

## **Evaluación comparativa de algunas características limnológicas de seis ambientes leníticos de Colombia**

### **Comparative evaluation of some limnological characteristics of six lentic environments of Colombia**

*Esnedy Hernández<sup>1\*</sup>, Néstor Aguirre<sup>1</sup>, Jaime Palacio<sup>1</sup>, John Jairo Ramírez<sup>2</sup>, Santiago R. Duque<sup>3</sup>, Cástor Guisande<sup>4</sup>, Nelson Aranguren<sup>5</sup>, Martha Mogollón<sup>6</sup>*

<sup>1</sup> Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental – GAIA. Universidad de Antioquia Calle 67 N°. 53-108. Medellín, Colombia.

<sup>2</sup> Grupo de Investigación Limnbase, Universidad de Antioquia, Calle 67 N°. 53-108. Medellín, Colombia.

<sup>3</sup> Instituto Amazónico de Investigaciones-Imani, Universidad Nacional de Colombia – Sede Amazonia. Leticia, Colombia, código postal 910001.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias. Universidad de Vigo. Campus Lagoas-Marcosende, 36310-Vigo, España.

<sup>5</sup> Unidad de Ecología en Sistemas Acuáticos-UDESA. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia, código postal 15001000.

<sup>6</sup> Universidad de Córdoba, Programa de Biología, Facultad de Ciencias Básicas e Ingenierías, Carrera 6 # 76 - 103 Montería, Colombia.

(Recibido el 10 de enero de 2012. Aceptado el 19 de septiembre de 2013)

#### **Resumen**

Este estudio propuso evaluar algunas características limnológicas de seis ambientes leníticos de Colombia ubicados en un gradiente altitudinal de las regiones Caribe, Andina y Amazónica. Estos ambientes presentan diferente origen, tipo y variabilidad climática, física y química, esto es una evidencia de que en los ambientes ecuatoriales, como los de Colombia, varían entre sí y requieren un enfoque local enlazado con patrones regionales y geográficos que influyen la limnología del sistema. Los ambientes estudiados corresponden a ciénagas y lagos de inundación de tierras bajas y lagos de alta montaña, los cuales fueron monitoreados en diferentes estaciones

---

\* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 55 90, fax: + 57 + 4 + 219 65 68, correo electrónico: esnedy.hernandez@gmail.com (E. Hernández)

y momentos hidrológicos; los resultados fueron analizados en torno a sus diferencias ambientales y tróficas. La ubicación altitudinal y en consecuencia el tipo, origen, morfometría y condición hidroclimática que afecta los seis sistemas promueven cambios significativos en el régimen de precipitación, la temperatura, nivel y transparencia del agua, la concentración de nutrientes, el oxígeno disuelto, el pH, la conductividad eléctrica y la clorofila *a*.

**Palabras clave:** Ciénaga, lagos de inundación, lago, estado trófico

### **Abstract**

This study proposed to evaluate some limnological characteristics of six lentic environments in Colombia located at the altitudinal gradient in Caribbean, Andean and Amazon regions. These environments have different origin, type and physic, chemic and climatic variability. This is clear evidence that equatorial environments, like the ones found in Colombia presents variation among them and requires a local approach linked with regional and geographical patterns which influences the limnology of system. The studied environments correspond to high mountain lakes and lowland floodplain, which were monitored in different hydrological seasons and times and the results were reviewed with respect to their environmental and trophic differences. Altitudinal location and therefore the type, origin, morphometry and hydroclimatic conditions which affects the six systems, promotes significant changes in the precipitation regime, temperature, level and water transparency, nutrients concentrations, dissolved oxygen, pH, electrical conductivity and chlorophyll *a*.

**Keywords:** Swamp, floodplain lake, lake, trophic state

### **Introducción**

Colombia está ubicada en la esquina noroeste de América del sur exhibiendo complejidades geográficas, ambientales y hidroecológicas en las que los Andes juega un papel importante. En términos de cantidad y distribución de precipitación los Andes son descritos como “una isla seca en un mar de lluvia” y su dinámica atmosférica y variabilidad en la precipitación, influyen significativamente la biodiversidad [1-2]. En escalas de tiempo estacionales, es bien sabido que el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) ejerce un fuerte

control sobre el ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia [3-5]. Esta posición y la geografía regional atribuye a Colombia como un país rico en ambientes leníticos en donde la longitud fluvial total sobrepasa 15.000 km y las masas de agua comprenden una superficie cercana a los tres millones de hectáreas [6]. Bajo este contexto los sistemas acuáticos difieren en características morfológicas, fisiográficas y limnológicas debido a su hidroclimatología, ubicación altitudinal, tipo, origen y geología de sus cuencas. Mientras en ecosistemas de alta montaña se puede encontrar transparencias superiores a 10 m, en ambientes de inundación de zonas bajas el

carácter turbio genera transparencias entre 1 y 3 m de profundidad.

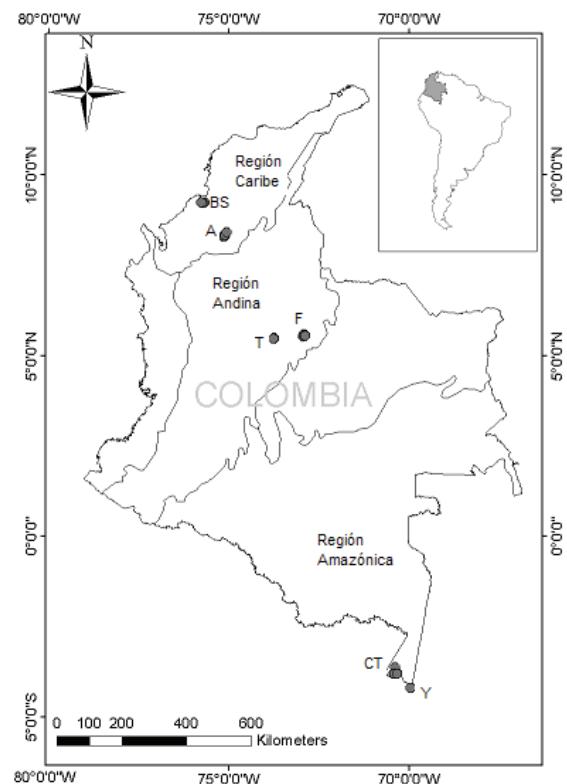
Esta investigación incluye cuatro ambientes de origen riverino o de inundación, considerados como ambientes continentales poco explorados, pero de gran importancia ambiental y ecológica. En Colombia, las planicies de inundación del Caribe se conocen como “ciénagas” y se localizan principalmente en las cuencas de los ríos Magdalena, Bajo San Jorge, Bajo Cauca, Atrato y Sinú. Aproximadamente 1938 ciénagas ocupan 4.700 km<sup>2</sup>, cobertura que las sitúa como el principal sistema lenítico del país [5]. Otros ambientes de origen fluvial considerados en este trabajo son los lagos de planicie de inundación del río Amazonas, los cuales cambian de nivel, área y volumen según el período climático [7]. Su clasificación térmica es también polimíctica, con temperatura superior a 25°C; sus aguas corresponden a la clasificación de blancas, claras y negras [7]. El conocimiento ecológico de las ciénagas y lagos de inundación, es abordado desde el concepto del pulso [8, 9] y trabajado en Suramérica bajo “humedal” [10]. En Colombia no se tiene referencia del uso de análisis de componentes principales en la caracterización alterna de diferentes sistemas leníticos. El estudio también incluye un lago profundo y una laguna somera ubicados entre los 2543 y 3000 msnm en la provincia de alta montaña tropical, estos sistemas se encuentran ubicados en áreas de sedimentación y depositación glacial y son influenciados por procesos de colmatación y eutrofización asociados a actividad antrópica. Son de origen tectónico y glacial, tienden a presentar un pH ligeramente ácido, conductividad baja y alta transparencia; este tipo de ambientes son considerados como lagos polimícticos fríos [11].

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

Los seis sistemas estudiados pertenecen a tres regiones de Colombia y se distribuyen de la

siguiente manera: 1) al norte del país, en la región Caribe, en el departamento de Córdoba, se localizan la ciénaga de Ayapel y tres ciénagas del Bajo Sinú. 2) En la región Andina, en el departamento de Boyacá, se encuentran el Lago Tota y la Laguna Fúquene como sistemas de alta montaña y 3) Al sur, en el departamento del Amazonas se ubican los lagos de inundación El Correo, Tarapoto y Yahuaraca representantes de la región Amazónica Colombiana. La localización de los diferentes sistemas se señala en la figura 1 y las características generales se detallan en la tabla 1.



**Figura 1** Localización general de los sistemas de estudio. BS: Complejo cenagoso del Bajo Sinú, A: Ciénaga de Ayapel, T: Lago Tota, F: Laguna Fúquene, Y: Lago Yahuaraca, CT: Lagos Correo y Tarapoto

**Tabla 1** Características generales de los ambientes estudiados

<i>Región</i>	<i>Ecosistema</i>	<i>Características Generales</i>	<i>Altitud, área, prof max</i>	<i>Influencia pluviométrica</i>
<b>Caribe</b>	Complejo Cenagoso del Bajo Sinú (9°13'26.89"N 75°46'31.44"W)	Ciénagas San Sebastián, Purísima y Momil. Planicies de inundación asociadas al río Sinú (Lorica-Córdoba).	20 msnm D máx 5 m temp. 28°C	Temporada de lluvias: julio y octubre; época seca: agosto y febrero.
	Complejo Cenagoso de Ayapel (8° 18'57,3"N 75° 07' 34,5"W)	Planicie de inundación asociada al río San Jorge (Ayapel-Córdoba).	23 msnm 125km <sup>2</sup> D máx 7 m temp. 29°C	Lluvias de abril a noviembre y época seca de diciembre a marzo.
<b>Amazónica</b>	Lago Yahuaraca (4° 11' 48"N 69° 57' 19"W)	Originado en depresión de la llanura de inundación formada por el río Amazonas (Leticia-Amazonas).	82 msnm 2 km <sup>2</sup> D máx 7m temp. 26°C	Aporte de aguas durante noviembre a marzo.
	Lago Tarapoto y Correo (3°47' 30,6"N 70°25' 51"W)	Ubicados en el trapecio amazónico colombiano, en jurisdicción del municipio de Puerto Nariño (Leticia-Amazonas).	82 msnm 5 km <sup>2</sup> D máx 6 m temp.26°C	Aporte de aguas desde noviembre a marzo.
<b>Andina</b>	Lago Tota (5°32'99" N 72°55'42"W)	Lago natural de montaña, origen tectónico-glaciar (Tota-Boyacá).	3015 m.s.n.m 60km <sup>2</sup> D máx 60 m temp. 12°C	Estación lluviosa entre abril y noviembre, y una seca de diciembre hasta marzo.
	Laguna Fúquene (5°27'94"N 73°45'19"W)	Lago natural de Montaña ubicado en el Valle Ubaté y Río Suarez, origen glaciar. (Fúquene-Cundinamarca)	2543 msnm 30 km <sup>2</sup> D máx 6 m temp. 12°C	Periodos húmedos de marzo a mayo y septiembre a noviembre; secos de diciembre a febrero y julio a agosto.

### Diseño de Muestreo

En cada sistema se muestrearon en la zona limnética del espejo principal entre dos y ocho estaciones durante tres a cuatro períodos climáticos en una serie anual entre los años 2005 y 2007. A excepción del complejo cenagoso del Bajo Sinú, en todos los sistemas fueron realizados cuatro muestreos durante diferentes épocas climatológicas. Las muestras para los análisis físicos, químicos y de clorofila *a* se colectaron

por medio de una botella tipo Van Dorn de 2.5 L en la subsuperficie, a la altura de la profundidad Secchi y a tres veces dicha profundidad.

### Variables hidroclimatológicas

La información mensual de precipitación, brillo solar y radiación ultravioleta (banda 305nm), fue obtenida de mapas y del banco de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en diferentes estaciones

climatológicas de las regiones Caribe, Andina y Amazónica. Específicamente los registros del Caribe fueron adquiridos por el grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA de la Universidad de Antioquia, los correspondientes a la región amazónica en el Instituto Amazónico de Investigaciones (Imani) de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Amazonía y los asociados a la región Andina a [12].

### **Variables ambientales**

En cada sistema se midieron *in situ* la profundidad máxima (m), la profundidad Secchi (m), la temperatura del agua (°C), el oxígeno disuelto (mg/l), el porcentaje de saturación, el pH y la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Adicionalmente, se colectaron muestras de agua para el análisis de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), silicatos ( $\text{SiO}_2$ ) y clorofila *a* ( $\mu\text{g}/\text{l}$ ). Las muestras fueron pasadas por filtros de fibra de vidrio de  $0.45 \mu\text{m}$ . El análisis de nutrientes se efectuó con un autoanalizador BRAN + LUEBBE AAIH Norderstedt-Germany. El análisis de clorofila *a* se llevó a cabo en muestras liofilizadas resuspendidas en metanol al 95%, usando cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en una columna simétrica Cs de  $150 \times 4.6 \text{ mm}$  y con un tamaño de poro de  $100 \text{ \AA}$ .

### **Procesamiento y análisis de la información**

Los resultados fueron descritos mediante la media aritmética, los valores máximos y mínimos y el coeficiente de variación. Con el fin de establecer una ordenación de las variables ambientales en relación a los sistemas se realizó un análisis de componentes principales (ACP) que incluyó las estaciones y muestreos, previo a este abordaje las variables fueron estandarizadas y transformadas, así como también fue determinado que entre las profundidades de muestreo no hubo diferencias significativas. El análisis fue ejecutado en el programa CANOCO 4.5. Este análisis asume

componentes que representan una combinación de las variables originales y un número relativamente pequeño de componentes que explica la mayor parte de la variación total. Ya que es un método de tipo descriptivo, básicamente permite obtener una representación dimensional que no supone dependencias y permite observar tendencias que discriminan el sistema mediante la información disponible.

Para establecer la clasificación trófica de los sistemas estudiados, se analizaron los resultados de las concentraciones de clorofila *a* interpretados de acuerdo a la clasificación de lagos tropicales de [13-14]. Adicionalmente, se utilizó el índice de estado trófico (IET) propuesto por [15] modificada por [16] y justificada por [17] para (Disco Secchi),  $[\text{P.P.O}_4^-]$  y [Clorofila *a*].

### **Resultados**

Las principales diferencias entre los sistemas están representadas por la precipitación regional, la temperatura del agua, la profundidad máxima y la profundidad Secchi. Los lagos de inundación del Amazonas y especialmente las ciénagas del Caribe presentaron la menor transparencia (DS 0.46m) y la mayor temperatura del agua ( $> 31^\circ\text{C}$ ), así como la menor profundidad media (2-3 m de Dmax). Aunque los dos sistemas de la región Andina presentaron bajas temperaturas medias ( $15.9 - 18.3^\circ\text{C}$ ), difieren en profundidad y transparencia; mientras el lago Tota registró una profundidad media de 36.4 m y una transparencia Secchi de 6.7 m, la laguna Fúquene registró valores promedio de 2.3m de profundidad y 1.2 m de transparencia (Tabla 2). Sin embargo, al comparar la relación entre la profundidad de la zona eufótica y la profundidad máxima (Deuf/Dmax) se encontró que el ambiente con mayor grado de iluminación con respecto a la profundidad máxima es la laguna Fúquene con una relación de 1.67, en contraste, la ciénaga de Ayapel y el lago Yahuaraca registraron 0.52 y 0.80 respectivamente (Tabla 2).

**Tabla 2** Media aritmética (x) y porcentaje de coeficiente de variación (%CV) de las variables ambientales estimadas entre las estaciones y muestreos considerados en cada sistema

Sistema Altitud (msnm)	Precipitación mensual (mm)	UV ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{nm}$ )	Brillo solar (hora sol/da)	Dmax (m)	DS (m)	Deuf	Deuf/Dmax	Tem (°C)	% Sat $\text{O}_2$	$\text{O}_2$ (mg/l)	pH	$\mu\text{S}/\text{cm}$	$[\mu\text{M}/\text{L}]$				Clorofila a ( $\mu\text{g}/\text{l}$ )		
													$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{PO}_4^-$		$\text{SiO}_2$	
Ciénagas del Caribe	Ayapel (m.s.n.m 23) N=34	280	7,50	5,00	2,99	0,46	1,24	0,52	32,23	72,40	5,52	6,77	35,24	7,20	0,28	28,24	1,64	129,50	0,85
	Bajo Sinú (m.s.n.m 20) N=26	128	6,67	5,50	2,02	0,46	1,25	0,62	31,02	76,36	5,59	7,44	248,56	1,13	0,21	3,35	0,53	107,27	5,72
Lagos de Inundación del Amazonas	Correo y Tarapoto (m.s.n.m 90) N=39	315	7,63	4,30	7,06	0,82	2,23	0,46	29,60	53,77	5,33	7,24	646,60	0,25	0,18	5,52	1,28	154,57	3,44
	Yahuaraca (m.s.n.m 82) N=55	299	7,50	4,36	4,16	1,01	2,73	0,80	29,70	39,25	3,02	7,49	364,96	0,47	0,20	5,33	1,18	231,68	4,67
Lagos Andinos	Tota (m.s.n.m 3015) N=59	17	10,50	5,25	36,37	6,74	18,18	0,54	15,89	56,70	5,57	7,70	99,51	0,35	0,06	1,51	0,27	19,64	0,83
	Fúquene (m.s.n.m 2550) N=30	16	10,43	5,30	2,34	1,21	3,27	1,67	18,29	45,46	4,47	7,48	124,92	0,40	0,08	4,80	1,06	81,24	1,63

Dmax: profundidad máxima, DS: profundidad Secchi, Deuf: profundidad de la zona eufótica, Tem: temperatura.

Aunque el pH registró diferencias, el rango de valores osciló entre 6.7 y 7.7 unidades, indicando aguas ligeramente neutras a básicas. En contraste, la conductividad fluctuó entre 35 y 646  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con valores significativamente superiores y variables al interior de los lagos de inundación amazónicos (tabla 2).

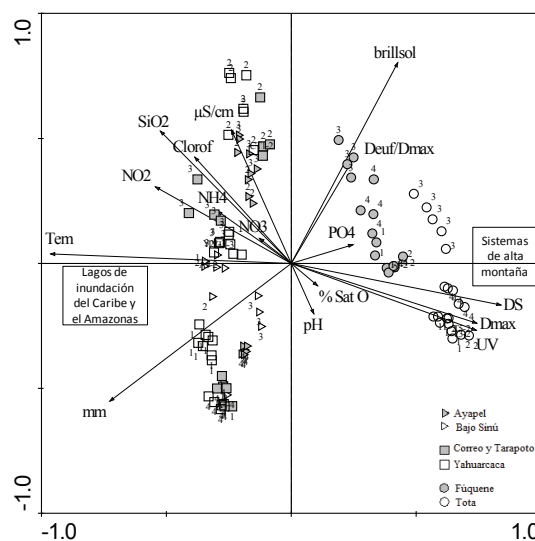
En los seis ambientes los porcentajes de saturación del oxígeno variaron entre períodos de muestreo, especialmente en los lagos de inundación del Bajo Sinú y Correo-Tarapoto. El porcentaje de saturación varió entre 39,25 y 76.36%, valores medios registrados en el lago Yahuaraca y el complejo cenagoso del Bajo Sinú (tabla 2).

Aunque las concentraciones de nitrógeno y fósforo fueron generalmente bajas, los mayores niveles de amonio, nitrato y ortofosfato se cuantificaron en la Ciénaga de Ayapel del Caribe con valores medios moderadamente bajos e inferiores a 1.64  $\mu\text{M}/\text{L}$  para  $\text{PO}_4^-$ . En todos los sistemas la concentración de amonio fue mayor a la de nitrato, especialmente en la ciénaga de Ayapel. La concentración media del dióxido de sílice fue superior en los lagos de inundación donde fluctuó entre 154.57 y 231.68  $\mu\text{M}/\text{L}$ . En contraste, en los sistemas de alta montaña se registraron concentraciones significativamente menores (19.64 a 81.24  $\mu\text{M}/\text{L}$ ) (tabla 2).

La clorofila *a* osciló entre 0.88 y 5.72  $\mu\text{g}/\text{l}$  (tabla 2) y según [13] correspondió a ambientes oligotróficos en Ayapel, Tota y Fúquene y mesotróficos en Bajo Sinú, Correo-Tarapoto y Yahuaraca. En contraste, la clasificación propuesta por [14] correspondió a categorías  $\beta$ -oligotrófica en la ciénaga de Ayapel y el lago Tota;  $\gamma$ -Oligotrófica en la laguna Fúquene y  $\alpha$ -mesotrófica en la ciénaga del Caribe del bajo Sinú y en los lagos de inundación amazónicos El Correo, Tarapoto y Yahuaraca.

El análisis de componentes principales realizado con los seis sistemas (figura 2) indica que el primer componente respondió por el 35.2% y el segundo por el 52.1% de la varianza. La transparencia ( $r=0.70$ ), la profundidad máxima ( $r=0.54$ ) y la radiación UV ( $r=0.55$ ) influyeron

con mayor importancia el área positiva del eje I, los sistemas relacionados en esta área corresponden al lago Tota y la laguna de Fúquene. El pH, el porcentaje de saturación del oxígeno y los ortofosfatos contribuyeron en menor grado a la varianza explicada. En el lado negativo del primer componente, la temperatura ( $r=0.92$ ), la precipitación ( $r=0.53$ ) y la sílice ( $r=0.52$ ) fueron las variables más importantes, mientras los nutrientes fueron menos influyentes. En este eje estuvieron asociados las ciénagas del Caribe y los lagos amazónicos. Según su posición en el gráfico, se podría decir además que Tota y Fúquene presentaron tendencias a menores concentraciones de nitratos, amonio y sílice, y menor temperatura y precipitación. En contraste, estos ambientes están influenciados por una mayor radiación incidente y transparencia en sus aguas, especialmente el lago Tota (Figura 2).

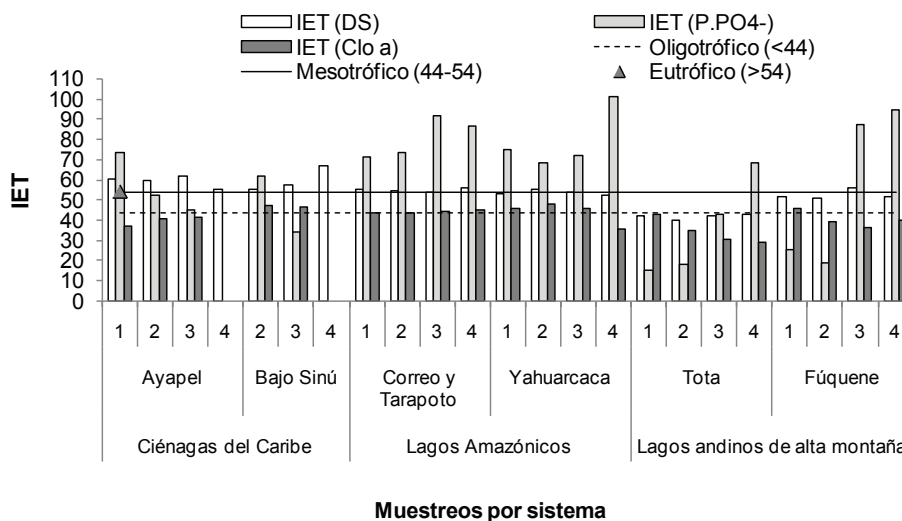


**Figura 2** Análisis de componentes principales (ACP) de variables ambientales en estaciones y muestreos de los seis sistemas de estudio. Los números hacen referencia al período de muestreo

En relación a la evaluación de los índices de estado trófico (IET) relacionados con la profundidad Secchi (DS), el fósforo soluble como  $\text{P.P.O}_4^-$  y la clorofila *a*, los ambientes pueden ser categorizados desde escalas oligotróficas a

eutróficas (Figura 3). Al observar la tendencia espacial y temporal del IET (DS) se observó que el lago Tota es el único sistema con condiciones oligotróficas durante el período de estudio, en

contraste, los lagos de inundación amazónicos se encontraron en un rango mesotrófico, mientras que las ciénagas del Caribe mostraron en la mayoría de los muestreos un carácter eutrófico.



**Figura 3** Perfil espacial y temporal de los índices de estado trófico (IET) basados en las concentraciones de fósforo, clorofila a y profundidad Secchi

Aunque el empleo del índice asociado al disco Secchi es relativamente limitado en ambientes donde la transparencia es afectada por la presencia de material abiogénico en suspensión, el contraste con los demás índices permitió establecer tendencias similares en cuanto al estado trófico entre los sistemas y períodos de muestreo.

En relación al IET relacionado con la clorofila *a* todos los sistemas a excepción del Bajo Sinú y Yahuaracaca, (de condición mesotrófica), tienden a presentar estados oligotróficos. Sin embargo, al usar el índice asociado al  $P.PO_4^-$  se evidenció que los cuatro periodos de estudio considerados en ambos lagos de inundación amazónicos, así como dos muestreos de la laguna Fúquene y un periodo de los sistemas Tota, Ayapel y Bajo Sinú fueron clasificados como eutróficos bajo el enfoque de este índice en particular (figura 3).

### Análisis de Resultados

Este estudio evidenció que la variabilidad de los sistemas evaluados está representada por un gradiente altitudinal y en consecuencia un rango climático, geográfico e hidrológico que influencia el tipo, origen y limnología en cada ambiente. Para explicar el comportamiento y las repercusiones ecológicas en estos ambientes, es necesario tener en consideración que a diferencia de los sistemas templados, los sistemas ecuatoriales reciben una frecuencia de insolación y lluvia, acompañado de un fotoperíodo relativamente estable en el año, esta dinámica fue especialmente evidenciada por medio de perfiles temporales en ciénagas y lagos de inundación de las tierras bajas del Caribe y el amazonas, en donde tienen lugar los pulsos de inundación.

Al incluir ambientes diferentes se reconocieron variaciones ambientales en la transparencia, la



concentración de nutrientes, el oxígeno disuelto, el pH, la conductividad y la clorofila *a*. Estas variables generaron tendencias diferenciales según la ubicación y el tipo de sistema ya que el régimen de la precipitación, la temperatura, la profundidad máxima y el grado de turbidez se encuentran ligados a la adecuación del ambiente en torno a la geografía regional. Considerando la estacionalidad representada por los períodos de muestreo, los lagos de inundación presentaron el mayor grado de variación. Las ciénagas ubicadas en la región Caribe fueron los sistemas menos profundos, más turbios y cálidos, mientras los sistemas de alta montaña presentaron menores temperaturas debido a su altitud y origen tectónico-glacial, los dos sistemas andinos correspondieron al lago Tota, el cual es más profundo y transparente, en contraste, la laguna Fúquene presenta un carácter somero y turbio. Las diferencias en la temperatura están asociadas a la ubicación altitudinal. Las ciénagas de la región Caribe se ubican a 20 msnm con temperaturas ambientes superiores a los 28 °C y corresponden a zonas de bosque húmedo tropical, el régimen de distribución de la precipitación es de tipo unimodal y fluctúa entre 2.000 y 2.500 mm/año [18]. La precipitación en la región amazónica, al sur de Leticia, es unimodal y fluctúa entre 3216 y 4276 mm/año [19]. Los ambientes de alta montaña, ubicados entre 2.543-3.015 msnm, corresponden a pisos térmicos frío y páramo y en consecuencia, la temperatura ambiente no supera los 19°C [18], la precipitación alcanza 2000mm/año [18].

Mientras la temperatura no registró variaciones importantes al interior de los sistemas, la precipitación fluctuó significativamente en el tiempo, especialmente en las ciénagas y lagos de inundación de las regiones Caribe y Amazónica donde la precipitación mensual osciló entre 40 y 537 mm durante los períodos de estudio. El régimen de las lluvias en los sistemas tropicales ha sido reportado como un factor de ordenamiento temporal de los procesos y es uno de los mayores responsables de los cambios en las condiciones ambientales [20]. La precipitación, la temperatura, la transparencia Secchi y la concentración de

ortofosfatos discriminaron los lagos de planicie de inundación del Caribe y el Amazonas de los sistemas andinos. Otro factor importante que diferenció estos ambientes fue el registro de menores concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SiO}_2$  en los sistemas andinos. Estas diferencias se deben a las características geoquímicas, al origen y a la morfología de los sistemas. La ecología estacional para las ciénagas y lagos de inundación en el trópico ha sido explicada por el modelo del pulso [9] y su importancia para la diversidad y como agente regulador de los aportes de nutrientes, del transporte y flujo de sedimentos y materia orgánica, ha sido documentada por [10, 21-23], entre otros.

Los suelos de un lago somero de planicie de inundación del Caribe como la ciénaga de Ayapel se encuentran asociados a la presencia de arcillas expandibles, vertisoles, acumulación de sales, sodio y aridisoles y materiales de tipo orgánico e inorgánico involucrados en la dinámica de la transición acuático-terrestre durante los períodos de inundación influenciados por la conexión con el río y la época hidroclimática. Por su parte la cuenca amazónica de Colombia se abastece principalmente de los ríos Putumayo, Caquetá, Vaupés, Guanía y por supuesto Amazonas. La extensa región selvática que influencia esta zona refiere suelos pobres en materia orgánica, debido a que la vegetación recicla los nutrientes en la superficie del suelo bajo la influencia de precipitaciones altas y lavados continuos, condicionando una baja disponibilidad de nutrientes en el agua [24].

Las aguas de la cuenca amazónica se han agrupado en blancas, claras y negras [25]. Las aguas blancas tienen origen andino y transportan abundantes sedimentos disueltos y en suspensión, presentan baja concentración de nutrientes, reducida transparencia, moderada conductividad y un pH cercano a la neutralidad [25]. Las aguas negras se originan en la planicie selvática y poseen altos contenidos de sustancias húmicas por la descomposición parcial de la materia orgánica [24]. Este color puede reducirse

e incluso no presentarse durante la época seca y dependiendo de la carga de materia orgánica puede intensificarse en periodos de lluvia promoviendo una reducción en la transparencia, situación evidenciada en los lagos Correo, Tarapoto y Yahuaraca.

Adicionalmente, [26] concluye que los ambientes de aguas blancas o con un nivel de conexión mayor con el río Amazonas registran altos valores de pH y conductividad y que por el contrario, los ambientes acuáticos más alejados y sin influencia del Amazonas presentan en general menor mineralización. Es necesario considerar que en sistemas de aguas negras la conductividad no será sensible a la presencia de ácidos fúlvicos y húmicos y que estos compuestos queladores y promotores de agregados recalcitrantes no se encuentran como iones solubles. Tanto para las ciénagas del Caribe como los Amazónicos se postula que parámetros como la conductividad, la concentración de amonio, nitratos, ortofosfatos y el sílice son variables que permiten la discriminación de procesos asociados a la estacionalidad y la dinámica influenciada por el régimen de lluvias, ya que son variables sensibles al cambio durante las transiciones de nivel.

En contraste con los lagos del Caribe, los lagos de inundación amazónicos se encuentran más influenciados por el ciclaje de los nutrientes en la masa vegetal, los cuales son transferidos rápidamente desde el suelo hacia la vegetación selvática y su ingreso a los ambientes acuáticos pueden ser limitado [25].

El Lago Tota y la Laguna Fúquene, son considerados extensiones de agua acumuladas en el interior de los continentes, factor en el que difieren primordialmente de los lagos de inundación. Debido a su ubicación en pisos térmicos frío y páramo, las aguas de estos ambientes son frías y en ocasiones con niveles saturados de oxígeno, concentraciones elevadas en carbonatos, conductividad eléctrica, materia orgánica e hierro. Con respecto a las menores concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SiO}_2$  registradas en el lago Tota y la laguna Fúquene

se ha reportado que los lagos andinos libres de contaminación están relacionados con bajas concentraciones de formas inorgánicas de nitrógeno, mientras que valores superiores a  $3\mu\text{mol/l}$  de fósforo total pueden llegar a ser registrados debido a la fracción inorgánica particulada procedente de rocas volcánicas y sedimentos aluviales de los Andes. La tendencia en la limitación de nitrógeno y el enriquecimiento de fósforo en suelos aluviales y sistemas acuáticos de Suramérica han sido reportados por [27]. La composición química de las masas de agua superficiales, como los lagos andinos, está asociada a la precipitación atmosférica, los procesos biogeoquímicos de la cuenca de drenaje, la morfometría y dinámica en el interior del vaso de agua, la extensión de la región litoral y las influencias antrópicas. Tanto el lago Tota como la laguna Fúquene se encuentran influenciados por aportes de cenizas volcánicas y debido a su ubicación en zonas de alta pendiente, también son influenciados por procesos erosivos y sustratos rocosos que aportan altas concentraciones de fósforo, lo que promueve el uso agrícola de estas zonas.

En los sistemas de alta montaña las mayores concentraciones de amonio se encuentran potencialmente relacionadas con la descarga de materia orgánica de origen antrópico. Particularmente en el lago Tota ha sido reportada desde hace varias décadas la descarga de afluentes ricos en materia orgánica proveniente del lavado en cultivos agrícolas provenientes de la quebrada La Mugre y las aguas residuales del municipio de Aquitania [27]. Se ha sugerido que la concentración más baja del fósforo se encuentra en el centro lago, zona en la que se encuentran ubicadas las estaciones de muestreo consideradas en este sistema, además el ciclaje del nutriente hacia la parte superior de la columna de agua es menor debido a la mayor profundidad y distancia respecto a las zonas litorales donde ocurre la descarga agrícola, en consecuencia se propone que el fósforo precipitado difícilmente alcanza la superficie y por tanto el material exógeno es bajo en este sitio. Desde este punto de vista la morfometría y el volumen del lago Tota mitiga

la acción antrópica. Este es un aspecto relevante ecológicamente ya que el crecimiento de algas y macrófitas, así como el proceso de eutrofización, depende entre otros factores, de la proporción de nitrógeno y fósforo disponible, así como de procesos que aceleran su ritmo de ciclaje en la zona trofogenica [28].

A pesar de la intervención antrópica representada por adecuación de potreros para ganadería en las ciénagas de Ayapel y Bajo Sinú y actividad agrícola adyacente al lago Tota y la laguna Fúquene, los índices asociados a las concentraciones de clorofila, nitrógeno y fósforo evidenciaron procesos temporales de eutrofización que no son persistentes en el tiempo. Particularmente, un factor reportado en cuanto a la mitigación de las descargas de nutrientes en el lago La Tota está relacionado con el amplio período de la estratificación térmica y el mayor contenido de oxígeno en las capas superficiales con respecto al fondo permitiendo una asimilación rápida de nitratos y ortofosfatos en el epilimnio por comunidades como el fitoplancton y aumento de amonificación por bajo oxígeno en las capas más profundas.

Al estar a similar altitud con respecto a Tota, pero, con reducida profundidad, Fúquene difiere principalmente en el período de estratificación térmica y en consecuencia, en las características morfológicas y ecológicas de un lago de mayor tamaño y profundidad, ya que presenta menor transparencia y mayor susceptibilidad a la mezcla dependiendo del régimen de vientos e incidencia de la zona litoral en el cuerpo de agua. Sin embargo, la laguna Fúquene y el lago Tota presentaron tendencias similares en cuanto a la concentración de formas iónicas, conductividad eléctrica, pH y oxígeno, características que comparten gracias a la influencia similar con respecto a la posición altitudinal y origen. Fúquene es un ambiente somero de alta montaña y en consecuencia, su origen, morfología y hidroclimatología no responde al comportamiento de otro tipo de lagos de carácter somero como los lagos y planicies de inundación de tierras bajas, esta discriminación es aún incipiente en la Limnología de los ambientes tropicales.

## Conclusión

Se evidenció que la variabilidad de los sistemas evaluados está representada por un gradiente altitudinal y en consecuencia un rango climático, geográfico e hidrológico que influencia el tipo, origen y limnología de cada sistema. Para explicar el comportamiento y las repercusiones ecológicas en estos ambientes, es necesario tener en consideración que a diferencia de los sistemas templados, los sistemas ecuatoriales reciben una frecuencia de insolación y lluvia, acompañado de un fotoperíodo relativamente estable en el año, esta dinámica fue especialmente evidenciada por medio de perfiles temporales en ciénagas y lagos de inundación de las tierras bajas del Caribe y el Amazonas. Es por esta razón que la interpretación de las condiciones ecológicas deben referenciar cuidadosamente la ubicación y la tipología del sistema, la elección de frecuencias, momentos y parámetros de monitoreo, representación de un enfoque local enlazado con patrones regionales. El papel condicional que juegan aspectos climáticos, como la precipitación, es un factor de ordenamiento temporal de los procesos, por lo cual es responsable de la heterogeneidad. La precipitación, la temperatura, la transparencia del agua y la concentración de ortofosfatos discriminaron los lagos de planicie de inundación de los sistemas andinos. Adicionalmente, los lagos de inundación del Caribe y del Amazonas registraron mayores concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SiO}_2$ . Estas diferencias se deben a la geoquímica, al origen y la morfología de los sistemas. En las ciénagas del Caribe y en los lagos de inundación Amazónicos las mayores concentraciones de ortofosfatos se encuentran relacionadas con los momentos de mayor precipitación. Tanto para las ciénagas del Caribe como los lagos amazónicos se postula que parámetros como la conductividad, la concentración de amonio, nitratos, ortofosfatos y el sílice son variables que permiten la discriminación de procesos asociados a la estacionalidad.

## Agradecimientos

El estudio fue realizado en el marco del macroproyecto nacional “Aproximación al estudio de la diversidad de ecosistemas acuáticos de Colombia” liderado por la Universidad Nacional de Colombia- Sede Amazonía y con la participación y financiación de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, la Universidad de Córdoba y el Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA) de la Universidad de Antioquia, los autores agradecen el apoyo financiero de las Universidades de Vigo y Sevilla y de la Agencia Española de Cooperación Internacional AECI.

## Referencias

1. N. Myers, R. Mittermeier, C. Mittermeier, G. B. da Fonseca, J. Kent. “Biodiversity hotspots for conservation priorities”. *Nature*. Vol. 403. 2000. pp. 853-858.
2. J. Mejía. “Spatial distribution, annual and semi-annual cycles of precipitation in Colombia (in Spanish)”. *DYNA*. Vol. 127. 1999. pp. 7-26.
3. G. León, J. Zea, J. Eslava. “General circulation and the intertropical convergence zone in Colombia (in Spanish)”. *Meteor. Colomb*. Vol 1. 2000. pp. 31-38.
4. G. Poveda, O. Mesa, L. Salazar, P. ARIAS, H. Moreno, S. Vieira, P. Agudelo, V. Toro, J. Alvarez. “The Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes of Colombia”. *Mon. Wea. Rev*. Vol.133. 2005. pp. 228-240.
5. G. Roldán, J. Ramírez. *Fundamentos de limnología Neotropical*. 2<sup>da</sup> ed. Ed. Universidad de Antioquia, Universidad Católica de Oriente y Academia Colombiana de Ciencias- ACCEFYN. Medellín, Colombia. 2008. pp. 440.
6. IMAT. *Inventario nacional de cuerpos de agua, Bogotá, División distritos de riego, ministerio de Agricultura*. Bogotá, Colombia. 1984. pp.
7. H. Sioli. *The Amazon, Limnology and landscape ecology of a mighty river and its basin*. 1<sup>st</sup> ed. Dr. W. Junk Publishers. Dordrecht, Netherlands 1984. pp. 127-166
8. W. Junk. “Areas inundáveis: un desafío para la limnología”. *Acta Amaz*. Vol. 10. 1980. pp. 775 - 795.
9. W. Junk, P. Bailey, R. Sparks. “The flood pulse concept in river-floodplain systems”. *Can. Spec. Pbl. Fish. Aquat. Sci*. Vol. 106. 1989. pp. 110-127.
10. J. Neiff. “El régimen de pulsos en ríos y grandes humedales de Sudamérica”. *Tópicos sobre humedales subtropicales y templados de Sudamérica*. A. 1<sup>a</sup> ed. Malvárez (editorial). Oficina Regional de Ciencia y Tecnología de la UNESCO para América Latina y el Caribe -ORCYT – Montevideo, Uruguay. 1999. pp. 99.
11. R. Wetzel. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3<sup>th</sup> ed. Ed. Academic Press. San Diego, USA. 2001. pp. 429-433.
12. J. Cañón, C. Rodríguez. *Tota lake water balance and preliminary study of lake's hydraulics (Balance hídrico del Lago Tota y estudio preliminar de la hidráulica de lagos)*. Master Thesis in Hydraulic Resources. School of Engineering. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. 2002. pp. 76-78.
13. H. Salas, P. Martino. “Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutroficación en Lagos Cálidos Tropicales”. 2<sup>a</sup>ed. Programa Regional CEPIS/HEP/OPS. Lima, Perú. 1990. pp. 76.
14. F. Contreras, R. Castañeda, H. Torres, M. Gutiérrez. “La clorofila *a* como base para un índice trófico en lagunas costeras mexicanas”. *Revista Universidad Autónoma Metropolitana de México*. Vol. 21. 1994. pp. 55-66.
15. R. Carlson. “Atrophic state index for lakes”. *Limnology and Oceanography*. Vol. 22. 1977. pp. 361-369.
16. C. Kratzer, P. Brezonik. “Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida”. *Water resources Bulletin*. Vol. 4. 1981. pp. 35-50.
17. C. Mercante, A. Tucci-Moura. “Comparação entre os índices de Carlson e Carlson modificado, aplicados a dois ambientes aquáticos subtropicais, São Paulo, SP”. *Acta Limnologica Brasiliensia*. Vol. 11. 1999. pp. 1-14.
18. IGAC. *Estudio general de suelos de los municipios de Ayapel, Buenavista, Planeta Rica y Pueblo Nuevo (Departamento de Córdoba)*. Instituto geográfico “Agustín Codazzi”. Subdirección Agrológica. Bogotá, Colombia. 1986. pp. 282.
19. O. Rangel, D. Petter, M. Aguilar. “Tipos de vegetación en Colombia”. *Colombia, diversidad biótica*. 1<sup>a</sup>ed.. Publicación del Instituto de Ciencias Naturales. Ed. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia. 1997. pp. 134-138.

20. S. Duque, J. Donato. *Biología y ecología del fitoplancton de las aguas dulces en Colombia*. 1ªed. Ed. Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 1992. pp. 1-21.
21. V. Huszar, C. Kruk, N. Caraco. "Steady-state assemblages of phytoplankton in four temperate lakes (NE U.S.A)". *Hydrobiologia*. Vol. 502. 2003. pp. 97-109.
22. Junk, K. Wantzen. *The flood pulse concept: new aspects, approaches and applications – an update*. Welcomme R, T. Petr (eds) Proceeding of international Symposium on the Management of Large River for Fisheries. Bangkok, Thailand. 2004. pp.117-140.
23. A. Payne. *The ecology of tropical lakes and rivers*. 2<sup>nd</sup> ed. Ed. John Wiley & Sons. Chichester, England. 1986. pp. 301.
24. J. Ertel, J. Hedges, A. Devol, J. Richey. "Dissolved humic substances of The Amazon River system". *Limnol. Oceanogr.* Vol. 31. 1986. pp.739-754.
25. L. Marciales. *Ecología funcional del fitoplancton en dos lagos de la ribera Colombiana del río Amazonas (Tarapoto y El Correo)*. Trabajo de Investigación para optar al título de biólogo. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C, Colombia. 2007. pp. 17-25.
26. L. Palma. *Efecto de la conectividad del río Amazonas en la ecología del fitoplancton en lagos amazónicos*. Tesis de maestría en estudios amazónicos. Universidad Nacional de Colombia. Leticia, Colombia. 2007. pp. 32-37.
27. R. Cordero, E. Ruiz, E. Vargas. "Determinación espacio-temporal de la concentración de fósforo en el lago de tota". *Revista colombiana de química*. Vol. 34. 2005. pp. 211-218.
28. F. Esteves. *Fundamentos de Limnología*. 2ª ed. Ed. Interciencia Ltda. Rio de Janeiro, Brasil. 1998. pp. 125-132.