenúa por la doble trayectoria seguida por las ondas (descendentes y ascendentes), así como también que la conversión de tiempo profundidad se hace con velocidades estimadas lo que induce un porcentaje de error al amarrar el pozo con la sísmica. Sin embargo el mayor contraste de impedancia elástica provee una imagen de ondas de S que permite caracterizar el reservorio lo que ha incrementado su uso.

En caso de una geología compleja y una inadecuada geometría de adquisición es difícil el buen registro de ondas P y S, por lo que la planificada adquisición de un VSP y una secuencia apropiada de proceso de estos datos garantiza una imagen del subsuelo geológico más confiable.

Son pocas las publicaciones con información detallada de cómo adquirir y procesar ondas convertidas en registros sísmicos verticales, debido en parte a que dichas tareas las realizan compañías especializadas en este campo, como parte del “*know how*” corporativo. Sin embargo su

uso y los resultados que suministra son ampliamente tratados en los artículos relacionados con el tema, entre ellas hemos considerado algunas de interés por su relación con el presente trabajo.

Para suministrar información petrofísica para la evaluación de un yacimiento de carbonatos en Brasil se realizó un VSP con ondas convertidas en un pozo con una desviación de 50° en una cuenca offshore (Correa *et al.*, 2003). Un VSP en pozo desviado permitió discriminar un yacimiento de arenisca registrando ondas PS en un proyecto sísmico adquirido con cable sísmico sobre el fondo marino (OBC, *Ocean bottom Cable*). Un proyecto de sísmica multi-componente fue realizado para monitorear el desplazamiento de las burbujas de CO₂ durante el proceso de inyección del mismo gas en un reservorio de arenisca en el mar del Norte (Liu *et al.*, 2001). En el mismo trabajo se analizó la conversión de ondas tanto en superficie como en el registro sísmico vertical y la relación entre ellas.

Un trabajo similar al anterior, acerca de la conversión de ondas tanto en superficie como en pozo, es el presentado por Borland & Nakanishi (1997). El uso de ondas convertidas ha sido aplicado en la caracterización de formaciones geológicas tanto con información sísmica de superficie como con imágenes VSP con resultados muy confiables (Van Dok & Geiser, 1997; Zhang *et al.*, 1997). Para iluminar chimeneas de gas con ondas PS en un proyecto 3D-3C se adquirió un VSP a pasos (VSP walk away) que suministró una imagen más clara del yacimiento (Li *et al.*, 2010).

Para el caso concreto de este estudio, se perforó un pozo direccional con una desviación máxima de 40 grados donde se adquirieron registros de rayos gamma, caliper, sónico, densidad y resistivos. El pozo fue entubado, cementado y el cemento evaluado para asegurar su calidad y obtener una señal onda S con alta relación señal/ruido. La zona donde está localizado el pozo es muy sensible ambientalmente por lo que hay restricciones para ubicar la fuente en superficie. Los objetivos exploratorios son la definición de los topes de formación, la obtención de información por debajo del pozo, el cubrimiento lateral para delimitar la zona del reservorio y la calibración de la sísmica de superficie, para lo cual se requería registrar un VSP con ondas PS.

Se escogieron el intervalo entre receptores (GI) que evitara el “*aliasing*” espacial de las ondas S y la distancia fuente - boca (*offset*) del pozo buscando la mayor generación de las ondas convertidas. Se construyó un modelo 2D donde se simularon las adquisiciones y evitar la ocurrencia de ondas refractadas o de tubo. El conjunto de datos mostró un alto nivel de conversión P a S, con presencia de ondas ascendentes y descendentes debajo del pozo. Se adquirió un VSP de buena calidad cuyo proceso suministró imágenes que permitieron conseguir los objetivos de exploración.

Metodología

Usando un registro sónico y uno de densidad se generó un sismograma sintético que mostró un perfecto amarre con la imagen sísmica migrada (figura 1). Esto permitió crear un modelo geológico 2D en profundidad, basado en la línea sísmica interpretada que contiene la trayectoria del pozo. El modelo de 3200 m en la horizontal y 6000 m en la vertical permite simular la iluminación sísmica debajo de la máxima profundidad del pozo. Con el registro sónico se calcularon las velocidades de intervalo del modelo y debajo del pozo estas se estimaron. A lo largo de la trayectoria de pozo se ubicaron 90 geófonos, 70 con espaciado de 15 metros desde 3200 hasta 1900 metros y 20 geófonos con espaciado de 95 metros desde 1900 metros a superficie. Los 70 geófonos cubren la zona de interés para obtener una imagen importante del VSP y los 20 geófonos superiores, para completar el registro en todo el pozo, como lo muestra la figura 1.

Se simularon distintas geometrías de adquisición mediante trazado rayos de ondas PP y PS, colocando la fuente en diferentes sitios para determinar aquella con el mayor cubrimiento lateral del subsuelo. La figura 2 muestra la cobertura de ondas P con la fuente a 200m al SE del pozo.

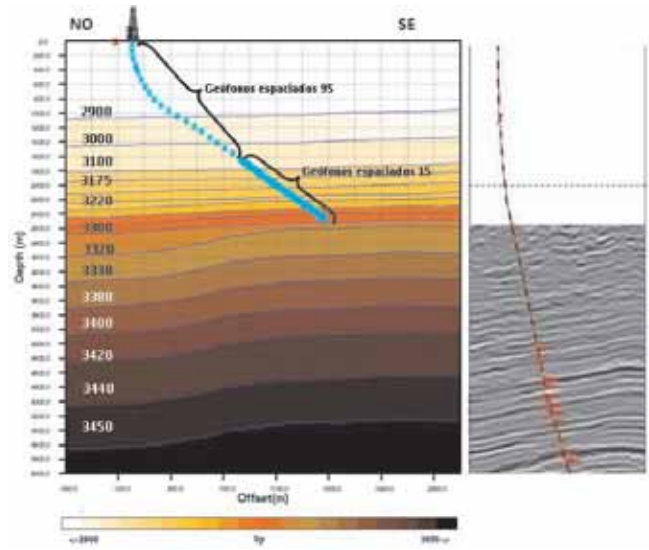


Figura 1. Modelo de velocidades en profundidad con la trayectoria del pozo desviado sobre la cual se observa la distribución de geófonos.

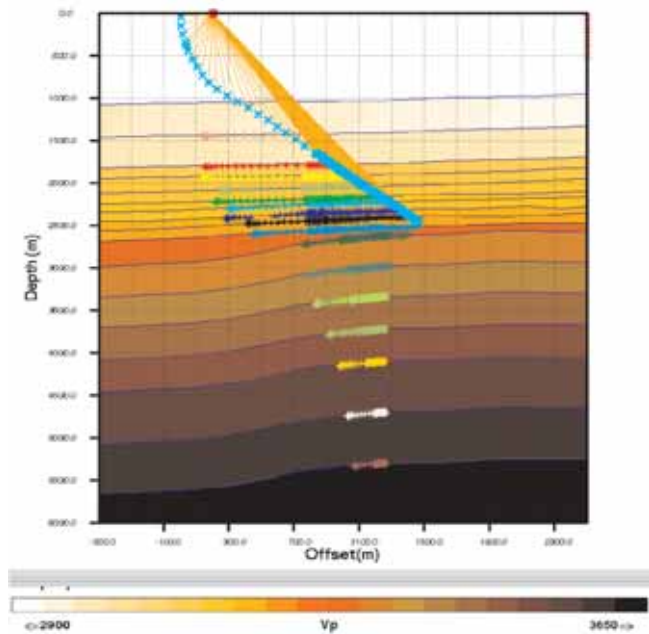


Figura 2. Mediante el trazado de rayos en el modelo se muestra la cobertura lateral sobre los reflectores, lograda con la onda P.

Los resultados determinaron que la fuente debe ser localizada 100m al NE del pozo para lograr un cubrimiento lateral de aproximadamente 800m, y en esta configuración se generó un registro VSP sintético. Con el modelamiento se observó que las ondas de tubo aparecían cuando la fuente estaba separada del pozo a una distancia menor de 60 m.

El procesamiento de este VSP sintético definió la secuencia a utilizar sobre los datos del registro VSP real que se adquirió en esa misma configuración.

La figura 3 muestra un VSP sintético con las ondas descendentes P y S con pendientes negativas y las ondas reflejadas ascendentes con pendiente contraria. La mayor densidad de datos se concentra en la zona de interés para mejor amarre con la sísmica de superficie, entre 1600 y 2400 m. Los datos VSP desde 0 hasta 1600 m se usaron para calcular las velocidades de intervalo. En el procesamiento de los VSP sintéticos, las ondas descendentes fueron separadas de las ascendentes usando un filtro de velocidades, mediante la deconvolución se eliminaron múltiples reflexiones y se incrementó el contenido de frecuencia de los datos para luego apilar y después migrar en tiempo para obtener una imagen VSP.

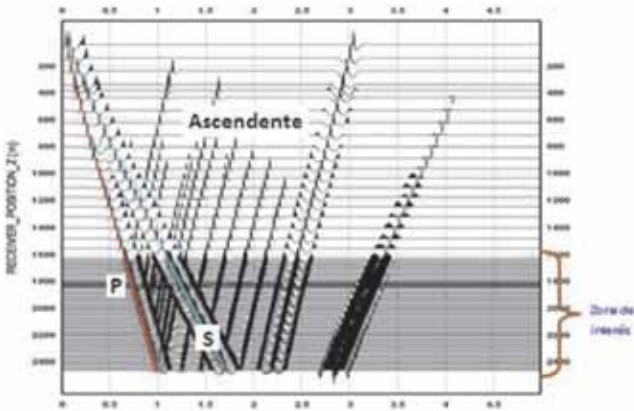


Figura 3. Registro VSP sintético generado en la configuración de adquisición óptima con mayor densidad en la zona de interés. Las ondas descendentes se ven inclinadas a la derecha y las ascendentes a la izquierda.

Estas etapas del proceso serán tratadas posteriormente en el procesamiento de datos VSP reales.

La imagen VSP sintética obtenida muestra un buen amarre con los principales reflectores en la sección sísmica migrada en tiempo a lo largo del pozo, como se observa en la figura 4, indicando lo apropiado del modelo geológico y garantizando buena cobertura de adquisición.

Se registró el VSP en el pozo revestido e incluyó 4 geófonos 3-axiales separados 15m entre sí. Se tomaron 70 niveles espaciados regularmente cada 15m desde el fondo hasta 1900m. De 1900m a la superficie, se tomaron 20 niveles de control no regularmente espaciados. Como fuente se usaron 2 cañones de aire sumergidos en una poza construida

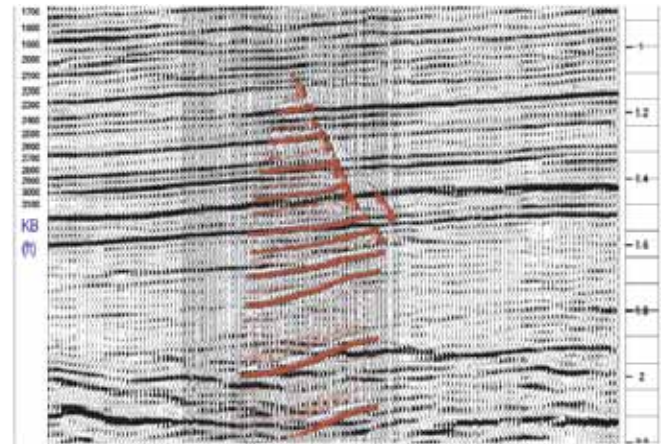


Figura 4. Imagen migrada del VSP sintético sobre la sección sísmica de superficie, con un buen amarre con los principales reflectores a lo largo del pozo.

con medidas y forma especiales. La onda de tubo se hace presente cuando la fuente está a menos de 60m del pozo revestido enmascarando la información. En el VSP no se observan ondas de tubo debido a que la fuente ubicada a 100m de la boca del pozo no propicia su presencia en el registro.

Procesamiento VSP

Mediante un filtro tipo *Notch* se eliminó un ruido de 60 Hz presente en los registros para después picar los primeros arribos. Se apilaron varios registros para mejorar la relación señal/ruido y luego se les aplicó un filtro Butterworth de 3^{er} orden. El ancho de banda entre 5 y 35 Hz se determinó mediante la transformada rápida de Fourier. Para retirar la atenuación de las ondas, se normalizaron a amplitud RMS en una ventana que contiene el primer arribo y la remoción del efecto de divergencia esférica se consiguió mediante una función de ganancia exponencial de la forma $t = T_0 \exp(1 + \beta)$ donde T_0 es el primer arribo, t es el tiempo de la muestra y el parámetro β fue ajustado a un valor de 1,2.

Las ondas descendentes (figura 5A) fueron separadas con un filtro *Mediana* que selecciona la mediana de una secuencia impar ordenada ascendente en una ventana de tiempo constante y mediante sustracción se obtuvo el campo ascendente observado en la figura 5B (Stewart, 1985). En datos VSP el filtro separa las ondas descendentes conservando las discontinuidades con un desempeño superior al filtro f-k (Chopra *et al.*, 2004). Se superpusieron las ondas ascendentes o reflejadas del registro VSP con las ascendentes del sintético y el buen amarre entre las dos reflexiones indica que las reflexiones registradas son ondas PS, como se ve en la figura 6.

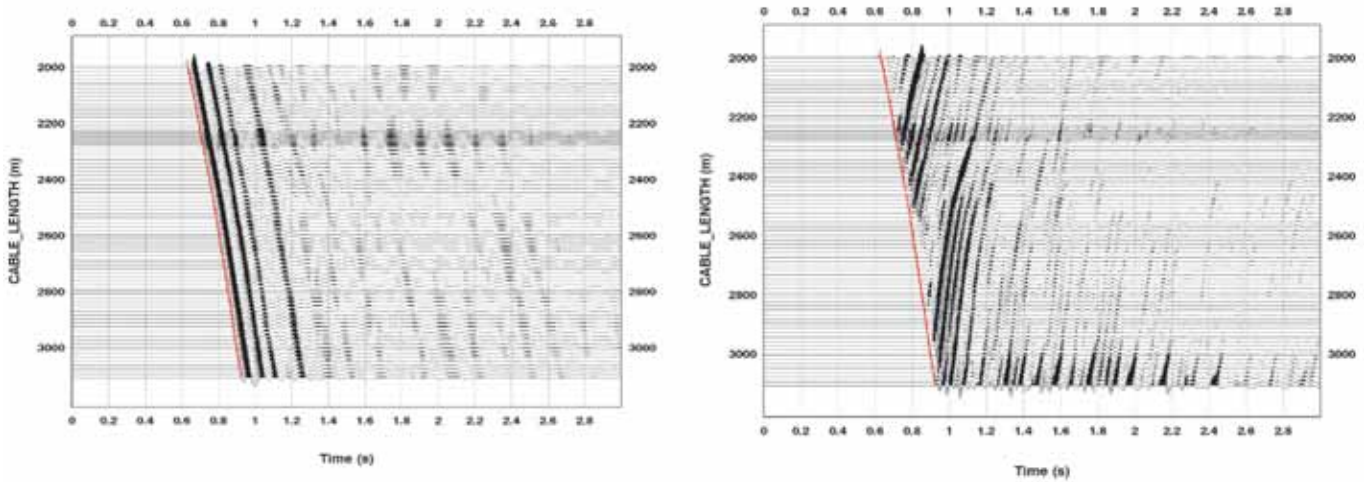


Figura 5. A) Campo de onda descendente y en B) el ascendente después de ser separados.

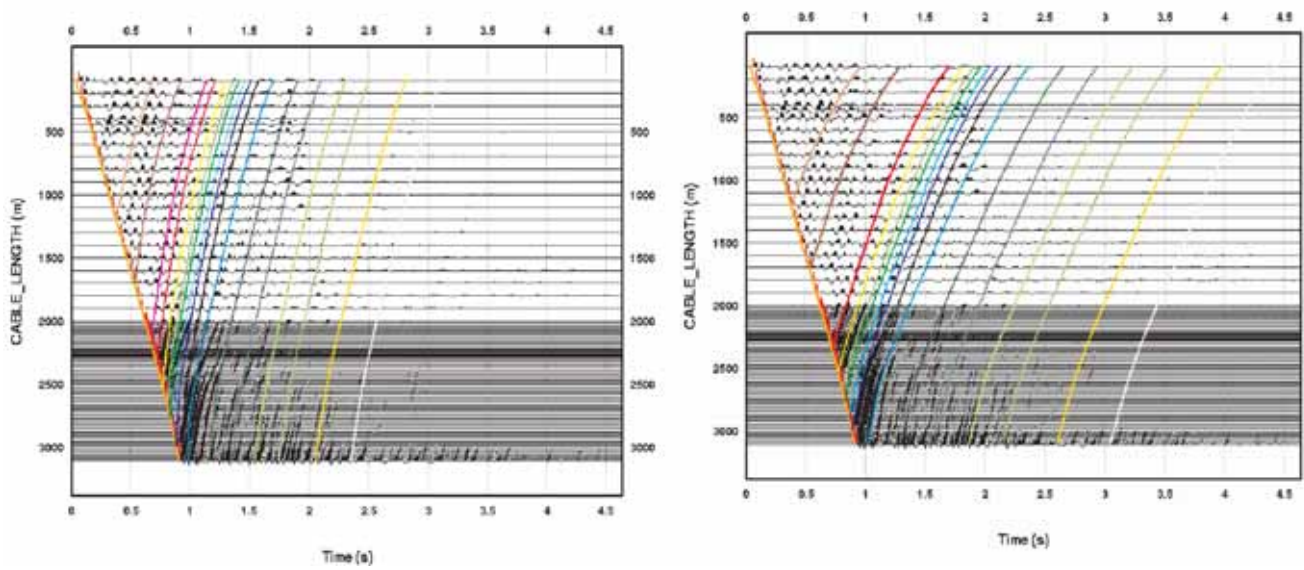


Figura 6. Se observa (A) una gran correlación entre las reflexiones PS reales con las PS sintéticas y (B) una pobre correlación entre las P reales y las P sintéticas.

La deconvolución mejoró la resolución temporal y eliminó múltiples presentes en el VSP, el resultado se observa cuando se compara la figura 5 con la figura 7, donde se evidencia en la segunda un mayor contenido de frecuencia y menos múltiples.

En la figura 8 se observan las trazas después de la deconvolución y dentro de las líneas paralelas el corredor con las trazas que se suman o apilan (*corridor stack*) para obtener una única traza, la cual se repite 10 para realizar los reflectores como se ve el cuadro a derecha en la figura 8.

La imagen apilada del VSP fue posteriormente migrada en tiempo.

Análisis de resultados

Un excelente ajuste entre los reflectores de la sección migrada en profundidad con los reflectores del sismograma sintético indica la validez del modelo geológico a lo largo del pozo construido a partir de registros sísmico – densidad. El amarre entre topes de formaciones identificados a lo largo del pozo con los reflectores visibles en la sección

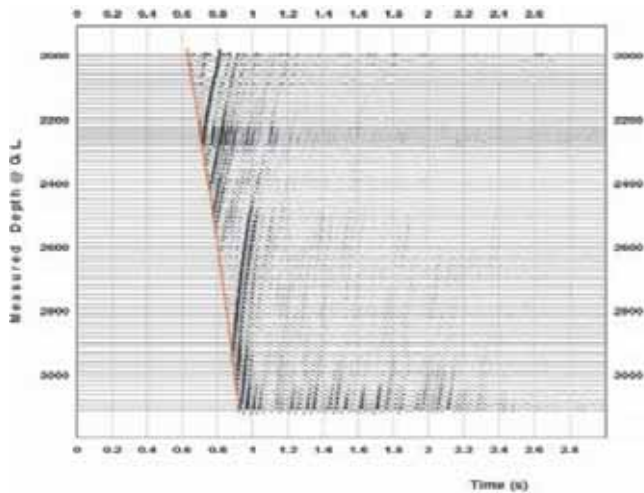


Figura 7. Ondas ascendentes después de la deconvolución, se observa un mayor contenido de frecuencias y menos reflexiones múltiples.

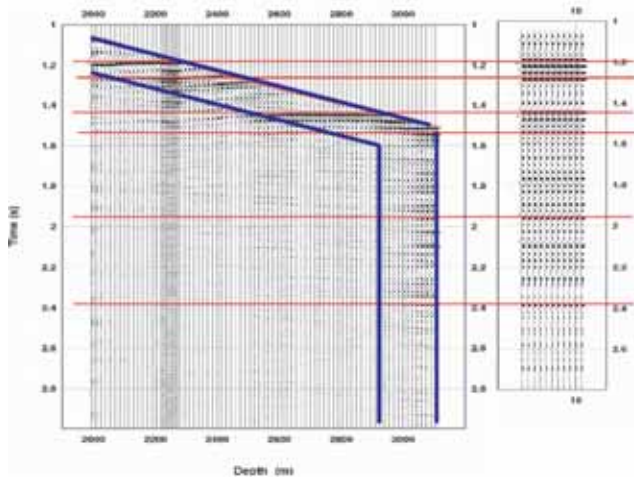


Figura 8. Dentro del recuadro las trazas de ondas ascendentes antes de apilar, la traza apilada al repetirse 10 veces realza los reflectores marcados con líneas.

sísmica migrada permite validar la precisión de los espesores (figura 1). Lo anteriores resultados definen un modelo geológico sobre el cual simulamos las adquisiciones con diferentes coberturas. Los reflectores en la imagen VSP sintética coinciden con los reflectores de la sección migrada, indicando que el modelo en la vecindad del pozo es acertado y por ende confiable la información del VSP (figura 4).

El buen ajuste observado entre los reflectores registrados en la componente Z y las reflexiones sintéticas tipo PS, así como la baja correlación entre la componente Z y reflectores sintéticos P, indican el alto contenido de energía convertida de la onda PS y el bajo contenido de energía en la

onda P, resultante del alto ángulo de desviación del pozo (figura 6).

Los anteriores resultados indican la validez del modelo geológico en la zona de interés, la garantía de registrar ondas PS en la componente Z en la configuración óptima y la adecuada secuencia de proceso de los datos VSP para obtener una imagen PS de la zona objetivo (figura 9).

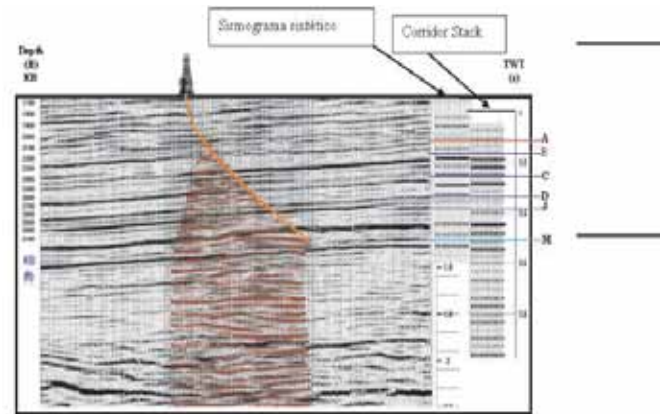


Figura 9. Sección sísmica migrada con imagen VSP superpuesta.

Conclusiones

Un pozo desviado define la geología del subsuelo, sin embargo solo a lo largo de su camino. Bajo incertidumbre este conocimiento se puede extrapolar al reservorio mediante correlación con una sección sísmica adquirida en superficie. Un VSP contribuye a disminuir esta incertidumbre y por ende el riesgo exploratorio.

En este artículo se presentó la metodología para reducir este riesgo, que incluye: Modelado con trazado de rayos para establecer la configuración fuente-receptores que consigue el mayor cubrimiento, registrando ondas PS en una zona objetivo con estructuras de bajo buzamiento que dificultan generación y registro. Definir la apropiada secuencia de procesamiento de ondas PS del VSP mediante el proceso de VSP sintéticos, producidos en configuración óptima. Aplicada a datos reales adquiridos en la configuración óptima, la secuencia de proceso suministró imágenes en profundidad de alta calidad, consistente con la información de pozo disponible y con el modelo geológico del subsuelo construido a partir de una sección sísmica migrada en profundidad y registros de pozo.

La comparación de ajuste entre reflexiones sintéticas y reflexiones reales, tanto para ondas P como PS, permitió

discernir que la información registrada en la componente Z correspondía a energía de onda convertida.

Como resultado final se iluminó la zona objetivo, extrapolando el conocimiento geológico al reservorio y por ende disminuyendo el riesgo exploratorio asociado.

Agradecimientos

Agradecimientos a la compañía Schlumberger por suministrar los datos VSP, las herramientas y el software usados en este proyecto. Al Geofísico Andre Khayan por el apoyo incondicional. Este artículo es un producto de la tesis de Maestría en Geofísica en la Universidad Nacional de Colombia por parte del Ingeniero José Martínez.

Bibliografía

- Borland, W. & Nakanishi, S.** 1997. Well Seismic Quicklooks - A Review. *Seismic While Drilling - Oilfield Review*, Summer 9(2):2-15.
- Chopra, S., Alexeev, V. & Lantaigne, J.** 2004. New VSP wavefield separation methods. *Canadian Society of Exploration Geophysicists National Convention. Great exploration – Canada and beyond* Pp. 1-5.
- Correa, F., Da Costa, E., Corti, E. & Moyano, B.** 2003. Using VSP in a directional well to help understanding of carbonate Banks in Pampo Field. 8th International Congress of the Brazilian Society.
- Da Costa, E., Oliveira, R., Escobar, D., Corti, E. & Foster M.** 2010. Offset VSP in a deviated well to support an OBC Project. *The Leading Edge*. Pp. 920-926.
- Li, Y., Chen, Y., Peng, J. & Jin, Q.** 2010. Walkaway VSP Multi-wave Imaging over a Gas Cloud Area., 72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2010. Barcelona, Spain, F036.
- Liu, E., LI, X.Y., Chadwick, A.** 2001. Multicomponent seismic monitoring of CO₂ gas cloud in the Utsira Sand: a feasibility study : Saline Aquifer Co₂ Storage Phase 2 (SACS2).
- Stewart, R.** 1985. Median filtering: review and a new f/k analogue design. *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicists* 1(1):54-63.
- Van Dok, R. & Gaiser J.** 2001. Stratigraphic description of the Morrow Formation using mode-converted shear waves: Interpretation tools and techniques for three land surveys” the leading edge. Septiembre.
- Zhang, Q., Stewart, R. & Sun, Z.,** 1997, 3D borehole seismic imaging and correlation– a field experiment. Presented at the 59th Ann. EAGE Mtg E048.

Recibido: febrero 18 de 2011.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

CONSERVACIÓN INTEGRAL DE *DICKSONIA SELLOWIANA* HOOK., EN BOGOTÁ D.C. Y SU ÁREA DE INFLUENCIA

René A. Alfonso-Moreno¹, Camilo Esteban Cadena-Vargas², Gustavo Morales³,
Nohora Peña⁴, Belkis Pérez⁵

Resumen

Alfonso-Moreno, R.A., C. E. Cadena-Vargas, G. Morales, N. Peña, B. Pérez: Conservación integral de *Dicksonia sellowiana* Hook., en Bogotá D.C. y su área de influencia. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 79-96, 2011. ISSN 0370-3908.

Dentro del programa integral de conservación del helecho arborescente *Dicksonia sellowiana*, se documentó la distribución espacial en Bogotá y su área de influencia mediante información consignada en herbarios regionales, en bases de datos de biodiversidad y recorridos de campo. Se estudiaron tres poblaciones elegidas por el estado de conservación, número de individuos (343) y fácil acceso; en cada población se midieron variables morfométricas de cada individuo y se construyó el modelo de distribución potencial de la especie bajo la consideración de nicho fundamental; se complementó el estudio con análisis de insectos invasores y de propagación. La especie se encuentra amenazada principalmente por factores antrópicos. Se proponen campañas de educación y propagación en medio natural para reintroducción y uso en programas de restauración ecológica en estadios avanzados.

Palabras clave: Dicksoniaceae, especie prioritaria, biodiversidad, *Dicksonia sellowiana*, modelo, distribución, conservación, Maxent.

Abstract

Within the *Dicksonia sellowiana* conservation program, the spatial distribution in Bogotá zone and its influence area was made, using information of regional herbaria, biodiversity data bases, and

Subdirección Científica, Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, Proyecto 2006.

1 Correo electrónico: armandoalfonsomoreno@yahoo.com

2 Maestría en Ciencias. Línea de Ecología. Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia. Correo electrónico: cecadena@gmail.com

3 Correo electrónico: gustavmorales@gmail.com

4 Correo electrónico: norapp1@gmail.com

5 Correo electrónico: belperezmar@hotmail.com

information in the field. Three populations were tested, selected because of the conservational state, number of individuals (343) and the facility in approach, and morfometric variables were considered for each individual. A model of potential distribution of the fern was made considering fundamental niche concept. Healthiness and propagation studies complemented the conservation work. *D. sellowiana* is in danger mainly for human factors and education and propagation in soil are good strategies for conservation of the fern using the young plants in ecological restoration programs.

Key words: Dicksoniaceae, priority specie, biodiversity, *Dicksonia sellowiana*, model, distribution, conservation, Maxent.

Introducción

El Jardín Botánico José Celestino Mutis en el marco de su proyecto “Conservación de la flora del bosque andino y páramo del Distrito Capital y la Región”, ha realizado investigaciones que buscan la conservación in-situ y ex-situ de especies vegetales vulnerables, para la protección de estos ecosistemas de montaña. Entre estos ecosistemas los bosques andinos y altoandinos han presentado mayores procesos de transformación (Cabrerá & Ramírez, 2007), lo que promueve la baja disponibilidad de hábitat y evolución de poblaciones viables de organismos.

Dentro de la gran diversidad existente en los bosques altoandinos, el grupo de los helechos, que hace parte de las criptógamas que según varios autores junto con las hierbas, bejucos y lianas pueden llegar a conformar entre el 3 y el 30% de la diversidad (Gentry, 1982) y cerca del 10% del total de especies de plantas vasculares (Grayum & Churchill, 1987 citado en Tuomisto & Poulsen, 1994).

Dicksonia sellowiana (Figura 1), es un helecho arborescente, perteneciente a la familia Dicksoniaceae que se distribuye desde el sur de México hasta Brasil y Uruguay en alturas entre los 60 m y los 3800 m. En Colombia está asociada a bosques marginales secundarios y subpáramos nublados entre los 1500 y 3800 m de altitud en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cauca, Cundinamarca, Huila, Magdalena, Nariño, Putumayo, Santander, Norte de Santander y Tolima (Murillo, 1988, Murillo & Harker, 1990), siendo conocida popularmente como palma boba, boba, aguaco o sarro en la Cordillera Central (Ramírez *et al.*, 2009). Puede llegar a medir hasta 10 metros de altura y tener frondas hasta de 4 metros de largo que cuando senescentes cubren el tallo como estrategia de conservación de humedad, los pecíolos son muy cortos (menores de 10 cm) cuando adultas y de hasta 60 cm cuando juveniles, pardos a pajizos, cubiertos con pelos amarillos a pardos y con soros 2-valvados, marginales.

Dicksonia sellowiana, está actualmente afectado en el país por la destrucción de habitats naturales, la deforestación, la competencia con especies foráneas, la disminución de sus poblaciones por el uso indiscriminado como sustrato para la siembra de otras plantas, como insumo para la fabricación de artesanías y por afectación de enfermedades provenientes de los cultivos cercanos a sus poblaciones, sin embargo, no se encuentra catalogada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en ningún grado de amenaza, según la resolución 383 del 23 de febrero de 2010 (MAVDT, 2010), por la cual se declaran las especies silvestres que se encuentran amenazadas en el territorio nacional, pero si se encuentra en el apéndice II de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES, 2008). Sumado a lo anterior, existe una información deficiente sobre su distribución y estado de conservación en Colombia.

El presente estudio tuvo como objetivo principal hacer un inventario de las poblaciones e individuos de *Dicksonia sellowiana* y establecer el estado de su conservación, conociendo su distribución potencial y su ciclo de vida mediante el seguimiento de las tasas de crecimiento de los tallos, las tasas de producción y senescencia de frondas, producción de esporas y reclutamiento. Este trabajo representa una contribución al conocimiento de la especie y propone estrategias para su manejo y conservación *in-situ* y *ex-situ*.

Materiales y métodos

Área de estudio

La distribución potencial se realizó en la zona con registros biológicos disponibles, sobre la cota altitudinal de los 2.000 m, en las cuencas hidrográficas de los ríos Negro, Guatiquía y Gachetá (tributarios del Orinoco), y Sumapaz, Bogotá y Negro (tributarios del Magdalena).

La zona se encuentra inmersa en la llamada Sabana de Bogotá, en la cuenca media del río Bogotá; presenta un



Figura 1. *Dicksonia sellowiana* en relicto de Bosque en la vía a Choachí, Cundinamarca, Colombia (Foto R. Alfonso)

gradiente altitudinal medio de 2920 m.s.n.m, una temperatura que oscila entre los 6-16°C, lo que favorece el desarrollo de ecosistemas y el crecimiento de vegetación arbórea y arbustiva que alberga gran variedad de especies herbáceas que sustentan una amplia gama de diversidad faunística. El área se caracteriza por presentar desde zonas planas hasta relieves fuertes y quebrados relacionados con pendientes que oscilan entre 12-25% constituidos principalmente por suelos fósiles con capas de gravilla y aportes de ceniza volcánica. Las zonas planas o ligeramente onduladas se ven representadas por el valle de la cuenca del río Bogotá y las cercanías a embalses como el Sisga, Chingaza, Chuza, Tominé, San Rafael y La Regadera entre otros.

La precipitación a lo largo de la zona fluctúa considerablemente ya que los valores varían entre los 400 y los 1500 mm dependiendo de la ubicación geográfica, lo que permite tener un valor promedio de 1000 mm.

Distribución potencial de la especie

Se recopilaron los registros biológicos de los herbarios COL (Instituto de Ciencias Naturales- Universidad Nacional de Colombia), JBB (Jardín Botánico José Celestino Mutis), IAvH (Instituto Alexander von Humboldt), Universidad Distrital, HPUJ (Herbario Pontificia Universidad Javeriana), Universidad de los Andes, Herbario de la Universidad de la Salle y datos procedentes del Sistema de Información en Biodiversidad (SIB 2009). Debido a que la mayoría de estos registros no contaban con coordenadas, se georeferenciaron siguiendo la información de la localidad de los ejemplares y su ubicación con gaceteros digitales.

Para la modelación se utilizaron las 19 coberturas de información bioclimática del presente de la base Wordclim (<http://www.worldclim.org/>) y se usó como máscara para los análisis el límite del área de estudio. En la modelación del nicho se utilizaron los datos de presencia de *Dicksonia sellowiana* en el software Maxent (Phillips *et al.* 2006), con 1.000 repeticiones y 10% en datos de entrenamiento.

Caracterización de la estructura de las poblaciones

Las áreas para la obtención de información primaria se escogieron previamente a través de información de los herbarios y de encuestas personales sobre la presencia de poblaciones de *D. sellowiana* y definidas después de un reconocimiento de la zona. Cada población se georeferenció en coordenadas planas y se determinó su altura sobre el nivel del mar.

Se decidió realizar el trabajo en tres poblaciones localizadas en bosques relictuales altoandinos, la primera al sur de la Sabana de Bogotá en el Municipio de Sibate, vereda San Fortunato (E0977787-N0983379) y que se denominó PCIDSP-1, otra al occidente de Bogotá en el Municipio de Subachoque, en la vereda Pantano de Arce en la Reserva El Tablazo (E0985541-N1046108) y que se denominó PCIDSP-2 y la tercera ubicada en la vereda Agua Dulce del Municipio de Choachí, al oriente de Bogotá (E1012339-N0996745) llamada PCIDSP-3.

La metodología utilizada para el estudio en campo y toma de datos de los individuos de poblaciones de *Dicksonia sellowiana* en Bogotá y su área de influencia se basó en la metodología para las caracterizaciones realizadas a la especie en la selva ombrófila del Estado de Santa Catarina (Mantovani, 2004) y estudios fenológicos y de crecimiento realizados en el sur de Brasil (Schmitt *et al.* 2009) y que consiste en la delimitación de unidades de muestreo de 20 x 40 m. Las áreas de muestreo se demarcaron semipermanentemente con pita plástica azul y con estacas de madera puestas cada 10 metros, dividiendo la unidad de muestreo en 8 subunidades de 10 x10 m (Figura 2). Se usaron 2

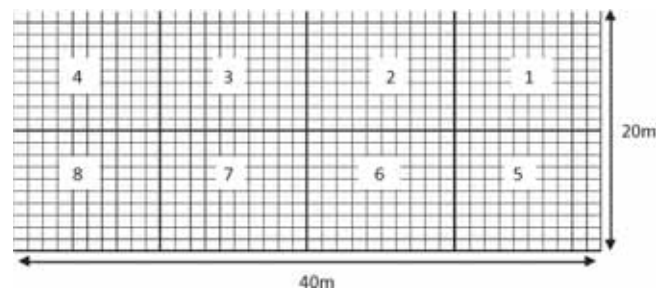


Figura 2. Formato de unidades muestrales de 20x40 m y divididas en 8 subunidades muestrales. (Florianópolis-SC, UFSC, 2004).

unidades muestrales teniendo en cuenta el tamaño del área o de la población.

Todas las plantas de *D. sellowiana* se contaron dentro de las subunidades muestrales y se les midió la altura comercial (altura hasta las primeras frondas muertas), el diámetro a los 80 cm de altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) en las plantas en que sea posible esta medida. A las plantas con altura inferior a 80 cm solo se midió la altura total (medida desde el suelo hasta donde están las primeras hojas verdes) (Figura 3). También se tomaron datos morfométricos de las frondas, tales como número de frondas en vernación (juveniles enrolladas), número de frondas maduras (solo frondas totalmente expandidas y con pinnas verdes), número de frondas senescentes (solo frondas con todas la pinnas secas), longitud del peciolo, longitud de la lámina, longitud total de la fronda (solo para frondas totalmente expandidas). Todas las variables se midieron por un periodo de 6 meses.



Figura 3. Mediciones tomadas en cada ejemplar de *D. sellowiana* (Foto: R. Alfonso)

Propagación *in-vitro*

Desinfección de explantes. Se emplearon esporas de soros maduros de individuos pertenecientes a la población PCIDSP-2, ubicada en la Reserva El Tablazo, vereda Pantano de Arce del Municipio de Subachoque a una altura de 3000 m. A las esporas se les aplicó el esquema de desinfección mediante centrifugado descrito en la figura 4, en el cual el empleo del hipoclorito de sodio se realizó bajo dos concentraciones 0.5% (T1) y 1% (T2).

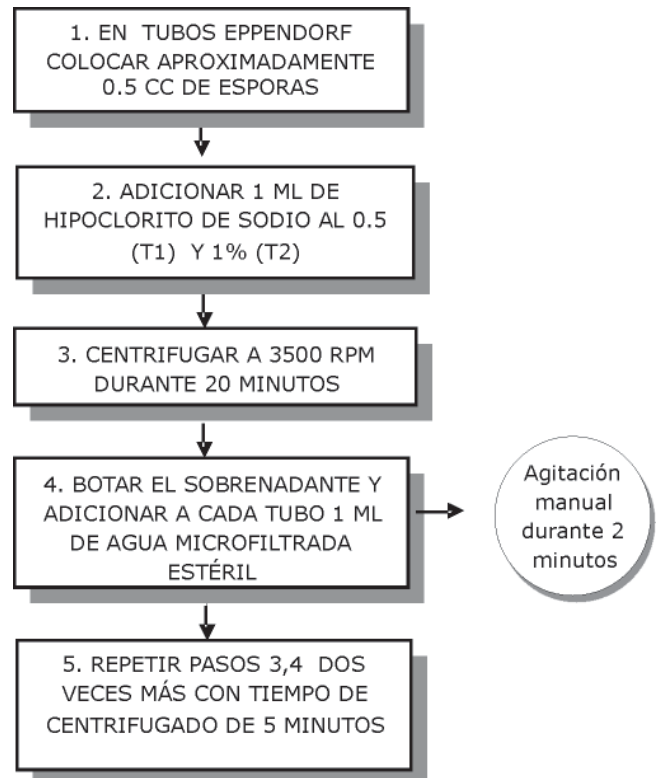


Figura 4. Metodología de desinfección para esporas de *Dicksonia sellowiana*.

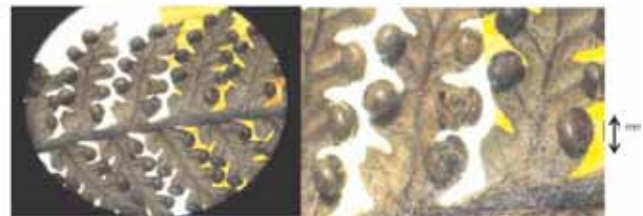


Figura 5. Fragmento de una fronda fértil de *Dicksonia sellowiana*. (Foto R. Alfonso).

Siembra de explantes en medios de cultivo. Se preparó el medio de cultivo MS para la siembra de esporas. Todos los componentes del medio de cultivo fueron pesados en una balanza analítica de precisión y disueltos en agua desionizada y microfiltrada. El medio de cultivo se dispensó en recipientes de vidrio con una capacidad de 100 ml, y a cada recipiente se le adicionaron 20 ml del medio. El pH del medio se ajustó a 5,8 antes de esterilizar en autoclave, a 15 libras de presión por pulgada cuadrada (15lb/in²) con una temperatura de vapor aproximada de 121.5°C durante 15 minutos.

Los tubos eppendorf con las esporas provenientes del proceso de centrifugado, se ingresaron a cabina aún con el

agua estéril del último enjuague y con el sobrenadante formado. Una vez allí el agua estéril y el sobrenadante fueron retirados y las semillas con la ayuda de una microespátula fueron tomadas y sembradas en el medio de cultivo MS.

Traslado de los frascos sembrados a sala de incubación. Los frascos una vez sembrados fueron llevados al cuarto de incubación donde se manejaron las siguientes condiciones ambientales:

Luz: Intensidad lumínica entre 1500 y 5000 lux.

Fotoperiodo: Natural de 12 horas luz 12 horas oscuridad.

Temperatura, entre 19 y 27°C como picos mínimos y máximos.

Humedad, entre el 60 y 80%.

Propagación en suelo

Se realizó el cultivo de esporas obtenidas a partir de frondas fértiles (Figura 5) de plantas adultas de la población PCIDSP-1, que se mantuvieron durante 1 semana en bolsa plástica sellada hasta infestación incipiente de hongos, luego de lo cual se sembraron los fragmentos en medio natural estéril constituido por tierra negra (40%), turba (40%), cascarilla de arroz (10%) y arena de río (10%) esterilizado en horno por una hora y colocado en la cámara de siembra y humedecido hasta saturación (Figura 6).



Figura 6. Substrato saturado de agua en el que se sembraron los fragmentos de fronda con esporangios. (Foto R. Alfonso).

Resultados y discusión

Distribución potencial de la especie

El nicho potencial de *Dicksonia sellowiana* se encontró al oriente, el suroccidente y el noroccidente del área de

estudio. Se extiende parcialmente en los municipios de Arbeláez, Bogotá D.C., Cajicá, Cáqueza, Chía, Chipaque, Choachí, Cota, El Rosal, Facatativa, Fosca, Granada, Gutiérrez, La Calera, Pacho, Pasca, San Antonio del Tequendama, San Bernardo, San Francisco, Sibaté, Silvania, Soacha, Sopo, Subachoque, Supatá, Tabio, Tenjo, Ubaque, Une, Venecia, Zipacón y Zipaquirá. (Figura 7).

Los resultados de omisión y predicción de *Dicksonia sellowiana* indicaron que un pequeño porcentaje de la omisión de las muestras de prueba se ajusta a la tasa esperada. En cuanto a la sensibilidad se muestra que los datos de entrenamiento se ajustan al total de datos.

Las variables más útiles para estimar la distribución potencial de la especie fueron: Precipitación del mes más seco, Temperatura media diurna, Precipitación del cuarto más seco y Precipitación del cuarto más frío.

La distribución potencial de *Dicksonia sellowiana* se encontró en los sectores externos del altiplano cundiboyacense y de las zonas de mayor altitud como las formaciones orográficas de los Cerros Orientales de Bogotá y Subachoque, hasta lugares de menor altitud. Esta distribución concuerda con zonas muy heterogéneas de bosques andinos, altoandinos y zonas de cultivo (Rodríguez *et al.* 2004), por lo cual es importante analizar el conjunto de áreas predichas para reconocer la amenaza bajo la que puede estar la especie por cambio de uso de suelo. Su extensión potencial total de 1215.5 km² se encuentra por fuera de áreas de conservación nacional, y a nivel regional podría estar en figuras de protección como Cuchilla El Chuscal, Salto del Tequendama y Cerro Manjui, y Peñas del Aserradero. Debido a esto es necesario promover estrategias de manejo específicas en los lugares donde se ubican poblaciones de este helecho y emprender programas de restablecimiento en áreas protegidas potenciales.

La modelación arrojó un valor de área bajo la curva (AUC) igual a 0.9 para el conjunto de los datos. El bajo ajuste de los datos de entrenamiento a la omisión predicha pudo deberse a la existencia de autocorrelación entre los datos, además que los grupos de datos de entrenamiento y modelación no son independientes. Algunos registros no reflejan la distribución potencial, lo que podría estar indicando diversidad intraespecífica que debe ser analizada taxonómicamente.

En cuanto a las variables que mejor expresan el modelo resaltan algunas relacionadas con valores de precipitación, esto coincide con información que relaciona la esporulación de *D. sellowiana* con los picos de precipitación (Ramírez-Valencia *et al.* 2009).

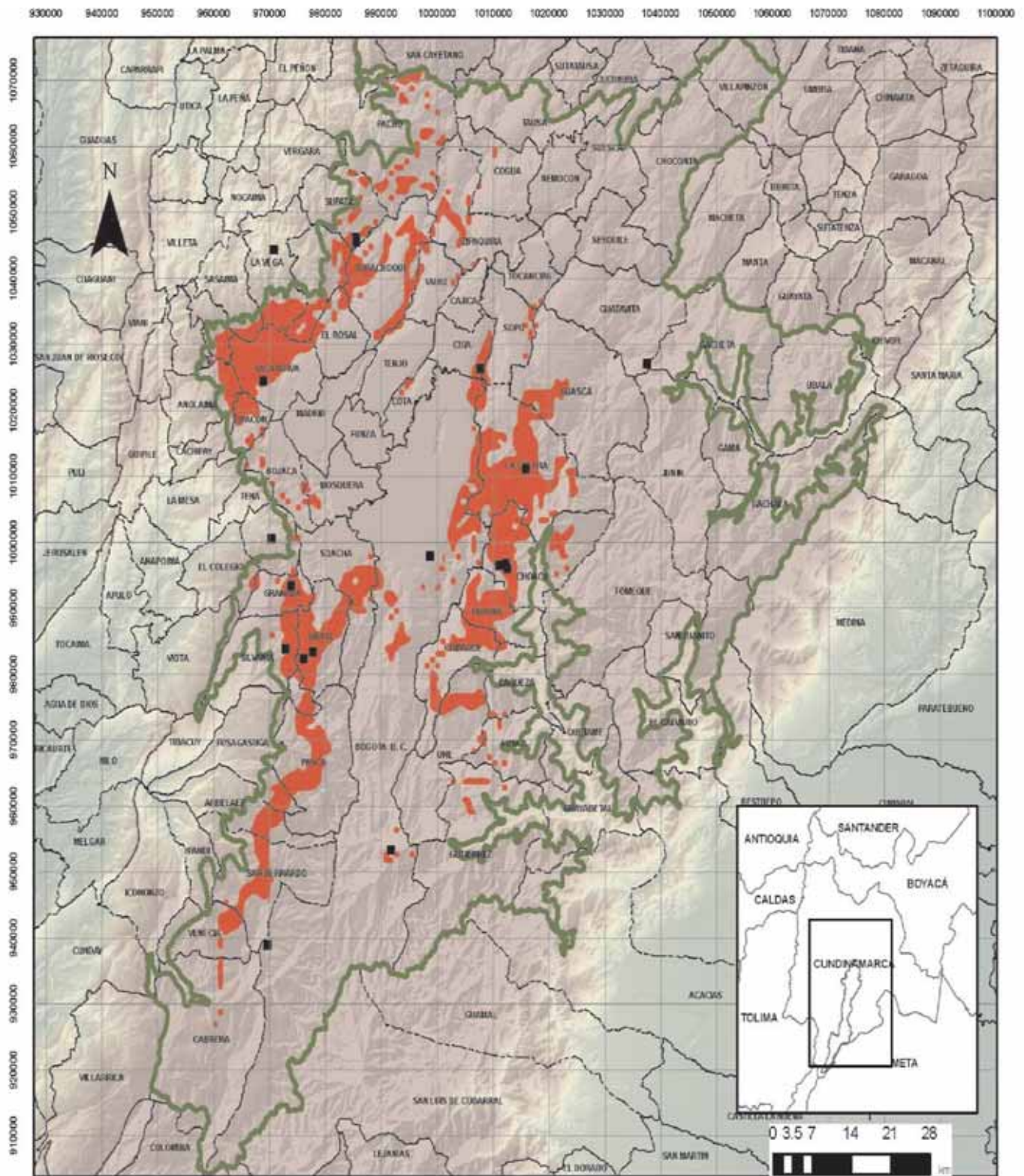


Figura 7. Distribución potencial *Dicksonia sellowiana* (rojo), registros biológicos (cuadrados), límite área de estudio (línea verde). La distribución final se restringió al considerar el de Minimum training presence (0,512) hasta el mayor valor de probabilidad.

Estructura poblacional

Las poblaciones de *Dicksonia sellowiana* estudiadas, presentaron características fisonómicas y de paisaje específicas para cada una, la población PCIDSP-1 ubicada en la finca Llantenal, en la vereda San Fortunato en el municipio de Sibaté se encuentra inmersa en relictos de bosque andino y en la ronda de quebradas entre los 2800 y 2900 m, rodeados de potreros utilizados por los pobladores para el cultivo de papa, fresa y el pastoreo de ganado de leche (Figura 8). La diversidad florística se ve enriquecida por la presencia de *Chusquea* sp., *Podocarpus oleifolius* D. Don ex Lamb., *Vallea stipularis* L. f., *Verbesina crassiramea* S.F. Blake y *Xylosma spiculifera* (Tul.) Triana & Planch. como elementos emergentes y sotobosque de varios estratos con predominio de bejucos como *Mutisia clematis* L. f. y *Rubus* spp. Otras especies de importancia en el sotobosque y ecotonos fueron *Barnadesia spinosa*, L. f. *Cyathea caracasana* (Klotzsch) Domin, *Cyathea conjugata* (Spruce ex Hook.) Domin, *Dryopteris wallichiana* (Spreng.) Hyl., *Fuschia boliviana* Carrière, *Geranium* sp., *Miconia squamulosa* Triana, *Oreopanax floribundum* Decne. & Planch., *Plagiogyria semicordata* (Pr.) Christ y varias especies de rubiáceas.

La población cuenta con 46 individuos que van desde acaules hasta alturas de cerca de 6 m. Durante los seis meses de medición esta población presentó entre el 56% y el 65% de plantas agrupadas en la primera categoría o de plantas con alturas entre 0 y 1 m (Figura 9), con un máximo de altura de 6,2 m, los ejemplares de esta población incrementaron su altura en promedio 8 cm año⁻¹ con mínimo de 0 cm y máximo de 80 cm. En el periodo de toma de datos 18 individuos no crecieron en altura. Solo 18 individuos tuvieron altura superior o igual a 80 cm con una tasa



Figura 8. Aspecto general del relicto de bosque donde se ubica la población PCIDSP-1. (Foto R. Alfonso).

promedio de ensanchamiento del tallo negativa de -0,053 cm mes. Un total de quince individuos presentaron DAP superior a 10 cm, con máximos a la altura del pecho de 25,78 cm y de diámetro a 80 cm un máximo de 29,6 cm. Entre el 61% y 68% de los ejemplares medidos entre agosto de 2009 y febrero de 2010 se agruparon en la primera categoría de 0 a 5 cm de diámetro con un segundo grupo de abundancia relativa alta (20% a 24%) con DAP entre 15 y 20 cm (Figura 9).

Durante todo el tiempo de observación, se generaron frondas nuevas en el 86,97% de los individuos medidos y tan solo en el 13,04% no se presentó ninguna vernación, en febrero de 2010 fue en el mes en que mas frondas en vernación se presentaron (112) en el 78,26% de las *Dicksonia* de la población y en agosto solo el 38,9% de los individuos, lo que coincidió con el inicio atípico de la temporada de lluvias. Se produjeron en promedio 1,28 frondas nuevas por individuo al mes, lo que indica una producción de 15,36 frondas nuevas por año. La generación de frondas en vernación o frondas nuevas fue irregular con máximos en 9,

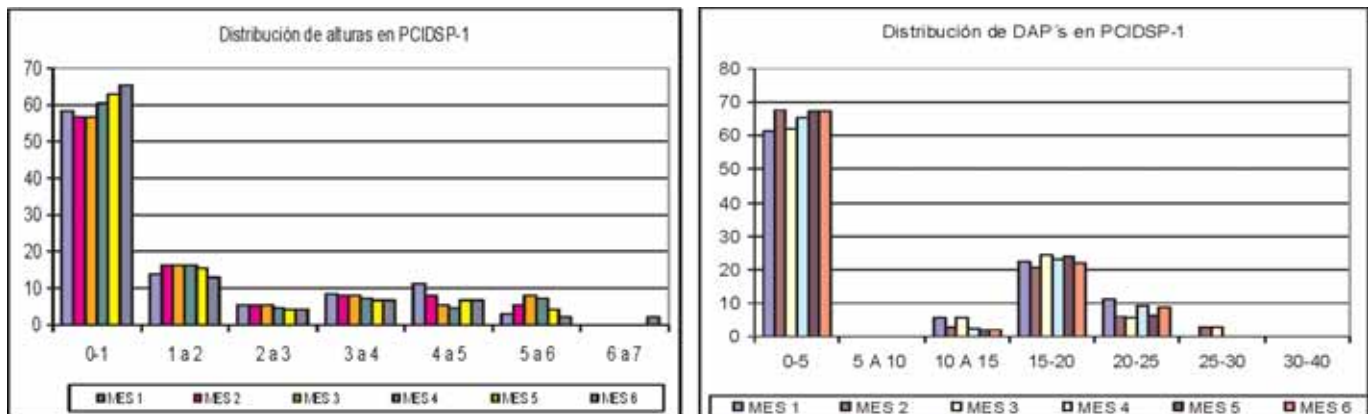


Figura 9. Distribución de las variables altura total y DAP de *Dicksonia sellowiana* en la población PCIDSP-1.

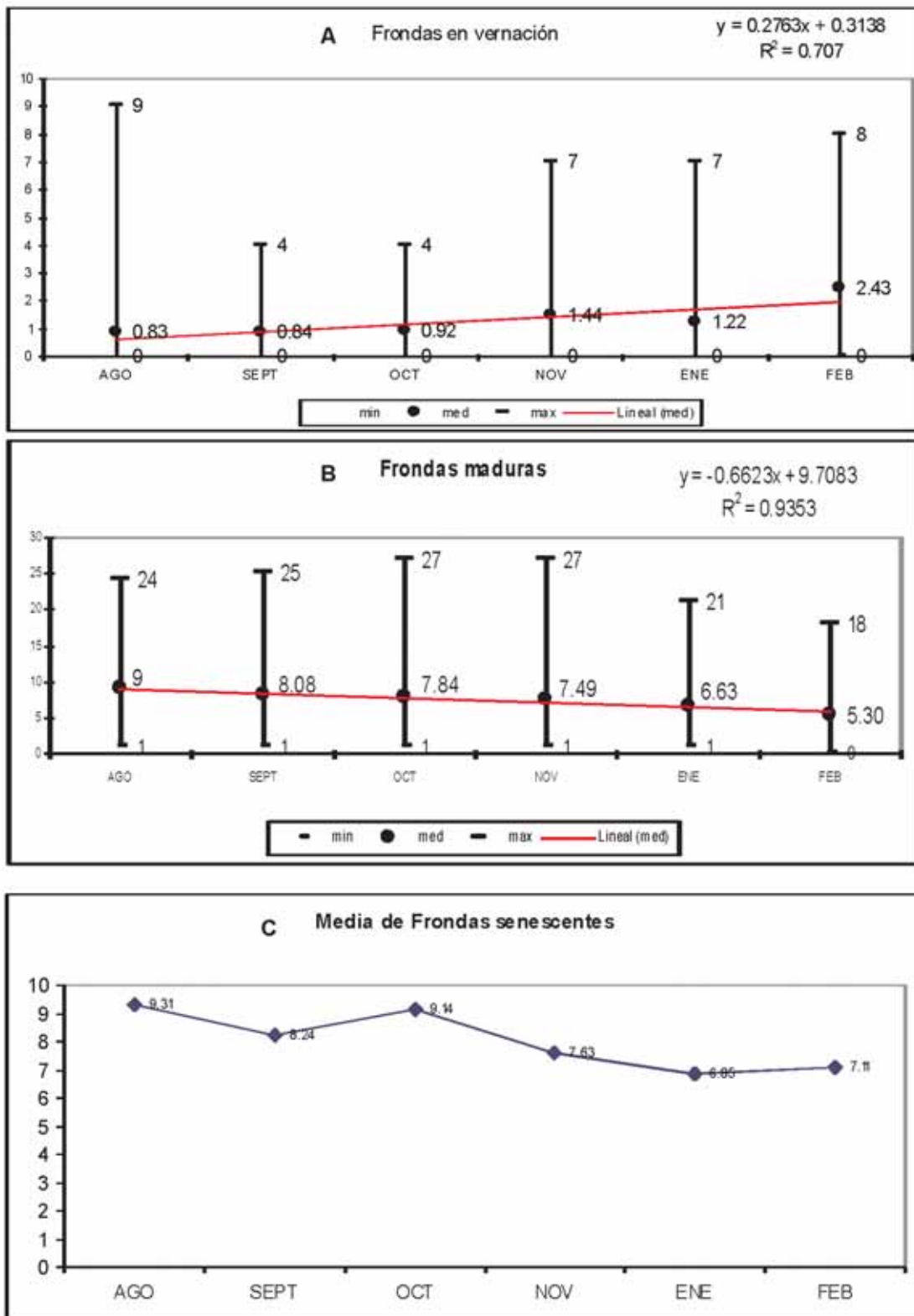


Figura 10. Medias, máximos y mínimos de frondas nuevas (A), maduras (B) y senescentes (C) de *Dicksonia sellowiana* en la población PCIDSP 1.

con crecimiento promedio mensual hasta febrero donde se presentaron 2,43 frondas en vernación (Figura 10 A). Los ejemplares de esta población presentaron un máximo 27 frondas maduras por individuo y un mínimo de 0, con regularidad en el número de frondas en la población durante los meses de las mediciones (Figura 10 B). La senescencia de las frondas se presentó con mayor abundancia en las plantas mayores y más altas, en las que se contabilizó siempre un número mayor a 20; lo anterior se presentó en 12 individuos (el 26,08%) del total de individuos de la población; en agosto se presentó la media mas alta y disminuyó a medida que se acercó la época de lluvias en el mes de febrero (Figura 10 C). La longitud total de fronda tuvo un máximo de 4,56 m con lámina de 4,43 m y peciolo de 0,18 m con una tasa de crecimiento mensual de 1,5 cm.

La población PCIDSP-2 se ubica en la Reserva El Tablazo, vereda Pantano de Arce del Municipio de Subachoque a una altura de 3000 m. Esta población se encuentra en un bosque altoandino de niebla con alto grado de conservación (Figura 11) y dominado por *Brunnelia* sp., *Centronia* spp., *Clusia* sp., *Drymis* sp., *Macleania rupestris* (Kunth) A.C.Sm., *Miconia* spp., *Oreopanax floribundus* Decne. & Planch., *Schefflera* sp. y *Tibouchina lepidota* Baill. El sotobosque está compuesto principalmente por individuos de *Blechnum cordatum* (Desv.) Hieron., *Cestrum nocturnum* L., *Cyathea caracasana* (Klotzsch) Domin, *Deprea bitteriana* (Werderm.) Sawyer & Benitez, *Dryopteris wallichiana* (Spreng.) Hyl., *Greigia stenolepis* L.B.Sm., *Hedyosmum bonplandianum* Kunth, *Piper* sp., *Plagiogyria semicordata* (Pr.) Christ, *Solanum* spp., *Swallenochloa tessellata* (Munro) McClure y *Verbesina crassiramea* S.F. Blake entre otros.

La población PCIDSP 2 está conformada por 258 individuos de los cuales cerca del 99% se agruparon en el primer rango de altura, es decir de 0 a 1 m y menos del 1% entre los rangos de 1 m a 2 m y de 2 m a 3 m (Figura 12), con un



Figura 11. Aspecto general de la población PCIDSP-2. (Foto R. Alfonso).

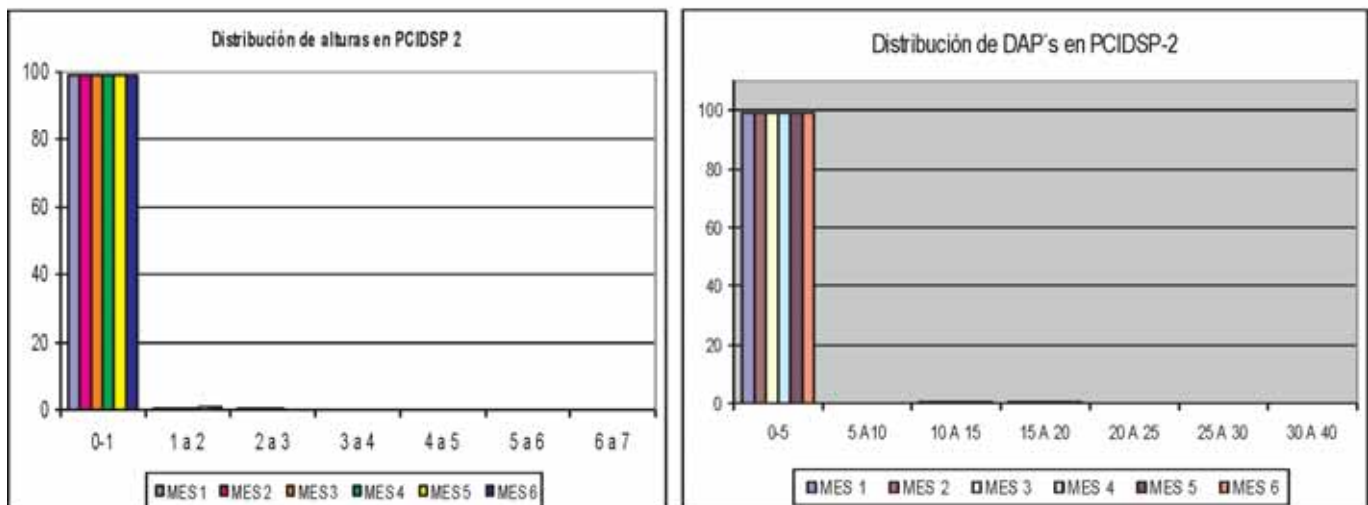


Figura 12. Distribución de las variables altura total y DAP de *Dicksonia sellowiana* en la población PCIDSP-2.

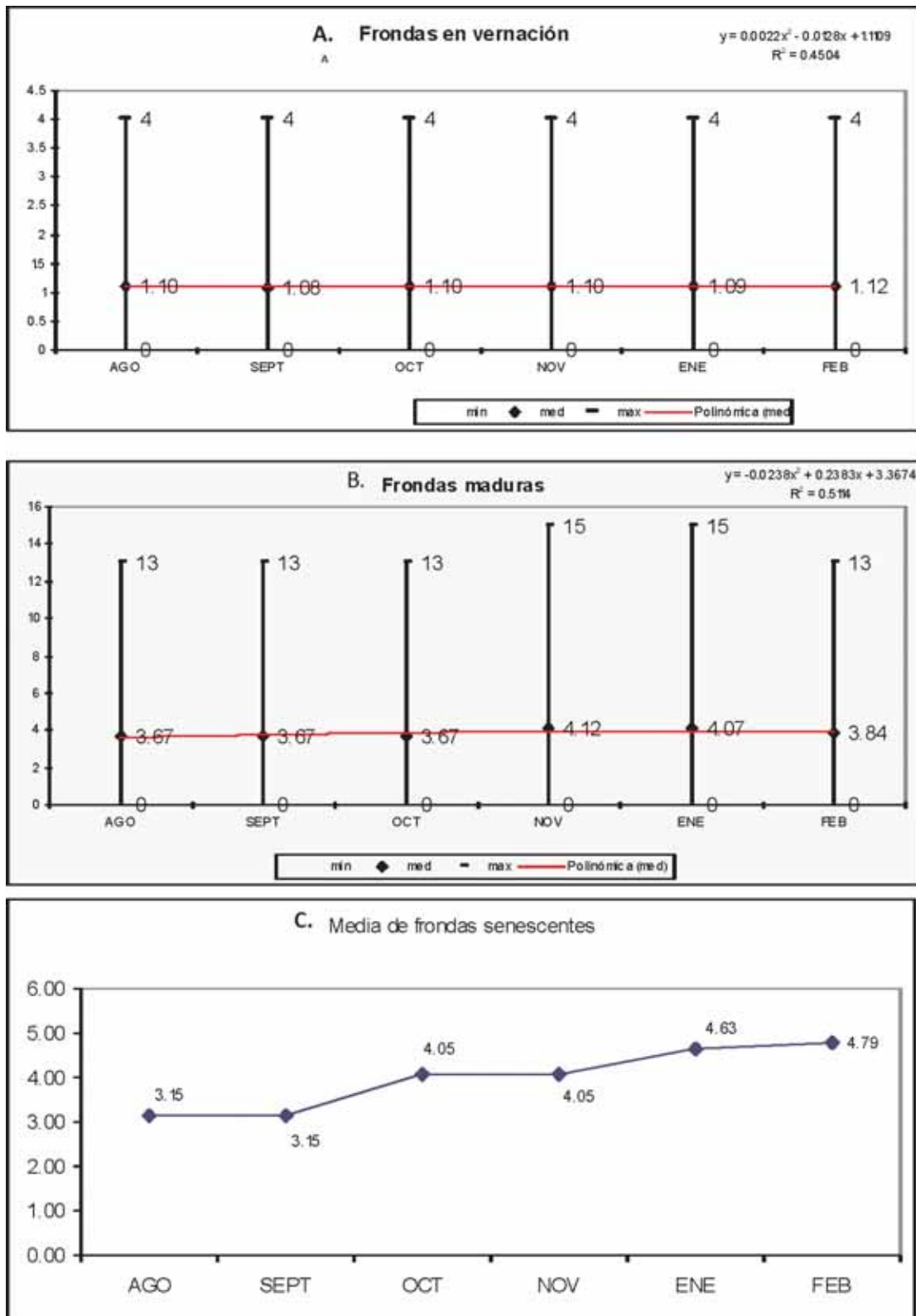


Figura 13. Medias, máximos y mínimos de frondas nuevas (A), maduras (B) y senescentes (C).

máximo de altura de 2,15 m. Los ejemplares de esta población incrementaron su altura en promedio 4 cm año⁻¹ con mínimo de 0 cm y máximo de 75 cm. En el periodo de toma de datos, 123 (47,67%) individuos no crecieron en altura, 50 (19,38%) ejemplares crecieron negativamente disminuyendo la altura promedio total y en el 32,95% (85 individuos) presentaron crecimiento positivo. Tan solo 3 individuos tuvieron altura superior o igual a 80 cm, con un máximo de 18,62 cm de diámetro y una tasa promedio de ensanchamiento del tallo de 1 cm/mes. Dos individuos presentaron DAP superior a 10 cm, con máximo de DAP de 16,23 cm; el 99,22% de la población presentó DAP menor de 5 cm (Figura 12).

En el tiempo de observación se generaron frondas nuevas en el 95% de los individuos medidos y tan solo en el 5% no se presentaron hojas jóvenes aún no desenvueltas (esto es, con vernación circinada observable); febrero de 2010 fue en el mes durante el cual se observaron más frondas aún no desenvueltas (288) en el 83,33% de los individuos y en agosto en el 82,94% de los individuos, lo que indica un comportamiento muy parecido en los meses de medición, el mayor número de frondas nuevas en febrero de 2010 coincidió con el inicio atípico de la temporada de lluvias. Se produjeron en promedio 1,09 frondas nuevas por individuo al mes, lo que indica una producción de 13,19 frondas nuevas por año. La generación de frondas en vernación o frondas nuevas fue muy regular con máximos en 4, con crecimiento promedio mensual igual en todos los meses (Figura 13a). Los ejemplares de esta población presentaron un máximo de 15 frondas maduras por individuo y un mínimo de 0, con regularidad en el número de frondas en la población durante los meses de las mediciones (Figura 13b). La senescencia de las frondas se presentó con mayor abundancia en las 29 (11,24%) plantas de mayor edad y en las más altas en las que se contabilizó un número mayor a 10; se observó un crecimiento constante de la media a medida que se acercó la época de lluvias en el mes de febrero (Figura 13c). La longitud de fronda tuvo un máximo de 2,75 m, correspondiente a 1,45 m de lámina y 1,30 m de peciolo; la fronda presentó una tasa general promedio de crecimiento mensual de 1 cm. de *Dicksonia sellowiana* en la población PCIDSP 2.

La población PCIDSP-3, ubicada en el predio La Esquina, vereda Agua dulce, municipio de Choachí, está localizada cerca a los 3000 m, rodeada de potreros para ganado de leche y en un relicto de bosque altoandino con *Brunellia colombiana* Cuatrec., *Centronia* sp., *Clusia multiflora* Kunth, *Critoniopsis* sp., *Drimys granadensis* L. f., *Prunus buxifolia* Koehne, , *Weinmannia balbisiana* Kunth (Figura 14). En el sotobosque predomina la presencia de



Figura 14. Aspecto general de la población PCIDSP-3. (Foto R. Alfonso).

Lophosoria quadripinnata (J.F.Gmel.)C.Chr., *Nastus chusque* Kunth, *Pennisetum longistylum* var. *clandestinum* (Hochst. ex Chiov.) Leeke y *Pteridium aquilinum* (Kaulf.) Brade.

La población PCIDSP 3 está conformada por 39 individuos de los cuales cerca del 54% se agruparon en el primer rango de altura, es decir de 0 a 1 m, seguido por porcentajes entre el 20 y 39% en alturas entre 3 y 4 m y menos del 5% se midieron en el rango de 4 m a 5 m; no se presentaron alturas superiores en la población (Figura 8). Con una altura máxima de 4.68 m, los ejemplares de esta población incrementaron su altura en promedio 6 cm año⁻¹ con mínimo de 0 cm y máximo de 45 cm. En el periodo de toma de datos, 21 (53,85%) individuos no crecieron en altura, 5 (12,82%) ejemplares crecieron negativamente y en el 33,33% (13 individuos) presentaron crecimiento positivo. Dieciocho individuos tuvieron altura superior o igual a 80 cm, con un máximo de 33,74 cm y una tasa promedio de ensanchamiento del tallo de 1.4 cm mes. De toda la población, solamente un individuo presentó un DAP superior a 30 cm con un máximo 38,20 cm; al final de las mediciones el 41,03% de los individuos presentaron DAP superior a 15 cm. Ningún individuo obtuvo valores de DAP entre 5 y 15 cm y el 56,41% del total tuvieron DAP entre 0 y 5 cm (Figura 15).

En el tiempo de observación, se generaron frondas nuevas en el 74,36% de los individuos medidos y en el 25,64% no se presentó ninguna vernación. Febrero de 2010 fue el mes en que más frondas en vernación se presentaron (60) en el 56,41% de las *Dicksonias* de la población, seguido por la vernación en septiembre de 2009, cuando se presentaron 53 frondas nuevas en el 66,7% de la población; en agosto se presentaron 44 frondas nuevas en el 61,9% de la población; el mayor número de frondas nuevas en febrero de 2010 coincidió con el inicio atípico de la temporada de lluvias. Se produjeron en promedio 1,38 frondas nuevas por individuo al mes, lo que indica una producción de 16,53 frondas nuevas por año en la población. La generación de frondas en vernación o frondas nuevas

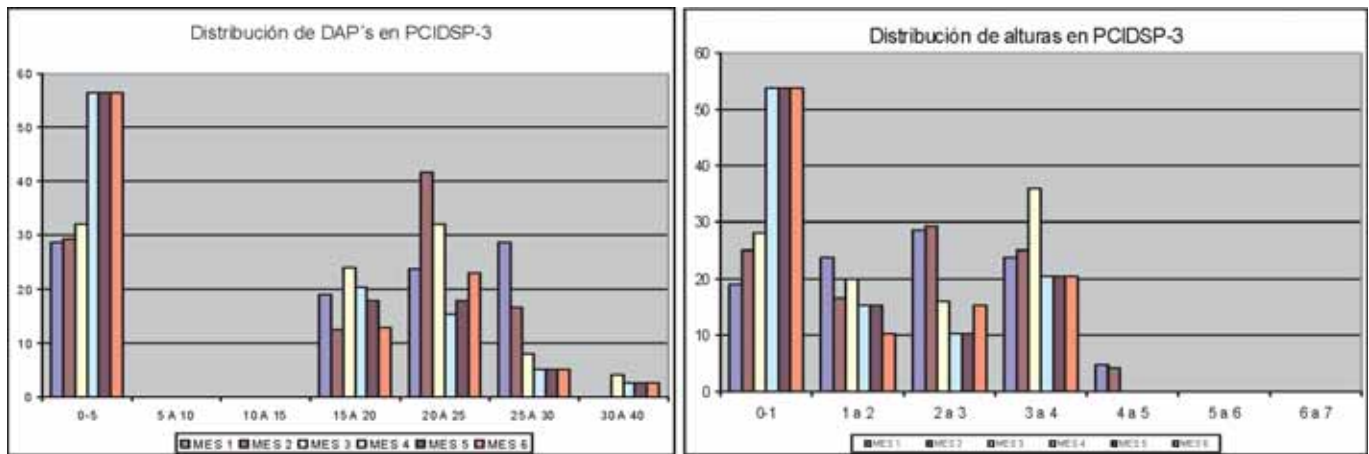


Figura 15. Distribución de las variables altura total y DAP de *Dicksonia sellowiana* en la población PCIDSP-3.

fue irregular con máximos en 16 en un solo individuo en una sola medición, con crecimiento promedio mayor en agosto de 2009, disminuyó hacia noviembre y volvió a incrementarse en enero y febrero de 2010 (véase la línea de tendencia; Figura 16a). Los ejemplares de esta población presentaron un máximo de 29 frondas maduras en el individuo No.17 y un mínimo de 0 en dos ejemplares juveniles observados desde la cuarta medición; los meses con mayor número de frondas maduras fueron noviembre y enero, con 344 frondas en total; en agosto se presentó el menor número (235); la línea de tendencia muestra un aumento hacia el pico normal de lluvias (octubre) y disminución hacia los meses secos (Figura 16b). La senescencia de las frondas se presentó con mayor abundancia en las 17 (43,59%) plantas de mayor edad y más altas en las que se contabilizó un número mayor a 10; se presentó un descenso constante de la media hacia el mes más seco (enero de 2010) e inició un aumento nuevamente al llegar el periodo de lluvias atípico en el mes de febrero (Figura 16c). La longitud de fronda tuvo un máximo de 3,85 m, de los cuales 10 cm corresponden al peciolo; la tasa general promedio de crecimiento mensual es de 1,4 cm. de *Dicksonia sellowiana* en la población PCIDSP 3 (Se debe tener en cuenta que la inicio de la medición de esta población en agosto de 2009 solo existían 21 individuos, en septiembre 24, en octubre 25 y al terminar el experimento se midieron 39 ejemplares.

La distribución espacial de *Dicksonia sellowiana* se desarrolló en pequeñas áreas, sin ocurrencia homogénea ni continua, al lado de arroyos permanentes o zonas muy húmedas de bosques bien conservados; lo anterior coincide con las observaciones de **Mantovani** (2004) en las poblaciones de *D. sellowiana* en la Serra do Corvo Branco

y del Parque Nacional Sao Joaquim, lo cual sugiere que esta especie prefiere hábitat con alta humedad en el suelo y la atmósfera, y concentraciones elevadas de materia orgánica, lo cual también se observó en el experimento de germinación de esporas realizado para este estudio, donde los factores limitantes para la germinación de esporas fueron la humedad y la temperatura (resultado similar al obtenido por **Ranal** (1999, citado en **Mantovani**, 2004) y la acción “catalizadora” de hongos en la fase inicial de la germinación.

El número de ejemplares por hectárea fue desigual en cada una de las poblaciones, así: Las poblaciones PCIDSP1 y PCIDSP 3 reportaron 287,5 plantas/ha y 243,75 plantas/ha respectivamente; en contraste, la población PCIDSP 2 aporta 1612,5 plantas/ha. La distribución de los ejemplares dentro de las clases diamétricas y alturas siguieron aproximadamente un modelo de J invertida, con una dominancia en la frecuencia de los individuos con alturas menores a 80 cm y con diámetros reducidos la altura del pecho, lo que indica una alta tasa de regeneración o reclutamiento de las poblaciones con individuos juveniles en mayor número en relación con los ejemplares adultos, lo que es comparable con los estudios anteriores en poblaciones naturales de *D. sellowiana* en el Estado de Santa Catarina y Senna, en poblaciones en Río Grande do Sul Brasil (**Mantovani** 1996, citado en **Mantovani** 2004) y estudios para *Cyathea lasiosora* realizados por **Young & León** (1989). **Poulsen & Nielsen** (1995), afirman que una gran concentración de individuos de regeneración se favorece por las condiciones topográficas y edáficas que benefician las condiciones de supervivencia de la especie. Lo anterior se evidencia claramente en la población PCIDSP 2, donde el efecto antrópico no ha tenido efecto sobre la población a

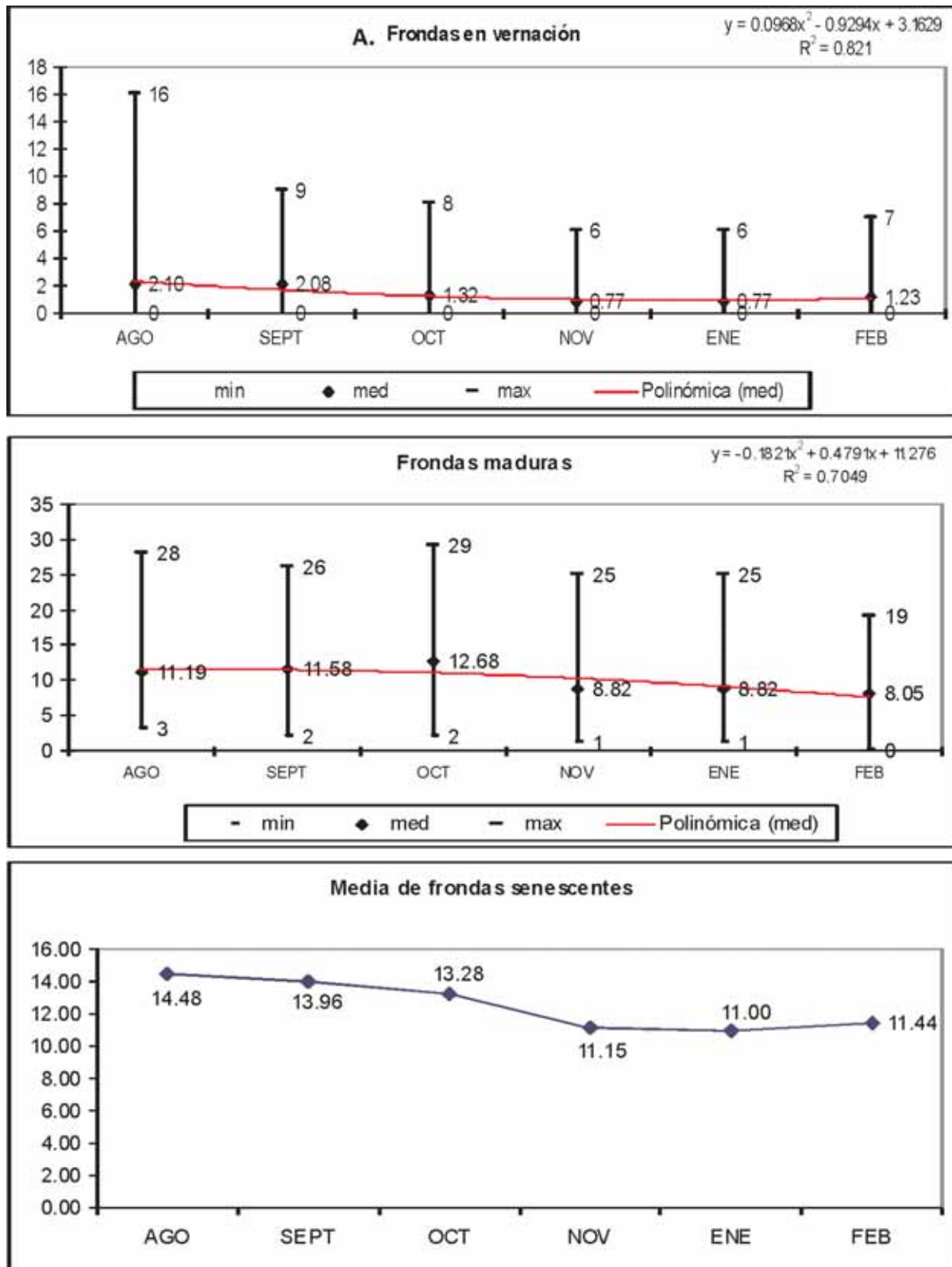


Figura 16. Medias, máximos y mínimos de frondas nuevas (A), maduras (B) y senescentes (C).

diferencia de las otras dos poblaciones donde la deforestación y el ingreso de ganado vacuno ha generado la desaparición principalmente de individuos juveniles y la competencia con especies de pteridofitas de crecimiento rápido como *Lophosoria quadripinnata*.

Se pudo determinar que el crecimiento medio del rizoma aéreo (tallo) de *Dicksonia sellowiana* es lento y constante, lo cual ratifica los resultados de la especie en el sur de Brasil (Schmitt *et al.*, 2009) y en la Reserva Forestal Protectora del Río Blanco en Caldas, Colombia (Ramírez-Valencia *et al.*, 2009), con una tasa promedio anual de 6 cm año⁻¹. El individuo más alto estudiado se encontró en la población PCIDSP 1 del municipio de Sibaté con una altura máxima de 6,2 m; con la tasa promedio de crecimiento establecida en este estudio, se puede deducir que este ejemplar tiene aproximadamente 103 años, teniendo en cuenta además el ciclo completo a partir del resultado de implantación del esporófito que en este estudio fue de aproximadamente 1 mes (31 día \pm 2 días) en el cultivo en sustrato natural y en condiciones de humedad óptimas pero sin la aparición de tallo.

Comparando el desarrollo de los individuos de las poblaciones estudiadas se pudo observar que las plantas más altas y gruesas (de mayor edad) presentan mayor producción de frondas nuevas, mayor senescencia, mayores tasas de crecimiento y mayores longitudes de lámina y fronda pero con peciolo más cortos que los de las plantas y frondas juveniles que tuvieron peciolo igual o casi tan largos como las láminas, lo que comprueba las tendencias observadas en estudios ya realizados en *Dicksonia sellowiana* (Schmitt *et al.*, 2009); Ramírez-Valencia *et al.*, 2009) y en otras especies de helechos arborescentes (p. ej. *Cyathea delgadii*; Schmitt & Windisch, 2007, citado en Schmitt *et al.*, 2009; *Alsophiila setosa*, Schmitt & Windisch, 2003 citado en Schmitt *et al.*, 2009). Adicionalmente, se comprobó que el área foliar es mayor en los individuos adultos que se encontraban cubiertos por la vegetación y menor en los ejemplares adultos con exposición directa al sol, con producción de frondas nuevas por ciclos con máximos de 16 hojas en vernación en una sola planta en un solo mes y mayor número de frondas nuevas en el mes de febrero en las tres poblaciones lo que coincidió con un incremento atípico de la pluviosidad en la Sabana de Bogotá, lo que puede indicar que variables ambientales pueden modificar los ciclos biológicos de este tipo de plantas. La producción de frondas maduras y senescencia se encontró más o menos estable en todo el periodo de observación y en las tres poblaciones estudiadas. Las plantas adultas fértiles siempre tuvieron mas de 1,6 m de altura del tallo, con presencia de esporangios durante todo el tiempo de estudio como lo pudo



Figura 17. Cultivo in vitro de *Dicksonia sellowiana* en medio MS., para el desarrollo de las esporas.

observar Ricker & Dali (1997), en especies arbóreas pioneras en bosques de México, que exhiben floración a lo largo del año.

Propagación in-vitro

Las esporas sometidas a la desinfección con hipoclorito de sodio al 0,5% (T1) presentaron una contaminación del 100% a la semana de evaluación. Bajo el tratamiento T2

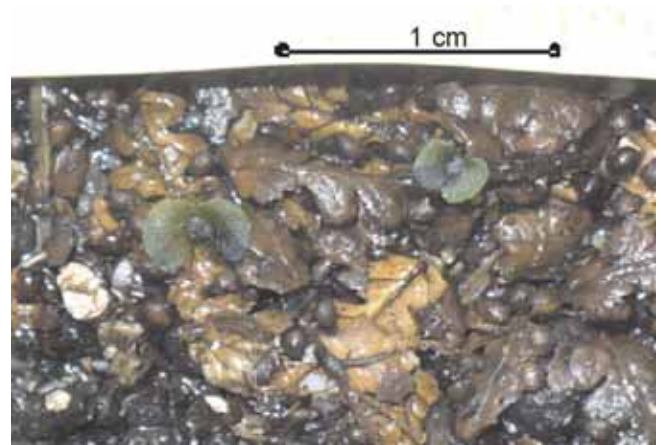


Figura 18. Primeros dos prótalos registrados en el experimento de germinación in suelo de esporas de *D. sellowiana* (Foto R. Alfonso).

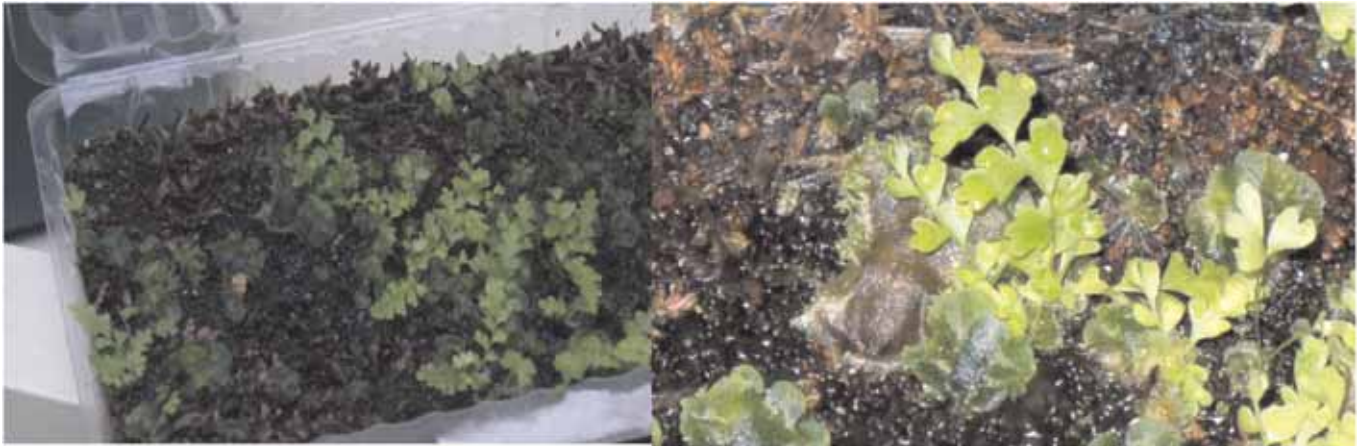


Figura 19. Esporofito de *Dicksonia sellowiana* de 3.5 meses de edad (Foto R. Alfonso).

(1%) la desinfección evaluada una semana después de la siembra fue del 33,3%.

En los explantes sobrevivientes se observa una germinación del 100% cuatro semanas después de la siembra (Figura 17), por lo que se puede determinar que las sales y la sacarosa presentes en el medio MS empleado tuvieron un efecto positivo en el desarrollo de ésta variable dependiente.

Propagación en suelo

El seguimiento que se hizo diariamente para verificar el comportamiento de las esporas sembradas en sustrato estéril para este estudio, dio como resultados después de un mes siembra, el registro de la aparición de los dos primeros prótalos (Figura 18); a éstos se le sumaron más prótalos, a los cuales se les hizo seguimiento hasta llegar a estabilizarse en un máximo de 129 con una densidad de 0,46 prótalos/cm² y una generación de 34 esporofitos con dos frondas en promedio y máximos de 3 cm de longitud. La Figura 19 muestra los esporofitos juveniles de 3 meses y medio de edad.

Para complementar el estudio se hicieron muestreos de frondas juveniles atacadas por lepidópteros (Figura 20) en las poblaciones PCIDSP 1 y PCIDSP 2, posiblemente provenientes de los cultivos de papa y fresa aledaños a las poblaciones estudiadas y que se convierten en un factor limitante para el desarrollo normal de las frondas juveniles al no lograr extenderse completamente, ocurre herbivoría en la vernación de las hojas y en el peciolo, lo cual produce la muerte de la hoja, por lo cual se pierde el esfuerzo de generación de nuevas hojas. La herbivoría impide el normal desarrollo de las frondas (Figura 21) y muchas de éstas se atrofian.



Figura 20. Frondas en vernación de *Dicksonia sellowiana* atacadas por larvas de lepidoptera (Foto R. Alfonso).



Figura 21. Frondas juveniles de *Dicksonia sellowiana* afectadas por larvas de lepidoptera (Foto R. Alfonso).

Conservación y manejo de *Dicksonia sellowiana*

Escenario deseado

El área de estudio cuenta aún con una baja categorización de áreas de manejo especial que conserven la diversidad biológica típica de esta región, como son los bosques andinos y altoandinos. La implementación de programas de producción limpia y la inclusión del componente forestal dentro de los sistemas de producción locales permitiría una reducción notable de los impactos ambientales generados sobre *Dicksonia sellowiana*, igualmente los programas de educación ambiental en veredas y sitios retirados de los centros urbanos lograrían la concientización y educación de las comunidades locales en aspectos relacionados al manejo del medio ambiente.

Autores como **Carvalho** (1992), **Oyama** (1993) y **Fantini et al.** (1992); citados por **Mantonavi**, (2004), proponen que para el manejo viable de poblaciones naturales se debe procurar la continuidad de estudios desde cuatro puntos importantes: la estructura poblacional, las tasas de desarrollo, el número de plantas reproductivas por hectárea y la caracterización genética. Además, estos autores destacan que es necesario el estudio de la regeneración natural para dar garantía de sustentabilidad y de manejo forestal debido a que aporta conocimientos sobre la autoecología de las especies; así, todas las estrategias de conservación se basarían en criterios técnico-científicos y contribuirían con la discusión de la necesidad de áreas de protección permanentes y que se conviertan en fuente de ingresos para los propietarios de los terrenos y poder ampliar las zonas con cobertura vegetal (**Mantovani**, 2004); además, se deben ampliar las acciones de protección al banco de plántulas y de la diversidad en conjunto de las áreas protegidas.

El desconocimiento de la normatividad ambiental vigente sobre flora silvestre y bosques en el contexto nacional y distrital como la veda permanente de individuos de especies de helechos arborescentes (Resolución 0801 de 1977) es otro aspecto importante de tratar al momento de implementar el manejo y conservación de *Dicksonia sellowiana*.

La continuidad y estandarización de métodos y estudios de propagación tanto *in-vitro* como en suelo, se hace necesaria para producción de nuevos ejemplares y propiciar la utilización de *D. sellowiana* en procesos de restauración ecológica principalmente en estadios avanzados.

Conclusiones

La distribución potencial de *Dicksonia sellowiana* se encuentra en la periferia del altiplano cundiboyacense y

de las zonas con variación altitudinal. Su extensión potencial (1215 km²) abarca escasas áreas de conservación establecidas, por lo cual es clara la necesidad de promover estrategias que protejan las poblaciones identificadas y realizar restablecimiento con individuos propagados *ex-situ* en sitios con figuras de manejo especial.

Algunas variables relacionadas con la precipitación son importantes en la modelación, lo cual coincide con información que la señala picos de esporulación en los meses de mayor precipitación.

Reconociendo que *Dicksonia sellowiana* posee un rango de extensión más amplio al área analizada, se recomienda hacer el estudio a nivel regional, incorporando más registros biológicos con el fin de identificar otras variables que determinan su distribución y conocer el estado de conservación. Además es importante generar modelos con información de escala detallada que representen la variación ambiental a nivel local.

A pesar que la distribución de *Dicksonia sellowiana* no es restringida, es una especie amenazada y vale la pena considerar que se encuentra en zonas con altas tasas de cambio de cobertura como los bosques andinos. De acuerdo con esto, ningún plan de conservación para la especie es integral sin propiciar la conectividad entre los diferentes fragmentos de bosque que se encuentran en la matriz del sector.

El reclutamiento es importante en la regeneración de poblaciones naturales, en PCIDSP-2, *Dicksonia* alcanzó porcentajes por encima de 90%, lo que hace de esta, una población juvenil, con potencial de generación de material para reintroducción en otros paisajes.

Los factores ambientales, junto con las características de suelo y agua que se presentan en gran parte del área estudiada son favorables para el crecimiento de poblaciones viables de *Dicksonia sellowiana* condiciones observadas muy bien en la reserva El Tablazo en el municipio de Subachoque, Cundinamarca, donde la diversidad, el estado de conservación y las condiciones de luminosidad debido al dosel son propicias para la vigorosidad y prosperidad del reclutamiento.

Poblaciones de *Dicksonia sellowiana* que crecen en sitios abiertos, aunque son vulnerables, la presencia de ejemplares adultos, reproductivamente activos y la gran producción de materia orgánica que producen, preservan condiciones favorables para la generación de nuevos relictos boscosos.

El efecto antrópico es fundamental en el desarrollo y estructura de poblaciones de especies de relictos de bosque.

Aunque el método convencional de propagación por semillero dio mejores resultados en el estudio para la generación de nuevos individuos de *D. sellowiana*, la propagación *in vitro* a partir de esporas es ventajosa, porque facilita la manipulación de prótalos, permite la medición cuantitativa de variables, elimina las condiciones ambientales adversas y ofrece la posibilidad de inducir cambios en el desarrollo con el fin de realizar estudios genéticos y acortar el ciclo de vida (**Constantino et al.**, 1994).

El empleo de hipoclorito de sodio al 1% brindó el más alto nivel de desinfección de esporas, lo cual permitió que se estableciera una siembra libre de agentes contaminantes y se pudiera evaluar la germinación de las mismas bajo el medio de cultivo MS. Estos resultados preliminares se consideran de suma importancia ya que se podrían constituir como la base para el desarrollo de un sistema de propagación *in vitro* que permita obtener prótalos con una alta capacidad de aclimatación y de formación de esporofitos *in vitro* y *ex vitro*.

Agradecimientos

Al Jardín Botánico José Celestino Mutis por el apoyo a la investigación en infraestructura y logística; a los operarios del proyecto 2006 que con diligencia colaboraron con varios de los temas tratados en este estudio y su compañía en campo a la hora de tomar información primaria.

Referencias bibliográficas

- Alcázar, C.** 2008. Distribución espacial y aspectos sobre el estado actual de las poblaciones de algunas especies arbóreas de Bogotá D.C y la región, *Aegiphila bogotensis*, *Persea mutisii* y *Prunus buxifolia*. Informe final. Contrato 118-2008. Subdirección Científica. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Cabrera, E. & D. Ramírez.** 2007. Estado actual y cambio en los ecosistemas de los Andes Colombianos: 1985-2005. Pp. 39-63. En: Monitoreo de los ecosistemas andinos 1985-2005: Síntesis y perspectivas. Instituto de Investigación Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia.
- Calderón, E.** 1997. Lista selecta de plantas de Colombia, extintas o en peligro de extinción. Anexo 1.17. 448-462 pp. En: Chávez-S, M. y N. Arango (eds.), Diversidad Biológica. Tomo I. Informe nacional sobre el estado de la biodiversidad, Colombia. Bogotá: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, Colombia.
- Cabrera, E. & D. Ramírez.** 2007. Estado actual y cambio en los ecosistemas de los Andes Colombianos: 1985-2005. Pp 39-63 in Monitoreo de los ecosistemas andinos 1985-2005: Síntesis y perspectivas. Instituto de Investigación Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia.
- Cayuela, L., Golicher, D., Newton, A., Kolb, H, de Albuquerque, F. S., Arets, E. J. M. M, Alkemade, J. R. M. & Pérez, A. M.** 2009. Species distribution modeling in the tropics: Problems, potentialities, and the role of biological data for effective species conservation. *Tropical Conservation Science* 2:319-352.
- Constantino, C.H. S., Santamaría, L. M. Gustavo, G. & Elizabeth, H.** 1994. Cultivo de tejidos vegetales como una alternativa para la preservación ex-situ de *Dicksonia sellowiana*, un helecho arborecente amenazado. Pontificia Universidad Javeriana. I Congreso Nacional sobre Biodiversidad. Santiago de Cali.
- . 2000. Storage and in-vitro germination of tree fern spores. Pontificia Universidad Javeriana. Botanic Gardens Micro-propagation News.
- Davidse, G., Sousa, M. & Charter, A. (eds.)**. 1995-1996. Flora Mesoamericana. Volumen I Psilotaceae a Salviniaceae. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente- DAMA-Fundación Bachaqueros.** 2002. Protocolo Distrital de Restauración Ecológica. Segunda Edición. Bogotá. Colombia.
- Gentry, A. H.** 1982. Patterns of Neotropical plant species diversity. *Evolutionary Biology* 15:1-84.
- Giraldo, C.** 2007. Distribución geográfica y modelos de distribución potencial de cinco especies andinas en la sabana de Bogotá y la cuenca media del río Tunjuelo, Cundinamarca, Colombia. Subdirección Científica. Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis.
- Hurtado, C.** 2007. Uso de modelos de predicción como herramienta para estimar el área de distribución potencial de la especie *Aniba perutilis* Hemsley (comino crespo) en el departamento del Valle del Cauca. Tesis de pregrado para optar al título de Ecólogo. Fundación Universitaria de Popayán. Colombia.
- Mantovani, M.** 2004. Caracterização de populações naturais de Xaxim (*Dicksonia sellowiana* (Presl.) Hooker), em diferentes condições edafo-climáticas no estado de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- MAVDT.** 2010. Resolución número (383) 23 de febrero de 2010 "Por la cual se declaran las especies silvestres que se encuentran amenazadas en el territorio nacional y se toman otras determinaciones".
- Murillo, M. T.** 1988. Pteridofita I. Flora de Colombia. Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Imprenta Nacional. Bogotá.
- Murillo, M. T. & Harker, M.** 1990. Helechos y plantas afines de Colombia. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Editorial Guadalupe. Bogotá.
- Phillips, S., R. Anderson & R. E. Schapire.** 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259.
- PNUMA-CMCM (Comps.)** 2008. Lista de Especies CITES (CD-ROM). Secretaría CITES, Ginebra, Suiza, y PNUMA-CMCM, Cambridge, Reino Unido.

- Poulsen, A. D. & Nielsen, I.** 1995. H. How many ferns are there in one hectare of tropical rain Forest? *Amer Fern J* 85:29-35.
- Ramírez-Valencia, V. D. Sanín & Álvarez-Mejía, L. M.** 2009. Estimación del crecimiento de *Dicksonia sellowiana* Hook., (Dicksoniaceae Hook.), en la reserva forestal protectora de Río Blanco, Manizales, Caldas, y registros colombianos de su fertilidad. *Bol.Cient.Mus.Hist.Nat.* 13(1):17-29.
- Rodríguez, N., Armenteras, D. Morales, M. & Romero, M.** 2004. Ecosistemas de los Andes colombianos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia.
- Sistema de Información en Biodiversidad. (SIB).** 2009. <http://www.siac.net.co/>. Instituto de Investigación Alexander von Humboldt.
- Sistema de Información sobre Biodiversidad de Colombia - SiB.** 2009. Sistema distribuido de búsquedas. <http://www.siac.net.co/>
Fecha de consulta: 01/10/2009
- Schmitt J. L., Schneider, P. H. & Windisch, P. G.** 2009. Crecimiento do cáudice e fenologia de *Dicksonia sellowiana* Hook. (Dicksoniaceae) no sul do Brasil. *Acta Bot Bras* 23(1):282-291.
- Senna, R.M.** 1996. Pteridófitas no interior de uma floresta com Araucária: composição florística e estrutura ecológica. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Botânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 105 p.
- Tuomisto, H. & Poulsen, A. D.** 1994. Influence of edaphic specialization on pteridophyte distribution in Neotropical Rain Forest. *In* Tuomisto, H. Academic dissertation. Pp. 1-19 University of Turku, Finland.
- Young, K. R. & León, B.** 1989. Pteridophyte species diversity the Central Peruvian Amazon: importance of edaphic specialization. *Brittonia* 41:388-395.
- UNEP-WCMC (Comps.)** 2008. Checklist of cites species (CD-ROM). CITES Secretariat, Geneva, Switzerland, and UNEP-WCMC, Cambridge, United Kingdom. http://www.cites.org/eng/resources/pub/checklist08/About_the_Checklist_of_CITES_species.pdf.

Recibido: octubre 12 de 2010.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

INTELIGENCIA. ¿QUÉ SABEMOS Y QUÉ NOS FALTA POR INVESTIGAR?

Rubén Ardila¹

Resumen

Ardila, R.: Inteligencia. ¿Qué sabemos y qué nos falta por investigar? Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 97-103, 2011. ISSN 0370-3908.

El estudio de la inteligencia ha interesado a psicólogos, filósofos, educadores y el público en general durante varios siglos. La sociedad humana valora altamente la inteligencia y la considera un factor decisivo para los logros educativos, el éxito en el trabajo y para el desarrollo socioeconómico de los pueblos. Se analiza el concepto de inteligencia y su medición, los tipos de inteligencia, las implicaciones sociales y políticas que tiene este concepto psicológico, la relación entre inteligencia general, factores específicos de inteligencia, inteligencia fluida e inteligencia cristalizada, el desarrollo ontogenético de la inteligencia, sus orígenes evolutivos y otros asuntos relacionados. Se presentan los problemas de investigación que están por solucionarse en este campo. La inteligencia como capacidad de adaptación a un medio cambiante ha tenido importancia decisiva en la evolución filogenética de los seres humanos.

Palabras clave: inteligencia, medición, psicología, evolución filogenética, adaptación.

Abstract

Research on intelligence has interested psychologists, philosophers, educators and the general public during several centuries. Human society greatly values intelligence and considers it a decisive factor in educational achievement, work success and the socioeconomic development of countries. The concept of intelligence and its measurement is analyzed, including the types of intelligence(s), fluid and crystalized intelligence, ontogenetic development, the evolutionary origins of intelligence, and related topics. The research problems to be investigated in this area are presented. Intelligence as adaptation capacity to a changing environment has had a decisive importance in the phylogenetic evolution of human beings.

Key words: intelligence, measurement, psychology, phylogenetic evolution, adaptation.

¹ Miembro correspondiente Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Dirección: Rubén Ardila, Universidad Nacional de Colombia, Correo electrónico: ruben.ardila@etb-net.co

Las diferencias individuales

Los seres humanos poseen muchas características en común y muchas características que los diferencian unos de otros. Las características universales, que pertenecen a nuestra especie y que son comunes a los miembros de todas las culturas, todas las épocas, todas las etnias, ambos géneros y todos los rangos de edad, forman lo que se ha denominado *naturaleza humana*. Por otra parte las características diferenciales, que son específicas de un grupo humano (los varones a diferencia de las mujeres, los introvertidos a diferencia de los extraversos, los jóvenes versus los viejos, etc.) forman parte de la identidad de los grupos y culturas. Finalmente nos encontramos con aspectos que son únicos de la persona: no hay dos individuos exactamente iguales, con la misma estructura genética, los mismos comportamientos consecuencia de igual aprendizaje temprano, las mismas aptitudes, intereses, habilidades y limitaciones. Cada persona es única, como combinación de elementos y factores.

Podemos indicar por lo tanto que las características humanas se clasifican en tres grupos:

- Aquellas que son comunes a todos los seres humanos.
- Las que son características de un grupo en particular.
- Las que son únicas del individuo.

A la segunda categoría pertenecen la inteligencia, la personalidad, las aptitudes, los intereses y otras características que diferencian unos grupos de personas de otros.

¿Qué es la inteligencia?

Las características que asociamos con el concepto de *inteligencia*, como capacidad de solucionar problemas, de razonar, de adaptarse al ambiente, han sido altamente valoradas a lo largo de la historia. Desde los griegos hasta hoy se ha pensado que este conjunto de características que distingue positivamente a las personas les brindan un lugar especial en la sociedad. Esto se ha considerado incluso antes de que se comenzara a estudiar científicamente el concepto de inteligencia y su medición. Hoy se conoce que la inteligencia (o inteligencias) existe en todas las personas en mayor o menor grado, y también en los animales no humanos.

Los problemas asociados con la inteligencia se refieren a su definición, a sus características, la forma de medirla, los factores que constituyen la inteligencia, la relación entre inteligencia y otros rasgos psicológicos, la pregunta

acerca de si existe una o varias inteligencias, el papel de la genética, del ambiente y de su interacción, los orígenes de la inteligencia en la especie humana y en otras especies, el desarrollo de la inteligencia en los niños, la utilidad del concepto de inteligencia para la educación y para el éxito laboral y social, la forma de desarrollar la inteligencia, los cambios que ocurren a lo largo del ciclo vital, la normalidad, subnormalidad y supranormalidad, la relación entre inteligencia y creatividad, y otros problemas similares. Son temas de gran importancia y relevancia para el individuo y la sociedad.

Los primeros intentos formales de medir la inteligencia se deben a **Alfred Binet** (1857-1911) quien fue comisionado por el gobierno francés para encontrar una forma de seleccionar a los estudiantes que tenían habilidades para cursar estudios en las escuelas francesas. **Binet** diseñó una serie de situaciones problema que poseían dificultad gradual creciente y clasificó las que podían ser resueltas por niños de diversas edades. En esta forma se propuso una secuencia que dio origen al concepto de “edad mental” a diferencia de la “edad cronológica”. El primer test de inteligencia (Binet-Simon) se presentó en 1905 en Francia. Estos tests tuvieron en su forma inicial una función *práctica* y se aplicaron a varios contextos educativos. Se buscó correlacionar dichos resultados en los tests con el éxito en la escuela. Más adelante se propusieron otras pruebas de inteligencia como el Terman, el Stanford-Binet y el Weschler en sus diversas formas (WAIS, WISC, etc).

El concepto de inteligencia ha estado muy ligado a su medición. En lo que se refiere a una *teoría* de la inteligencia, se puede afirmar que desde el comienzo se consideró que había una capacidad cognitiva amplia, que **Spearman** denominó *inteligencia general* (o factor g). Por otra parte como las pruebas estaban compuestas por diversos factores, se pensó que era más adecuado hablar de *factores específicos* de la inteligencia (factores s) como el factor verbal, cuantitativo, espacial, la memoria inmediata, la velocidad mental o de percepción y la capacidad para captar reglas y relaciones lógicas. **Thurstone** propuso la técnica matemática del análisis factorial para estudiar estos problemas y encontró varios factores, que harían parte de la inteligencia. Hoy se utilizan complejos procedimientos matemáticos en las investigaciones sobre inteligencia, entre otras el análisis factorial, la regresión múltiple y la correlación.

La inteligencia general (el factor g de **Spearman**) se ha correlacionado con ocupación, género, etnias, culturas, clases sociales, éxito en ciertas ocupaciones y muchos factores más. Es un concepto que tuvo gran aceptación en la

ciencia de hace varias décadas pero ha dado origen a numerosas críticas, tanto ideológicas y políticas como científicas (ver **Gould**, 1981). Sigue siendo un concepto controvertido en este momento en el siglo XXI (ver **Sternberg**, 2000, 2007; **Nisbett**, 2009).

Como la inteligencia es un campo de investigación muy complejo, también lo son las definiciones que se han propuesto acerca de ella.

Definiciones de inteligencia

Las diversas definiciones dan luces sobre los problemas asociados con la inteligencia y su dominio de investigación. Esas definiciones pueden agruparse en categorías: filosóficas, pragmáticas, factoriales y operacionales.

1. Inteligencia es el poder de combinación, afirmó **Ebbinghaus** en 1885. Más tarde insistió en que inteligencia es la capacidad de adaptarse a nuevas situaciones. Por otra parte, la inteligencia, según **Binet** se refiere a cualidades formales como la memoria, la percepción, la atención y el intelecto. La inteligencia según él se caracteriza por comprensión, invención, dirección y censura.

2. Las soluciones factoriales al concepto de inteligencia se apoyaron en las técnicas del análisis factorial y se elaboraron tests para medir un factor o capacidad primaria: capacidad verbal, fluencia verbal, capacidad para manejo de números, memoria inmediata, velocidad mental o de percepción, capacidad para captar reglas y relaciones lógicas. Son los factores s de **Thurstone** que mencionamos anteriormente.

3. Las soluciones operacionales (**Bridgman**) insisten en que es preciso medir y luego definir, y han tenido cierta aceptación en la comunidad científica. Las operaciones que utilizamos para medir una aptitud constituyen la definición de esa habilidad. En la actualidad el operacionalismo ha recibido numerosas críticas y la mayor parte de los especialistas en medición y evaluación prefieren ir más allá de las soluciones operacionales.

4. Inteligencia es lo que miden los tests de inteligencia (**Boring**, 1923). Como hizo notar **Terman**, la inteligencia al igual que la electricidad se puede medir adecuadamente antes de definirla. Sin embargo, ¿qué es lo que miden los tests de inteligencia? En inglés se dice "Intelligence is what the intelligence tests measure" Y la réplica se presenta preguntando: "What is the *what* that the intelligence tests test?"

5. En época más reciente **Sternberg** (1985) propuso una teoría de la inteligencia diferente de las teorías clásicas de **Spearman** (g) y **Thurstone** (s). Considera que la

inteligencia está basada en tres categorías: habilidades analíticas, creativas y prácticas. Esta *teoría triádica de la inteligencia* dio origen al Test de Habilidades Triádicas de Sternberg (STAT por sus siglas en inglés) que utiliza ítems de elección múltiple, verbales, cuantitativos y de figuras, al igual que ensayos (escribir historias, contar historias, diseñar cosas, ver películas con problemas prácticos que el examinado debe solucionar).

6. Inteligencia emocional es un concepto que se debe a **Salovey** y **Mayer** (1990) y que fue popularizado por **Daniel J. Goleman** en 1995. La inteligencia emocional es la capacidad para reconocer los sentimientos propios y ajenos y la habilidad para manejarlos. Se organiza en cinco capacidades: conocer las emociones y sentimientos propios, manejarlos, reconocerlos, crear nuestras propias motivaciones y manejar las relaciones interpersonales.

7. Inteligencias múltiples. Este concepto, que se debe a **Howard Gardner** (1983, 1993), considera que la inteligencia es la capacidad para resolver problemas o elaborar productos que pueden ser valorados en determinada cultura. Afirma que existen varios tipos de inteligencia, a saber:

- Inteligencia lógico-matemática, que permite resolver problemas de lógica y matemática. Es la concepción clásica de inteligencia.
- Inteligencia lingüística, que es la capacidad de usar las palabras y los conceptos verbales de manera apropiada.
- Inteligencia musical. Es el talento para reconocer y ejecutar melodías y armonías musicales.
- Inteligencia espacial. Es la capacidad de distinguir el espacio, las formas, figuras y sus relaciones en tres dimensiones.
- Inteligencia intrapersonal. Es la capacidad de entendernos a nosotros mismos, nuestras motivaciones y nuestras emociones.
- Inteligencia interpersonal o social. Es la capacidad de entender a los demás con empatía.
- Inteligencia corporal-sinestésica. Es la capacidad de controlar y coordinar los movimientos del cuerpo y expresar sentimientos por medio de esos movimientos.

En versiones posteriores de su teoría, **Gardner** añadió la inteligencia naturalista y la inteligencia existencial. Esta conceptualización de inteligencias múltiples ha sido muy bien recibida en amplios sectores pero al igual que la inteligencia emocional, ha tenido numerosas *críticas*. Una de

ellas se refiere a la inteligencia musical y la inteligencia corporal-sinestésica, que realmente no serían “inteligencia” sino talentos. En el caso de la inteligencia emocional, también sería discutible afirmar que es una “inteligencia” y tal vez sería preferible hablar de habilidades sociales, campo que se ha investigado ampliamente sin referencia alguna con la “inteligencia”.

Estas definiciones o soluciones a las conceptualizaciones de la inteligencia, su medición, sus aplicaciones y su lugar en la sociedad, son motivo de numerosas investigaciones y de muchas controversias.

Una definición de inteligencia que probablemente es la más apropiada en el estado actual de nuestros conocimientos es la siguiente: *Inteligencia es un conjunto de habilidades cognitivas y conductuales que permite la adaptación eficiente al ambiente físico y social. Incluye la capacidad de resolver problemas, planear, pensar de manera abstracta, comprender ideas complejas, aprender de la experiencia. No se identifica con conocimientos específicos ni con habilidades específicas sino que se trata de habilidad cognitiva general, de la cual forman parte las capacidades específicas.*

La inteligencia varía a lo largo de la vida de una persona (desarrollo ontogenético) y lo ha hecho a lo largo de la evolución de la especie (desarrollo filogenético).

Desarrollo y ciclo vital

Los seres humanos y los demás animales, evolucionan a lo largo del ciclo vital, desde la concepción hasta la muerte. Dichos cambios se dan a nivel de maduración, habilidades perceptuales, capacidad de aprender, procesos cognitivos y conducta social. Esos cambios posibilitan la adaptación a un medio ambiente cambiante. Son producto de la biología y de su interacción con la cultura.

Tradicionalmente se estudió el desarrollo psicológico de los seres humanos desde el nacimiento hasta la adolescencia, y en el caso específico de la inteligencia se encontró que esta evolucionaba a lo largo de la infancia y la adolescencia alcanzando un punto máximo alrededor de los 15 años aproximadamente. Luego se estabilizaba y más tarde comenzaba a variar, incluso a declinar a lo largo de la vida de la persona. La medición de la inteligencia utiliza pruebas que se adecúan a la edad de la persona, de acuerdo con su edad mental. El puntaje denominado Cociente Intelectual (C.I.), propuesto en 1912 por el psicólogo alemán **William Stern**, resulta de la edad mental (la capacidad intelectual de la persona, medida por medio de tests que se han estandarizado para cada nivel de edad), dividida

por la edad cronológica (en meses) y multiplicado por 100 para que se obtenga un número entero:

$$CI = \frac{\text{Edad mental}}{\text{Edad cronológica}} \times 100$$

Se considera un CI de 100 como estadísticamente normal, con una variación de 15 puntos: 100 ± 15 (o sea entre 85 y 115). La distribución de inteligencia en la población tiene la forma de curva normal o curva de Gauss (curva de campana) como muchas otras habilidades y características de las poblaciones. Una persona con menos de 85 de CI se considera subnormal y una persona con más de 115 se considera supranormal.

La categorización más aceptada de niveles de CI es la siguiente:

NIVELES DE CI

Genio: 130 o más
Inteligencia superior: 115 a 130
Inteligencia normal: 85 a 115
(CI promedio: 100)

Retardo mental:
Límitrofe o borderline: 70 a 85
Leve: 50-55 a 70
Moderado: 35-40 a 50-55
Grave o severo: 20-25 a 35-40
Profundo: CI de 20-25 o menos

Este énfasis psicométrico ha sido muy útil para los trabajos en la educación, para la conformación de escuelas especiales para niños con déficits cognitivos, sensoriales y sociales, y para niños con habilidades superiores al promedio. Ha servido para proporcionar ambientes más adecuados a los distintos individuos y para ayudar a la realización de sus potencialidades. La capacidad de aprender, la capacidad de adaptarse a un nuevo ambiente, las habilidades específicas (matemáticas, musicales, espaciales, sociales) se han tomado en cuenta en estos contextos. El CI siempre se debe considerar dentro de un rango, que incluye un promedio (por ejemplo 100) y desviación estándar (por ejemplo ± 15). Es siempre un concepto relativo.

Sin embargo colocar un rótulo a una persona puede tener importantes implicaciones muchas de ellas negativas. Las expectativas de ejecución alta o baja influyen en los niños y adolescentes y hay estudios sistemáticos que demuestran que la persona trata de acomodar su ejecución a las expectativas que se han formado acerca de ella, en la

escuela, en la vida diaria, en la familia. La psicología contemporánea considera que no es adecuado *etiquetar* a una persona como “retardado”, “incapaz de entender la música”, “genio”, “muy mal hijo”, o “brillante y superdotado”, o cualquier otra etiqueta. A veces la etiqueta limita las posibilidades y se vuelve una *profecía auto-realizada*. En otros casos al no ser capaz de lograr las metas que se esperan de él (“soy un genio pero no soy capaz de llegar tan alto como se espera de mí”) produce efectos emocionales negativos que pueden llegar a tener consecuencias funestas.

Se ha encontrado que el puntaje promedio de CI se ha incrementado en tres puntos cada década, a partir de principios del siglo XX, que es cuando comenzaron a hacerse mediciones de inteligencia. Esto se denomina el Efecto **Flynn** (ver **Flynn**, 1999, 2007) y se ha tratado de explicar por mejoras en nutrición, escolaridad y habilidad para resolver los tests. Parece ser que en los países con mayor nivel de desarrollo educativo (por ejemplo Noruega y Dinamarca) estos avances de CI se presentaron durante varias décadas pero se estabilizaron y no se presentan más. Parecería que se hubiera alcanzado un “techo” o “cielo”

Por otra parte, la teoría del desarrollo cognitivo más aceptada ha sido la de **Piaget** (ver 1952, entre otros). Según este enfoque de la evolución de la inteligencia, el desarrollo es lineal y ordenado. Pasa por una serie de estadios:

1. Estadio sensorio-motor, entre el nacimiento y los 2 años.
2. Estadio pre-operacional, entre los 2 y los 7 años.
3. Estadio de las operaciones concretas, entre los 7 y los 12 años.
4. Estadio de las operaciones formales, entre los 12 años y la vida adulta.

Los niños interactúan con su ambiente, al comienzo a través de esquemas sensoriales y motores, y más adelante forman representaciones simbólicas internalizadas de los objetos. Un punto importante en este desarrollo cognitivo es el concepto de *permanencia de los objetos*, que implica que los objetos continúan existiendo cuando no están presentes, por ejemplo cuando no están a la vista del niño. También tiene relevancia la imitación de los comportamientos observados.

La teoría de **Piaget** y de los neo-piagetianos ha tenido aplicaciones en la educación, en la conformación de currículos escolares, en la enseñanza de las matemáticas y la lógica y en otros aspectos. Las contrastaciones empíri-

cas de la validez de la teoría han demostrado parcialmente algunas de sus afirmaciones, mientras que otras han sido refutadas. Un elemento importante es la validez trans-cultural de la teoría piagetiana, investigar si los mismos estadios de desarrollo cognitivo se encuentran en culturas diferentes, por ejemplo si los niños de Uganda o de Pakistán pasan por los mismos estadios que los niños de Suiza que estudió inicialmente **Piaget**.

Durante la edad adulta existe una meseta en el desarrollo intelectual de las personas y luego un declive en habilidades cognitivas específicas. En la vejez estos cambios son más pronunciados. **Cattell** (1963) diferenció entre inteligencia *fluida* que es la capacidad para resolver problemas aquí y ahora, e inteligencia *cristalizada* que tiene que ver más con la experiencia adquirida, con las capacidades almacenadas y asuntos similares.

En los ancianos no se presentan cambios en los factores verbales de la inteligencia (medida por medio del WAIS y otras pruebas), incluyendo memoria de dígitos, vocabulario, información, comprensión, aritmética, similitudes. Por el contrario se observa una disminución en los puntajes obtenidos en las escalas de ejecución, sustitución de dígitos, completación de dibujos, ordenación de figuras y composición de objetos. Parece ser que disminuye la velocidad de procesar información, la memoria inmediata y se aumenta la capacidad de síntesis y de utilizar información previamente adquirida, lo que se asocia con el concepto de inteligencia cristalizada.

El complejo problema del desarrollo de la inteligencia en los adultos, especialmente en los adultos mayores, requiere que se tengan en cuenta factores sociales, emocionales y cognitivos, según señala **Berg** (2000).

Orígenes filogenéticos de la inteligencia

Nos hemos referido al desarrollo ontogenético de la inteligencia, desde el nacimiento hasta el final de la vida y hemos señalado los cambios que se observan durante la infancia y durante el resto del ciclo vital. Por otra parte el origen filogenético de la inteligencia ha sido motivo de gran interés. ¿En qué momento de la evolución de nuestra especie aparecen las capacidades cognitivas? ¿Existe razonamiento en animales no humanos, capacidad de producir cultura y transmitirla, lenguaje, habilidades matemáticas, capacidad de solucionar problemas? ¿Existen diferencias cualitativas entre nuestra especie y las demás especies, o por el contrario se trata de diferencias de grado? Estos problemas han interesado a la humanidad a lo largo de toda la historia registrada. Tuvieron gran importancia en la teoría de la evolución propuesta por **Darwin**. El estudio de los procesos

psicológicos en los animales no humanos dio origen a la *psicología comparada* (ver **Papini**, 2009) y a la *psicología evolucionista* (**Buss**, 1995, 2008; **Confer et al**, 2010).

George J. Romanes (1848-1894) fue probablemente el primer psicólogo comparativo. Presentó evidencias anecdóticas acerca de las capacidades mentales superiores de los animales, llamó la atención sobre la posibilidad de una continuidad real de procesos psicológicas entre animales no humanos y humanos. Sin embargo la comunidad científica consideró preferible utilizar una metodología más experimental y rigurosa para explicar los fenómenos psicológicos en animales. Se dio importancia a la llamada Navaja de Occam que es un principio metodológico que afirma que el funcionamiento de un proceso psicológico no puede adscribirse al ejercicio de una actividad mental superior si puede explicarse por el ejercicio de una función que se encuentra en un estado inferior en la “escala filogenética”. Esta es una ley de parsimonia, que privilegia las explicaciones más “simples” en lugar de las que impliquen mayor complejidad y más constructos. **Edward L. Thorndike** (1874- 1949) y otros investigadores insistieron en evitar especulaciones y eliminar las evidencias anecdóticas sobre inteligencia en los animales.

En épocas más recientes, ante todo a partir la década de 1970 e incluso antes, el estudio de las habilidades cognitivas superiores en los animales comenzó a desarrollarse utilizando los métodos más estrictos de laboratorio y de campo y las nuevas herramientas de la psicología cognitiva. Entre los trabajos más importantes sobre procesos cognitivos superiores en animales no humanos se pueden citar los siguientes:

- Los estudios tempranos (1917) de **Wolfgang Köhler** sobre *insight* en chimpancés.
- Las investigaciones experimentales sobre lenguaje en chimpancés llevados a cabo por **Allen y Beatrix Gardner**, por **David Premack**, **Duane Rumbaugh**, **Herbert Terrace**, **David A. Washburn** y otros investigadores. Demuestra que la comunicación altamente elaborada existe en primates y que estos pueden adquirir sistemas complejos para expresar conceptos y comunicarse (ver **Washburn**, 2007).
- Los trabajos sobre transmisión de cultura en monos. Las primeras demostraciones se llevaron a cabo en el Primate Research Institute de la Universidad de Kyoto (Japón) a partir de 1978. Se encontró que los monos adquieren conductas como lavar los alimentos y otras, que enseñan a la siguiente generación y que se transmite a las sucesivas generaciones (ver **Matsuzawa**,

2001). Dicha transmisión cultural es muy similar a la que existe en los seres humanos y que denominamos “cultura” y antes se consideraba exclusiva de nuestra especie.

- Las investigaciones sobre uso de instrumentos en chimpancés, llevados a cabo inicialmente con **Jane Goodall** (1986) quien encontró que estos primates utilizaban palos para pescar termitas y realizaban otras conductas complejas. Más adelante en 2007 se encontró que los chimpancés de la sabana de Fongoli (en Senegal) usaban palos afilados para cazar.
- Los estudios de **Irene Pepperberg** (2002) con el loro gris africano llamado “Alex”.
- Las investigaciones sobre psicología de los delfines (**Herman**, 1986).
- Los estudios sobre habilidades matemáticas en animales (**Beran, Gullede y Washburn**, 2007, ver también **Ardila**, 2007).
- El problema de la conciencia o percepción de sí mismo, tanto en hombres como en animales no humanos (ver **Rozo & Pérez-Acosta**, 2010).

Todas estas investigaciones han demostrado la continuidad entre los procesos psicológicos de las especies no humanas y la especie humana. La complejidad conductual se correlaciona en parte con el desarrollo del sistema nervioso, que posibilita la capacidad para aprender y para adaptarse en forma adaptativa al ambiente. Sin embargo organismos con sistemas nerviosos muy “simples” y con un cerebro relativamente pequeño en relación con el tamaño del cuerpo, pueden presentar comportamientos complejos, como es el caso del loro Alex y de los cuervos que tienen conductas muy similares a las de algunos primates. Aunque se ha trabajado intensamente sobre estos temas de psicología comparada y de psicología evolucionista en los últimos años, aún falta un largo camino por recorrer.

La inteligencia como adaptación al ambiente

De lo anterior se puede concluir que en los seres humanos y en muchas otras especies existen habilidades cognitivas que permiten la realización de comportamientos complejos. Incluso mucho más complejos de lo que se pensaba hace unas pocas décadas. Esta habilidad que llamamos inteligencia (o en algunos casos “inteligencias”) posibilita la adaptación de los organismos a su ambiente, que en muchos casos es un ambiente variable e impredecible. La capacidad de adaptación está íntimamente

relacionada con el concepto de inteligencia. Se ha encontrado que la persona más inteligente:

- Es más capaz de adaptarse al ambiente físico y social.
- Es más hábil para seleccionar ambientes en los cuales pueda funcionar mejor.
- Es más capaz de modificar su ambiente para que encaje mejor en sus potencialidades.
- Es más capaz de enfrentar situaciones novedosas e inesperadas.

Esta habilidad o conjunto de habilidades que denominamos inteligencia, se valora altamente por parte de la sociedad. Constituye un dominio de investigación que utiliza los más recientes desarrollos en las matemáticas, la psicología y la neurociencia, y que está permeado por factores políticos, ideológicos y culturales.

Bibliografía

- Ardila, R.** 2007. Psicología en el contexto de las ciencias naturales. Evolución y comportamiento. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* **31**(120):395-403.
- Beran, M.J., Gulledge, J.P. & Washburn, D.A.** 2007. Animals count: What is next?. Contributions from the Language Research Center to nonhuman animal cognition research. In **D.A. Washburn** (Ed.), *Primate perspectives on behavior and cognition* (pp. 161-173). Washington, D.C.: American Psychological Association.
- Berg, C. A.** 2000. Intellectual development in adulthood. In **R. J. Sternberg** (Ed.), *Handbook of intelligence* (pp. 117-137). Cambridge: Cambridge University Press.
- Boring, E. G.** 1923. Intelligence is what the tests test it. *New Republic* **5**:35-37.
- Buss, D.M.** 1995. Evolutionary psychology: A new paradigm for psychological science. *Psychological Inquiry*, **6**:1-49.
- . 2008. *Evolutionary psychology: The new science of the mind*. Boston, MA: Pearson.
- Cattell, R. B.** 1963. Theory of fluid and crystalized intelligence: a critical experiment. *Journal of Educational Psychology*, **54**:1-22
- Confer, J.C., Easton, J.A., Fleischman, D.S., Goetz, C.D., Lewis, D.M.G., Perrilloux, C. & Buss, D.M.** 2010. Evolutionary psychology. Controversities, questions, prospects, and limitations. *American Psychologist* **65**:110-126.
- Flynn, J.R.** 1999. Searching for justice: The discovery of IQ gains over time. *American Psychologist* **54**:5-20.
- . 2007. *What is intelligence? Beyond the Flynn Effect*. New York: Cambridge University Press.
- Gardner, H.** 1983. *Frames of mind. The theory of multiple intelligences*. New York: Basic Books.
- . 1993. *Multiple intelligences: The theory in practice*. New York: Basic Books.
- Goleman, D.** 1995. *Emotional intelligence*. New York: Bantam Books.
- Goodall, J.** 1986. *The chimpanzees of Gombe*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Gould, S.J.** 1981. *The mismeasure of man*. New York: Norton.
- Herman, L. M.** 1986. Cognition and language competencies of bottlenosed dolphins. In **R. J. Schusterman, J.A. Thomas, & F. G. Wood** (Eds.). *Dolphin cognition and behavior* (pp. 221-251). Hillsdale, NJ.: Erlbaum.
- Matsuzawa, T.** 2001. *Primate origins of human cognition and behavior*. New York: Springer.
- Nisbett, R.E.** 2009. *Intelligence and how to get it*. New York: Norton.
- Papini, M.R.** 2009. *Psicología comparada. Evolución y desarrollo del comportamiento*. Traducido del inglés. Bogotá: Editorial Manual Moderno.
- Pepperberg, I.M.** 2002. *The Alex studies: Cognitive and communication abilities of gray parrots*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Piaget, J.** 1952. *The origins of intelligence in children*. New York: International Universities Press.
- Romanes, G. J.** 1882. *Animal intelligence*. London: Appleton.
- Rozo, J.A. y Pérez-Acosta, A.M.** 2010. *El reto de la consciencia. Respuestas desde la psicología y la neurociencia*. Bogotá: Psicom Editores.
- Salovey, P. & Mayer, J.D.** 1990. Emotional intelligence. *Imagination, Cognition, and Personality* **4**:185-211.
- Sternberg, R.J.** 1985. *Beyond IQ: A triachic theory of human intelligence*. New York: Cambridge University Press.
- . 2000. (Ed.), *Handbook of intelligence*. New York: Cambridge University Press.
- . 2007. Intelligence and culture. In **S. Kitayama & D. Cohen** (Eds.). *Handbook of cultural psychology*. New York: Guilford Press.
- Washburn, D.A.** 2007. (Ed.), *Primate perspectives on behavior and cognition*. Washington, D.C.: American Psychological Association.

Recibido: octubre 19 de 2010.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

TOLERANCIA AL PH EN EMBRIONES Y RENACUAJOS DE CUATRO ESPECIES DE ANUROS COLOMBIANOS

Liliana Marcela Henao Muñoz¹, Manuel Hernando Bernal Bautista²

Resumen

Henao Muñoz L. M., M. H. Bernal Bautista: Tolerancia al pH en embriones y renacuajos de cuatro especies de anuros colombianos. Rev. Acad. Colomb. Cienc. **35** (134): 105-110, 2011. ISSN 0370-3908.

Este trabajo evalúa la tolerancia al pH del agua en embriones y renacuajos de cuatro especies de anuros Colombianos bajo condiciones de laboratorio. De acuerdo con los valores DL_{50} , *E. pustulosus* fue la especie más sensible para sustancias básicas como ácidas, mientras que *R. granulosa* fue la más tolerante a sustancias ácidas y *R. marina* a las sustancias básicas. *H. crepitans* presentó tolerancias intermedias al pH. Entre los embriones y renacuajos no se encontró una diferencia significativa en la respuesta al pH, pero en todas las especies hubo una mayor tolerancia al hidróxido de sodio y al ácido clorhídrico en comparación con el hidróxido de amonio y el ácido acético, respectivamente.

Palabras clave: Anuros, embriones, renacuajos, pH, tolerancia, DL_{50} .

Abstract

In this work we evaluated the aquatic pH tolerance of embryos and tadpoles of four anuran Colombian species under laboratory conditions. According to the LC_{50} values, *E. pustulosus* was the most sensitive species to acid and basic pH while *R. granulosa* was the most tolerant to acid and *R. marina* to basic pH. *H. crepitans* had an intermediate pH tolerance. We did not find a significant difference in the pH tolerance between embryos and tadpoles but they were always more tolerant to hydrochloric acid and sodium hydroxide than acetic acid and ammonium hydroxide, respectively.

Key words: Anurans, embryos, tadpoles, pH, tolerance, LC_{50} .

¹ Grupo de Herpetología, Eco-Fisiología & Etología, Departamento de Biología. Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. Correo electrónico: marceh415@hotmail.com

² Grupo de Herpetología, Eco-Fisiología & Etología, Departamento de Biología. Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia. Correo electrónico: mhbernal@ut.edu.co

Introducción

La extinción y el declive de las poblaciones de anfibios es actualmente un fenómeno bien conocido (**Blaustein & Wake**, 1990; **Stuart et al.** 2004; **Wake & Vredenburg**, 2008). La alteración del hábitat, la contaminación ambiental y la aparición de enfermedades infecciosas están entre las causas más importantes de esta disminución (**Young et al.**, 2004). Sin embargo, los cambios en el pH del medio acuático donde se reproducen y desarrollan la mayoría de los anfibios también han sido considerados como un posible factor contribuyente a esta problemática (**Freda**, 1986).

Cambios en el pH de las aguas pueden ser generados por diversas sustancias agrícolas, industriales y domésticas. Incluso, compuestos presentes en el aire como el dióxido de azufre pueden constituirse en contaminantes del agua a través de su precipitación en forma de lluvia ácida (**Battarbee**, 1991). Existe numerosa documentación internacional, y hasta el momento ninguna en Colombia, en donde se ha estudiado el efecto del pH sobre la sobrevivencia de los anfibios. Por ejemplo, los efectos letales y subletales de pH ácidos sobre los anfibios han sido resumidos por **Freda** (1986) y **Pierce** (1985). En estos trabajos se ha mencionado que la disminución de las poblaciones de anfibios en Europa y Norteamérica es en gran parte debida a la contaminación ácida de los cuerpos de agua. Por otra parte, en Rusia se han reportado pH básicos de 9.5 en cuerpos de agua cercanos a vertimientos industriales y a estos cambios del pH se les ha atribuido la altas mortalidades de los anfibios de estas zonas (**Fominykh**, 2008). Adicional a estos efectos letales, también se han reportado efectos subletales de la acidez sobre los embriones y larvas de anfibios, principalmente afectando su desarrollo embrionario, crecimiento, habilidad de forrajeo o de evadir predadores (**Pierce**, 1985).

Los anfibios son organismos que se caracterizan por su dependencia de los cuerpos de agua, por tener un ciclo de vida complejo, y por poseer una gran sensibilidad fisiológica ante las condiciones ambientales (**Duellman & Trueb**, 1994). Todos estos factores hacen que sean uno de los grupos más afectados por las alteraciones de su entorno y, en consecuencia, son considerados como importantes bio-indicadores ambientales (**Wells**, 2007). Sin embargo, diferentes especies parecen ser más sensibles que otras ante los cambios del entorno, como los generados por el pH, e incluso entre diferentes estadios de desarrollo (**Grant & Licht**, 1993; **Green & Peloquin**, 2008), ya que se ha encontrado que los embriones son más sensibles al pH que las larvas (**Pierce**, 1985), aunque estos datos deben ser confirmados con más especies. Por lo tanto, en este

trabajo se reporta la tolerancia de embriones y renacuajos de cuatro especies de anuros colombianos al ser expuestos a cambios en el pH ácido y básico del agua donde se desarrollan y se compara su tolerancia de acuerdo con su estadio de desarrollo.

Materiales y métodos

Las especies sometidas a experimentación en este trabajo fueron: *Hypsiboas crepitans* (**Wied-Neuwied**, 1824), *Engystomops pustulosus* (**Cope**, 1864), *Rhinella marina* (**Linneaus**, 1758) y *Rhinella granulosa* (**Spix**, 1824). Los embriones de estas especies se colectaron en diferentes sitios en el departamento del Tolima: *Hypsiboas crepitans* y *Engystomops pustulosus* en la vereda Potrerillo, municipio de Coello, *Rhinella marina* en el corregimiento de Payandé, municipio de San Luis, y *Rhinella granulosa* en el municipio de Ibagué. En cada una de las zonas muestreadas se registró el nivel de oxígeno, con un oxímetro portátil (Hanna HI 8043), y la temperatura y el pH de las aguas con un medidor portátil de pH y temperatura (Hanna HI 8314). La temperatura en campo durante las horas de muestreo presentó un promedio de 24°C, un nivel de oxígeno de 6,62 mg/L y un pH entre 6,0 y 8,05.

Durante las salidas de campo se colectaron entre dos y tres posturas por cada especie, las cuales fueron transportadas al laboratorio de Herpetología de la Universidad del Tolima. Allí, con la ayuda de un estereoscopio ZOOM 2000 (Leyca) se observó el estadio de los embriones, para iniciar los experimentos con embriones en estadio 10 y renacuajos en estadio 25, según la clasificación hecha por **Gosner** (1960).

Para las pruebas de tolerancia al pH, diez embriones y diez renacuajos de cada especie fueron expuestos separadamente, con su réplica, a cada uno de cuatro tratamientos de pH ácidos y básicos, más el control (agua), en recipientes de vidrio de 2-L, con un litro de agua previamente declorada por aireación. Los tratamientos con el pH ácido fueron: 3,5, 4,5, 5,5 y 6,5, ajustados con ácido clorhídrico (HCl), para una serie de experimentos, y con ácido acético (CH₃COOH), para otra serie de experimentos; los pH básicos fueron: 8,5, 9,5, 10,5 y 11,5 ajustados con hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de amonio (NH₄OH) para las dos series de experimentos. Estas sustancias químicas fueron escogidas por su uso común doméstico e industrial y porque han sido generalmente utilizadas en trabajos sobre la tolerancia al pH en anfibios. El agua de los recipientes de vidrio fue renovada cada 24 horas y el pH fue ajustado cada doce horas para mantenerlo dentro de un rango de variación de 1,0. Los experimentos se realizaron en un salón

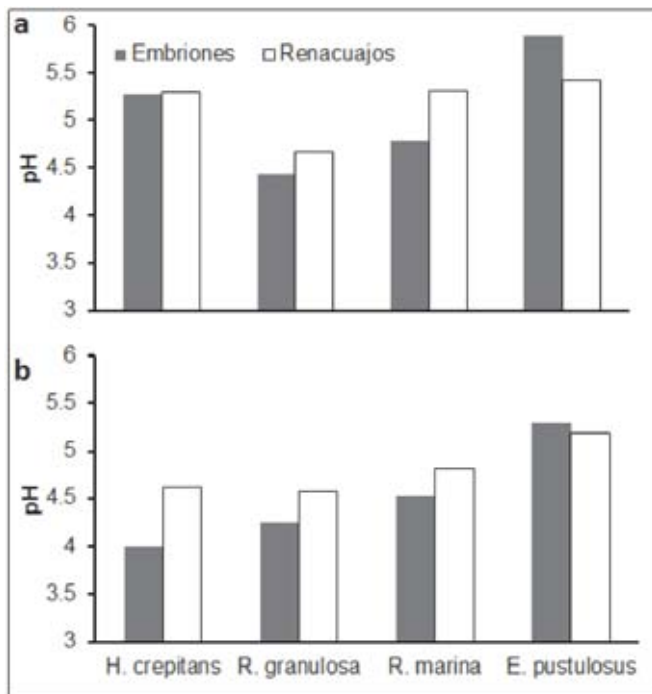


Figura 1. Representación de los valores DL₅₀ para la tolerancia al pH en los embriones y renacuajos en las especies estudiadas expuestas al ácido acético (a) y ácido clorhídrico (b).

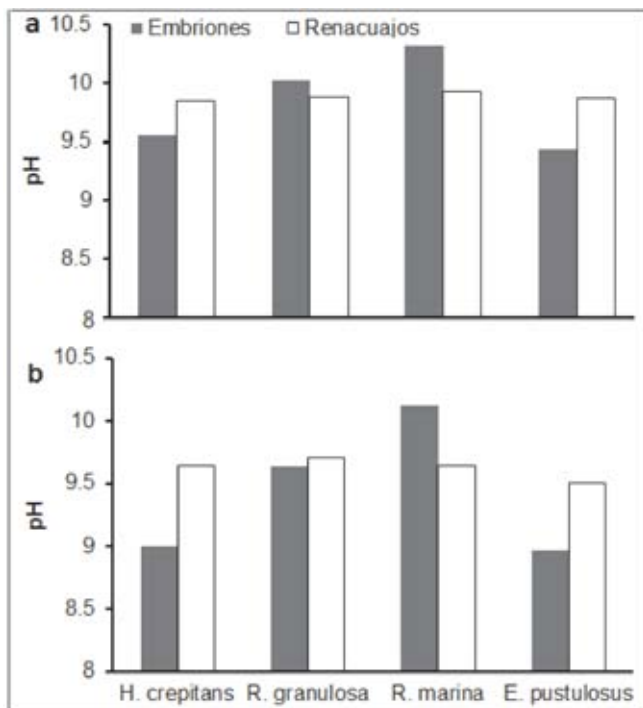


Figura 2. Representación de los valores DL₅₀ para la tolerancia al pH en los embriones y renacuajos en las especies estudiadas expuestas al hidróxido de sodio (a) e hidróxido de amonio (b).

del laboratorio con aire acondicionado a una temperatura promedio de 24.26°C, y un régimen de 12:12 horas luz-oscuridad controlada con un temporizador. El nivel promedio de oxígeno en los tratamientos fue de 7,36 mg/L. Durante el tiempo de experimentación los individuos no fueron alimentados. Las observaciones generales y el registro de los datos de mortalidad se llevaron a cabo a las 12, 24, 36 y 48 horas una vez iniciada las pruebas. A las 48 horas se terminaron los experimentos y se determinó la tolerancia al pH a través del índice de la dosis medial letal (DL₅₀).

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se utilizó el programa estadístico Probit (Versión 1.5 SAS Institute), mediante el cual se obtuvo la dosis media letal (DL₅₀) y los intervalos de confianza al 95%. La dosis media letal es el valor estimado de letalidad del 50% de los animales expuestos a los tratamientos. También, se utilizó la prueba pareada de Wilcoxon (Zar, 1996) para comparar en cada especie los valores DL₅₀ entre los embriones y renacuajos (comparación ontogénica) expuestos separadamente tanto a pH ácidos como básicos. Igualmente, se utilizó esta prueba para comparar pareadamente en los embriones y renacuajos de cada especie la respuesta entre los ácidos acético y clorhídrico, y entre las bases hidróxido de sodio e hidróxido de amonio.

Resultados

Las cuatro especies de estudio presentaron rangos de tolerancia a pH ácidos, DL₅₀, entre 4,0 y 5,88; y para pH básicos entre 8,97 y 10,31 (Figuras 1 y 2). De acuerdo con los valores DL₅₀, *E. pustulosus* fue la especie más sensible a los cambios del pH, tanto para sustancias básicas como ácidas (Tablas 1 y 2), mientras que *R. granulosa* fue la más tolerante frente a sustancias ácidas y *R. marina* ante sustancias básicas. Por su parte, los intervalos de confianza al 95% ($p < 0,05$) muestran que sólo los embriones de *E. pustulosus* fueron más sensibles que los embriones de las otras especies ante las dos sustancias ácidas (ácido clorhídrico y ácido acético) y que los embriones de *R. marina* y *R. granulosa* ante las dos sustancias básicas (hidróxido de sodio e hidróxido de amonio) (Tablas 1 y 2).

Contrastando los valores DL₅₀ entre los embriones y los renacuajos (comparación ontogénica), con respecto de las sustancias ácidas y básicas, independientemente, no se encontró una diferencia significativa (Prueba de Wilcoxon, $P > 0,05$, para todos los casos). Pero interesantemente, en los embriones y renacuajos de todas las especies se observó una mayor tolerancia al hidróxido de sodio y al ácido clorhídrico, en comparación con el hidróxido de amonio y

Tabla 1. Resultados de los valores DL₅₀ y sus intervalos de confianza al 95% para las especies de estudio expuestas a pH ácidos.

Especies	Ácido acético (CH ₃ COOH)		Ácido clorhídrico (HCl)	
	Estadio 10	Estadio 25	Estadio 10	Estadio 25
<i>H. crepitans</i>	*5,27	5,30 (5,04-5,62)	4,00 (4,00-4,50)	4,62 (4,30-4,92)
<i>R. granulosa</i>	4,44 (4,16-4,70)	4,67 (4,40-4,93)	4,26 (4,01-4,50)	4,58 (4,31-4,82)
<i>R. marina</i>	4,79 (4,42-5,15)	5,31 (5,05-5,56)	4,52 (4,20-4,82)	4,81 (4,52-5,08)
<i>E. pustulosus</i>	5,88 (5,60-6,16)	5,42 (4,92-5,56)	5,29 (4,98-5,60)	5,19 (4,88-5,51)

* Los intervalos de confianza no fueron calculados por el programa.

Tabla 2. Resultados de los valores DL₅₀ y sus intervalos de confianza al 95% para las especies de estudio expuestas a pH básicos.

Especies	Hidróxido de sodio (NaOH)		Hidróxido de amonio (NH ₄ OH)	
	Estadio 10	Estadio 25	Estadio 10	Estadio 25
<i>H. crepitans</i>	9,55 (9,16-9,90)	9,85 (9,55-10,13)	9,00 (8,67-9,29)	9,64 (9,37-9,89)
<i>R. granulosa</i>	10,03 (9,77-10,28)	9,88 (9,52-10,24)	9,64 (9,37-9,91)	9,71 (9,39-10,02)
<i>R. marina</i>	10,31 (10,04-10,58)	9,93 (9,66-10,20)	10,12 (9,83-10,4)	9,64 (9,33-9,93)
<i>E. pustulosus</i>	9,44 (9,12-9,73)	9,87 (9,57-10,17)	8,97 (8,69-9,23)	9,50 (9,13-9,83)

ácido acético, respectivamente (Prueba de Wilcoxon, $P < 0,05$, para todos los casos). Como observaciones generales se detectó que los embriones y renacuajos expuestos a pH extremos, tanto ácidos como básicos, presentaban rápidamente el desprendimiento de sus membranas externas y una muerte repentina. También, se observó un retraso en el desarrollo de los embriones y nados erráticos en los renacuajos que sobrevivieron al ser expuestos a pH menores a 5,5 o mayores a 7,5. Finalmente, los embriones y renacuajos expuestos a un pH que no generaron malformaciones aparentes continuaron su desarrollo normal, de acuerdo con las observaciones que se les siguió hasta quince días después de finalizados los experimentos.

Discusión

Los anfibios se caracterizan por su gran sensibilidad ante las condiciones ambientales. También, porque la mayoría de las especies dependen de fuentes de agua para la reproducción y el desarrollo de sus embriones y renacuajos. Así, las variables que afecten estos cuerpos de agua pueden ser críticas para la sobrevivencia de los anfibios, particularmente en sus primeros estadios de desarrollo (Duellman & Trueb, 1994; Wells, 2007). En este trabajo se comprueba que los cambios drásticos y repentinos en el pH del agua pueden generar altas mortalidades en los anuros, en tanto que cambios leves (no muy lejanos al pH neutro) pueden generar efectos subletales como anomalías embrionarias, retrasos en el desarrollo embrionario,

provocar malformaciones y nados erráticos en los renacuajos, lo que posteriormente puede reflejarse en mortalidades.

Entre las cuatro especies de estudio se observó que los embriones de *E. pustulosus* fueron los más sensibles a los cambios en el pH (Tablas 1 y 2). Luego, de manera general, le siguió *H. crepitans* y finalmente *R. marina* y *R. granulosa*. Rasanen *et al.* (2003) afirman que los diferentes rangos de tolerancia a pH ácidos se pueden explicar por la variación en la estructura y composición de las cápsulas de los huevos. Esto podría estar en concordancia con nuestros resultados en el sentido que las especies con una membrana externa protectora alrededor de sus huevos, tales como *R. marina* y *R. granulosa*, fueron más tolerantes al pH en comparación con *H. crepitans* y *E. pustulosus*, cuya capa protectora embrionaria es mucho más delgada. Particularmente, los huevos *H. crepitans* son puestos sobre la superficie del agua a manera de una película delgada, mientras que los de *E. pustulosus* son protegidos por un nido de espuma (Duellman & Trueb, 1994), el cual fue removido durante los experimentos de este trabajo.

En las cuatro especies de estudio los valores DL₅₀ para los dos estadios ontogénicos comparados intra-específicamente, embriones Vs renacuajos, fueron ligeramente diferentes y contradictorios. Trabajos previos han reportado que los anuros en los primeros estadios de desarrollo embrionario son más sensibles ante los cambios del pH del

agua circundante que en una etapa tardía o larvaria (Freda, 1991). Sin embargo, nuestros resultados no concuerdan con estos reportes. Es posible que esta diferencia se pueda deber a alguna variación inter-específica, atribuida a la capacidad de las especies en cada estadio ontogénico para regular la pérdida de iones a través de la membrana celular (Frisbie & Wyman, 1992; Lehtinen & Skinner, 2006). Así, dado que los embriones de *E. pustulosus* fueron los más sensibles a los cambios en el pH, queda por establecer si hay alguna correlación entre esta sensibilidad y la capacidad de regulación iónica de acuerdo con el modo reproductivo y la calidad del agua donde se reproducen las especies de anfibios.

Los renacuajos de las cuatro especies expuestas a diferentes rangos de pH y que lograron sobrevivir presentaron un desarrollo posterior normal. Esto concuerda con otros estudios en anfibios que muestran que los renacuajos expuestos a pH ácidos no letales son capaces de alcanzar su metamorfosis (Freda, 1991). Sin embargo, Brady & Griffiths (1995), también han demostrado que los embriones de las salamandras *Triturus helveticus* y *Triturus vulgaris* incubados bajo condiciones de acidez (pH 5,5) presentan un desarrollo más lento. Nuestras observaciones en los embriones expuestos a condiciones de acidez cercanas a la DL_{50} mostraron esta misma tendencia, pero dado que no se cuantificó esta información es un trabajo que queda por realizar, incluyendo el estudio de otros efectos subletales, tales como la capacidad de desempeño locomotor en renacuajos y los efectos sobre su tamaño y tasa de crecimiento. Freda & Dunson (1984), trabajando con renacuajos, indican que la exposición a pH ácidos letales (2,5-3,5) provoca la pérdida excesiva de iones de sodio y cloro, y que la muerte se produce cuando los niveles de sodio alcanzan el 50% de su contenido inicial. Para el caso de los embriones, se considera que la muerte a pH bajos se debe principalmente a un efecto selectivo que conduce a la constricción de las membranas extraembrionarias (Dunson & Connell, 1982).

En este estudio se utilizaron cuatro compuestos químicos (dos básicos y dos ácidos) para mantener los valores de los pH experimentales. Estos compuestos son ampliamente usados a nivel industrial y doméstico, y fácilmente pueden llegar directa o indirectamente a los cuerpos de agua donde se reproducen los anuros y desarrollan sus embriones. Para las sustancias básicas se empleó hidróxido de sodio, correspondiente a una base fuerte, e hidróxido de amonio, como una base débil. Interesantemente, durante los experimentos con estas sustancias, se encontró que los embriones y renacuajos de las cuatro especies en todos los casos presentaron una mayor tolerancia al

hidróxido de sodio que al hidróxido de amonio, e igualmente una mayor tolerancia al ácido clorhídrico en comparación con el ácido acético (Figuras 1 y 2). Por lo tanto, los cambios en el pH de las aguas tienen un efecto letal sobre los anuros, pero la tolerancia al pH puede estar estrechamente ligada con la naturaleza química del ácido o la base y, en este trabajo, los ácidos y bases débiles fueron más letales que los ácidos y bases fuertes a un mismo valor de pH. Así, estos resultados abren la posibilidad de realizar más experimentos con otras sustancias químicas y especies, para verificar en que medida la tolerancia a un determinado pH depende del tipo de la sustancia química que lo genere y cuál es la sensibilidad de los anfibios antes estas sustancias. Esto podría resultar de mucho interés para la comunidad científica, ya que hay numerosos trabajos en los que se reportan los efectos independientes e interactivos del pH con otros factores ambientales y cuyos resultados podrían ser diferentes de acuerdo con la sustancia química que se utilice para mantener los pH experimentales.

Agradecimientos

A Ana María Leiva, Mónica Gutiérrez, Angélica Beltrán y Gloria Palma, por el apoyo en el desarrollo de esta investigación. Este trabajo fue parcialmente patrocinado por el fondo de investigaciones de la Universidad del Tolima a través del proyecto 120107.

Bibliografía

- Battarbee, R. W. 1991. Acid-rain and acid waters. *Nature* **350**:285-285.
- Blaustein, A. R. & Wake, D. B. 1990. Declining amphibian populations: A global phenomenon. *Trends in Ecology and Evolution* **5**:203-204.
- Brady, L. D. & Griffiths, R. A. 1995. Effects of pH and aluminium on the growth and feeding behaviour of smooth and palmate newt larvae. *Ecotoxicology* **4**:299-306.
- Dunson, W. A. & Connell, J. 1982. Specific inhibition of hatching in amphibian embryos at low pH. *Journal of Herpetology* **16**:314-316.
- Duellman, W. E. & Trueb, L. 1994. *Biology of Amphibians*. Johns Hopkins University Press. Baltimore.
- Freda, J. 1986. The influence of acidic pond water on Amphibians - A Review. *Water Air and Soil Pollution* **30**:439-450.
- _____. 1991. Long-term monitoring of amphibian populations with respect to the effects of acid deposition. *Water, Air and Soil pollution* **55**:445-462.
- _____ & Dunson, W.A. 1984. Sodium balance of amphibian larvae exposed to low environmental pH. *Physiological Zoology* **57**:435-443.

- Frisbie, M. P. & Wyman, R. L.** 1992. The effect of environmental pH on sodium balance in the red-spotted newt, *Notophthalmus viridescens*. Archives of Environmental Contamination and Toxicology **23**:64-68.
- Fominykh, A. S.** 2008. An Experimental Study on the Effect of Alkaline Water pH on the Dynamics of Amphibian Larval Development. Russian Journal of Ecology **39**:145-147.
- Grant, K. & Licht L.** 1993. Acid tolerance of anuran embryos and larvae from Central Ontario. Journal of Herpetology **27**:1-6.
- Green L. & J. E. Peloquin.** 2008. Acute toxicity of acidity in larvae and adults of four stream salamander species (Plethodontidae). Environmental Toxicology and Chemistry **27**:2361-2367.
- Gosner, K. L.** 1960. A simplified table for staging anuran embryos and larvae with notes on identification. Herpetologica **16**:183-190.
- Lehtinen R. & Skinner, A.** 2006. The enigmatic decline of Blanchard's Cricket Frog (*Acris crepitans* Blanchardi): A test of the habitat acidification hypothesis. Copeia pp. 159-167.
- Pierce, B. A.** 1985. Acid tolerance in Amphibians. Bioscience **35**:239-243.
- Rasanen, K., Laurila A. & Merila, J.** 2003. Geographic variation in acid stress tolerance of the moor frog, *Rana arvalis*. II. Adaptive maternal effects. Evolution **57**:363-371.
- Stuart, S. N., Chanson, J. S., Cox, N. A., Young, B. E., Rodriguez, A. S. L., Fischman, D. L. & Walter, R. W.** 2004. Status and trends of amphibian declines and extinctions worldwide. Science **306**:1783-1786.
- Wake, D. B. & Vredenburg, V. T.** 2008. Are we in midst of the sixth mass extinction?. A view from the world of amphibians. Proceedings of the National Academy of Sciences **105**:11466-11473.
- Young, B. E., Stuart, S.N., Chanson, J. S., Cox, N. A. & Boucher, T. M.** 2004. Disappearing Jewels. The status of new world amphibians. Arlington, VA: Natureserve.
- Wells, K. D.** 2007. The Ecology and Behavior of Amphibians. The University of Chicago Press. Chicago.
- Zar, J. H.** 1996. Biostatistical Analysis, 3rd edition. Prentice Hall. New Jersey.

Recibido: febrero 10 de 2011.

Aceptado para su publicación: febrero 28 de 2011.

FE DE ERRATAS 1

Como autor de correspondencia, y en nombre de los otros autores del artículo titulado: ¿ES SAYORNIS NIGRICANS (AVES: TYRANNIDAE) UN BUEN INDICADOR DE CALIDAD AMBIENTAL EN LA ZONA URBANA DE CALI, COLOMBIA?; el cual fue publicado en el volumen 34 (132), se hacen las siguientes correcciones ya que se encontraron dos errores en el artículo publicado que alteran de manera importante el contenido del mismo.

Ambos se encuentran en la sección de resultados. Las figuras 4a y 4b son iguales, y los valores del área del territorio de la especie contienen un cero adicional (los valores reales son 260 m², 220 m² y 280 m², mientras que los valores publicados son 2600 m², 2200 m² y 2800 m²).

FE DE ERRATAS 2

En el artículo: UN MODELO INFLACIONARIO SIN INFLATONES cuyo coautor es Gabriel Gómez, se hacen las siguientes correcciones:

El resumen fue editado, de tal manera que un segmento de una frase fue cortado haciendo que la frase completa carezca de sentido. Concretamente, la frase a la que hago alusión debe decir:

"Para dicho modelo, la expansión acelerada del Universo se sigue a partir de la transferencia de energía de vacío a radiación (en el caso de que la energía de vacío no sea transferida a la radiación, no se generará una época inflacionaria exitosa) sin la necesidad de campos escalares fundamentales tales como el inflatón".

Adicionalmente, hay tres errores menores:

1. La primera palabra clave "Cosmología", debería aparecer con su letra inicial en mayúscula.
2. En la parte superior de las páginas impares, se debería leer GÓMEZ G., RODRÍGUEZ Y.: "UN MODELO INFLACIONARIO SIN INFLATONES" en vez de leerse "GÓMEZ G., Y. RODRÍGUEZ Y.: "UN MODELO INFLACIONARIO SIN INFLATONES".
3. En la página final, la fecha de recepción del artículo es el 9 de Noviembre de 2009, no el 9 de Noviembre de 2010.