

Variación vertical de parámetros físicos y químicos en cuatro embalses tropicales y su relación con el área, la altitud y el tiempo de retención hidráulica

RAMÍREZ R. J. J.¹, BICUDO, C. E. M²., ROLDÁN P. G.³ & GARCÍA L. L. C.⁴

1. Universidad de Antioquia, Departamento de Biología, Apartado Aéreo 1226, Medellín, Colombia.

E-mail: jjram@matematicas.udca.edu.co

2. Instituto de Botânica, Caixa Postal 4005, CEP 01061-970, São Paulo, S.P. Brasil.

E-mail: cbicudo@terra.com.br

3. Universidad de Antioquia, Departamento de Biología, Apartado Aéreo 1226, Medellín, Colombia.

E-mail: groidan@epm.net.co

4. Fundación Neotrópicos, Apartado Aéreo 12587, Medellín, Colombia.

RESUMO: Variação vertical de parâmetros físicos e químicos em quatro reservatórios tropicais e sua relação com a área, a altitude e o tempo de residência hidráulica.

Entre 27 de abril e 4 de novembro de 1988 foram efetuadas seis amostragens numa estação de coleta nos reservatórios Punchiná, Las Playas, San Lorenzo e El Peñol. As amostras foram extraídas da sub-superfície, 50% I_0 , 1% I_0 , metade da coluna d'água e fundo. Foram encontradas variações significativas entre reservatórios para todas as variáveis analisadas, exceto para o pH. Embora os quatro reservatórios tenham apresentado estratificações térmicas, estas não foram estáveis e foram devidas possivelmente à hora da amostragem. A variação vertical encontrada foi significativa para oxigênio dissolvido e pH nos quatro corpos d'água; para condutividade em Punchiná e El Peñol; para fósforo solúvel relativo em nenhum corpo d'água; e para alcalinidade nas Playas e San Lorenzo. Punchiná não houve diferenças verticais significativas para nenhum dos nutrientes determinados; o NH_4 mostrou aumentos significativos com a profundidade nas Playas e San Lorenzo; e o NO_3 no Peñol. Em Punchiná a concentração de oxigênio determinada no fundo foi bastante alta; nos outros reservatórios o oxigênio diminuiu drasticamente até este nível. A temperatura mostrou relação inversa com a área, a altitude e o tempo de retenção. A transparência apresentou associação significativa com a altitude, a área e o tempo de retenção.

Palavras chave: Colômbia, Limnologia, reservatórios tropicais, variação vertical, físico-química da água.

ABSTRACT: Vertical variation of physical and chemical parameters in four tropical reservoirs and its relation with area, altitude and hydraulic retention time.

Between April 27 and November 4 1988, six samplings in a single sampling place in the reservoirs Punchiná, Las Playas, San Lorenzo and El Peñol were made. In each reservoir water samples at five depths (sub-surface, 50% I_0 , 1% I_0 , half of the water column and bottom) were extracted. Significant variations among reservoirs for all the analyzed variables, except for pH, were found. Although in the four reservoirs thermal stratifications were registered, these were not stable and they are possibly due to the sampling hour. Significant differences for dissolved oxygen and pH in the four reservoirs were found: for the conductivity only at Punchiná and El Peñol; for soluble reactive phosphorus in any reservoir; and for the alkalinity in Las Playas and San Lorenzo. Punchiná did not show significant vertical differences for any of the determined nutrients; NH_4 only showed significant increases with the depth in Las Playas and San Lorenzo; and NO_3 in El Peñol. The oxygen concentration at the bottom of Punchiná reservoir was high; in the other three reservoirs the oxygen diminished drastically toward this depth level. Temperature showed inverse relationship with area, altitude and retention time. Transparency presented significant association with altitude, area and retention time.

Key words: Colombia, Limnology, tropical reservoirs, vertical variation, water physico-chemistry.

Introducción

Se insiste frecuentemente en que el comportamiento de los ambientes acuáticos en el trópico no puede ser comprendido sólo a partir de las reglas aplicadas a los sistemas acuáticos en las zonas templadas y, aunque algunos principios pueden transferirse, las tendencias específicas no pueden ni deben extrapolarse sin una base investigativa amplia. Haciendo referencia a embalses, Márquez (1996) resalta el riesgo de generalizar sobre su comportamiento ecológico a partir de información proveniente de otros embalses del mundo y, aun de embalses cercanos en el mismo país, sin un concienzudo análisis previo. Sin embargo, Crisman & Streeves (1995) son reiterativos en afirmar que no existen datos que sugieran que cualquier variable limnológica se comporta de manera opuesta en lagos templados y tropicales. Estos autores citan además cuatro categorías generales en una de las cuales se ubica el patrón de cambio observado para variables individuales a través de un gradiente desde las latitudes templadas hasta las tropicales. Estas son: 1) aquella en la cual las variables muestran relaciones idénticas en sistemas templados y tropicales; 2) la categoría en la que las variables presentan relaciones similares, pero valores absolutos significativamente diferentes entre ambos sistemas; 3) la que muestra variables que exhiben gradientes suaves de cambio de una zona a otra; y 4) aquella en que las variables presentan cambios repentinos a lo largo del gradiente latitudinal.

Mientras el funcionamiento de los ecosistemas acuáticos en las zonas templadas se ha asociado principalmente con los cambios estacionales en la temperatura y en la irradiación, en los trópicos dicho funcionamiento parece estar más asociado a los denominados factores directrices proximales, correspondientes al viento y a la pluviosidad (Chutter, 1985; Lewis, 1987). En 1996, este último autor postuló que en los trópicos el periodo de mezcla coincide con el solsticio de invierno hemisférico, lo cual implica un fuerte gradiente latitudinal en la irradiación mínima como la mayor causa de periodicidad en esta zona. A pesar de que este autor insiste en que los lagos tropicales y templados se distinguen más por sus diferencias en la irradiación anual mínima que en las de irradiación anual máxima, no desconoce la importancia de otros factores, pues se refiere a que algunos lagos tanto naturales como artificiales muestran patrones estacionales que no se originan en los cambios de irradiación sino en factores hidráulicos (los embalses y los lagos situados en planicies de inundación) y en el efecto del viento (algunos lagos ecuatoriales africanos).

En Colombia existe una profunda carencia de información sobre el comportamiento de los ecosistemas acuáticos, llámense naturales o artificiales. Esta información, cuando existe, es tan difusa y fragmentaria que es difícil de usar, pues es costumbre muy difundida realizar estudios esporádicos, carentes de continuidad y sin métodos estandarizados, lo cual dificulta la comparación de los datos hallados por diferentes investigadores.

Existen diferencias significativas entre embalses para las variables físicas y químicas propuestas? En cada embalse se presentan diferencias significativas entre profundidades? Se relacionan las variables físicas y químicas estudiadas con la altura sobre el nivel del mar, el área y el tiempo de retención del agua en cada embalse? Como cada uno de los embalses estudiados tiene un tiempo de residencia característico, está localizado a diferente altitud y posee parámetros morfométricos propios, entonces sus características físicas y químicas varían entre ellos y entre profundidades en cada embalse.

Material y métodos

Descripción del área de estudio

Los cuatro embalses forman parte del sistema hidroeléctrico del oriente de Antioquia. Este sistema incluye las cuencas de los ríos Nare, Guatapé, Concepción, Bizcocho, San Carlos, Calderas y Tafetanes, con un área total de 2239 km². El clima del área es del tipo

Cwb en el sistema internacional de Köppen. Todos los embalses son usados para generación hidroeléctrica, están dispuestos en cadena, y tienen fuentes poluidoras provenientes de los municipios localizados en sus respectivas cuencas.

Sobre el río Nare, la presa de Santa Rita controla un área tributaria de 1210 km² formando un primer embalse de regulación multianual (embalse El Peñol); a partir de allí se desvía un caudal medio anual de 46 m³.s⁻¹ al río Guatapé a través de la central hidroeléctrica del mismo nombre. Aguas abajo de la presa de Santa Rita e igualmente sobre el río Nare, la presa de San Lorenzo controla un área tributaria de 438 km², y desvía un caudal medio anual de 39.4 m³.s⁻¹ a través de la central hidroeléctrica de Jaguas. Posteriormente los caudales anteriores adicionados al caudal propio de la cuenca del río Guatapé (26.9 m³.s⁻¹ para un área tributaria de 296 km²) forman el embalse de Las Playas y utilizan un caudal medio anual de 112.3 m³.s⁻¹. Finalmente, el caudal turbinado de la central de Las Playas (111.8 m³.s⁻¹) es nuevamente descargado al río Guatapé y constituye parte del caudal medio anual de 145.0 m³.s⁻¹ requerido por la central de San Carlos. Esta central es alimentada por el embalse formado por la presa de Punchiná sobre el río Guatapé, por los trasvasos provenientes del Peñol y San Lorenzo, por el río San Carlos incrementado por las desviaciones de los ríos Tafetanes y Calderas, por para un área tributaria de 295 km² (Fig. 1).

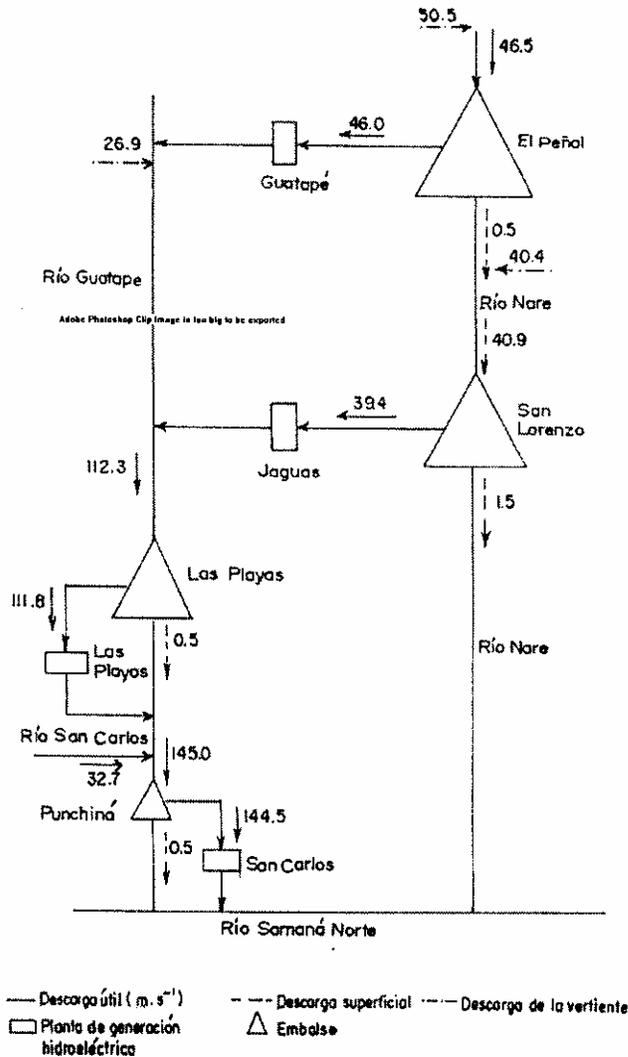


Figura 1: Parte del sistema hidroeléctrico Nare-Guatapé incluyendo los cuatro embalses estudiados.

En la zona del embalse Punchiná los suelos son de textura franco-arcillosa-arenosa, baja capacidad de intercambio catiónico, alto contenido de aluminio, 'ausencia' de materia orgánica, acidez de fuerte a moderada y gran capacidad de retención de fósforo (ISA, 1984a).

Los suelos que circundan al embalse Las Playas son lixiviados, ácidos, pobres en elementos nutritivos y de baja fertilidad natural; gran parte de ellos pertenece al denominado "Batolito Antioqueño". El área de la cuenca está cubierta de bosques, lo que controla parcialmente la llegada de sedimentos al embalse. Sin embargo, las explotaciones mineras en gran parte de sus márgenes, incrementan dicho aporte (Revista Empresas Públicas, 1988).

El embalse San Lorenzo está rodeado de suelos altamente lixiviados y erosionados, con baja fertilidad, estructura blocosa, baja capacidad de intercambio catiónico, bajo contenido de materia orgánica, pH ácido, poco fósforo disponible y textura areno-limosa (ISA, 1984b).

La cuenca tributaria del embalse El Peñol está localizada en su totalidad sobre el "Batolito Antioqueño", formación de roca ígnea e intrusiva del Cretáceo Superior conformada principalmente por cuarzo diorita. El suelo es laterítico, de textura limosa-arcillosa y de baja capacidad de intercambio catiónico, baja saturación de ácidos y bases, baja fertilidad y lixiviación alta (Roldán *et al.*, 1984).

La Tab. I muestra las características morfométricas consideradas en esta investigación y otros datos que auxilian la interpretación, entre ellos las densidades de los taxa fitoplanctónicos más importantes en la estación muestreada en cada cuerpo de agua.

Tabla I : Principales características morfométricas y biológicas de los embalses estudiados.

Característica	%I _o	Punchiná	Las Playas	San Lorenzo	El Peñol
Localización latitudinal	-----	6°13'N 74°52'W	6°20'N 74°58'W	6°25'N 74°3'W	6°10'N 74°10'W
Edad (años en 1988)	-----	9.0	8.0	7.0	22.0
Altitud (m)	-----	775.0	980.0	1250.0	1887.0
Área (km ²)	-----	3.6	7.5	10.6	62.5
Volumen (Mm ³)	-----	50.0	85.0	180.0	1169.0
Prof. máxima (m)	-----	65.0	57.0	49.0	52.0
Prof. media (m)	-----	19.9	13.1	18.9	19.6
Tiempo retención (días)	-----	6.0	9.0	59.0	280.0
Densidad total (Ind.L ⁻¹)	S	7859967.6	7067227.9	45982540.6	23979006.1
	50% I _o	10280101.3	4840267.5	34674611.2	19596158.4
	1% I _o	5341424.7	2658866.8	10010386.7	7311428.2
<i>B. braunii</i> (Ind.L ⁻¹)	S	892971.8	1756783.8	122100.1	16665755.2
	50% I _o	1350398.9	142108.9	266068.9	12120004.6
	1% I _o	575875.2	947642.7	176771.8	3810617.2
<i>Cosmarium</i> sp. (Ind.L ⁻¹)	S	967689.0	-----	-----	-----
	50% I _o	1621927.0	-----	-----	-----
	1% I _o	892971.0	-----	-----	-----

La densidad de *Cosmarium* sp. no aparece en los demás cuerpos de agua porque en ellos no fue una especie importante.

Metodologías

Se efectuaron en cada embalse seis muestreos entre el 27 de abril y el 4 de noviembre de 1988, en un solo sitio de colecta. En los tres primeros, la estación de muestreo se localizó cerca a las torres de captación y, en el caso del Peñol, al frente del río Nare en su entrada al embalse. De cada uno se extrajeron con una botella tipo van Dorn (V = 2 litros) muestras de agua de cinco profundidades: sub-superficie, 50% I_o, 1% I_o, mitad de la columna de agua y fondo con una botella tipo Van Dorn de dos litros de capacidad. Las profundidades correspondientes al 50% I_o y 1% I_o fueron obtenidas multiplicando la transparencia por los factores 0.41 y 2.70, respectivamente.

Los datos de pluviosidad para cada embalse fueron suministrados por la División Cuencas en Interconexión Eléctrica SA (ISA) e Hidrometría de las Empresas Públicas de Medellín.

La transparencia se midió con un disco de Secchi de 0.20 m de diámetro y bandas blancas y negras alternadas. Utilizando un conductímetro, un peachímetro y un oxímetro con termistor incorporado se obtuvieron la conductividad eléctrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), el pH, la concentración de oxígeno disuelto ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) y la temperatura del agua ($^{\circ}\text{C}$).

La alcalinidad total, en $\text{mgCaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, se midió disminuyendo el pH hasta 4.35 utilizando H_2SO_4 0.01 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. Las concentraciones de fósforo soluble reactivo, amonio y nitratos, todas en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, se midieron por espectrofotometría a través de los métodos del ácido ascórbico, nesslerización y del ácido fenol-disulfónico, respectivamente (APHA, 1995).

Para establecer la significancia de los cambios de las variables estudiadas entre embalses, se efectuó un Análisis de Varianza (ANAVA) de tres factores (embalses, muestreos y profundidades). La significancia de los cambios de las mismas variables entre profundidades, pero para cada embalse, fue establecida utilizando un ANAVA de dos vías, (muestreos y profundidades). En todos los casos fueron chequeados los supuestos exigidos por este tipo de análisis; en algunos de ellos, para normalizar los datos, se utilizó transformación log. En el caso del fósforo soluble reactivo del embalse Punchiná, dado que la transformación log no 'normalizó' los datos, fue utilizado el equivalente no paramétrico del ANAVA de dos vías: la prueba χ^2 de Friedman. La magnitud de la variación vertical para las variables oxígeno, pH y conductividad se estableció a través del coeficiente de variación relativa de Pearson.

La asociación entre variables se estableció mediante análisis de correlación lineal simple utilizando el índice de correlación por rangos de Spearman.

Todos los análisis estadísticos fueron realizados en el paquete StatGraphics, versión 5.0.

Resultados

Fueron encontradas variaciones significativas entre embalses para todas las variables analizadas, excepto para el pH, con niveles de probabilidad mayores del 99% en la mayoría de los casos (Tab. II).

Tabla II: Resultados del ANDEVA efectuado para detectar la significancia estadística de las diferencias entre embalses para las variables físicas y químicas medidas (n = 120) (ns = no significativo; ** = significativo con $\alpha < 0.01$; *** = significativo con $\alpha < 0.001$)

Factor	F	α
Temperatura del agua	53.00	0.0000 ***
Transparencia	17.28	0.0000 ***
Log(conductividad eléctrica)	15.58	0.0000 ***
Oxígeno disuelto	18.17	0.0000 ***
Log(alkalinidad total)	6.33	0.0005 ***
pH	2.57	0.0579 ns
Fósforo Soluble Reactivo	86.34	0.0000 ***
Amonio	4.05	0.0091 **
Nitrato	9.07	0.0000 ***

Las temperaturas medias del agua de los embalses San Lorenzo (SL) y Las Playas (PL) no fueron consideradas diferentes entre sí, mas sí lo fueron con las de Punchiná (Pu) y El Peñol (Pe) (Fig. 2A).

La prueba de Tukey consideró a la media de la profundidad Secchi en el embalse El Peñol como significativamente diferente de la obtenida en los demás sitios de colecta en los otros embalses; la de Las Playas fue diferente de aquella en San Lorenzo (Fig. 2B).

Las concentraciones medias de oxígeno de los sitios de muestreo en los embalses San Lorenzo y Las Playas fueron iguales según lo estimó la prueba de Tukey; igualmente sucedió para las de Las Playas y El Peñol; la misma prueba detectó diferencias significativas entre San Lorenzo y El Peñol y entre Punchiná y las demás represas (Fig. 2C).

Las medias de conductividad eléctrica (transformadas logarítmicamente) de los sitios de muestreo en San Lorenzo y Punchiná presentaron valores estadísticamente similares; igual comportamiento mostraron las medias de El Peñol y Las Playas. Las dos parejas formadas exhibieron diferencias significativas (Tab. II, Fig. 2D).

Las estaciones de muestreo elegidas en El Peñol y Punchiná presentaron idénticos valores medios de alcalinidad total (también transformados logarítmicamente); comportamiento similar presentaron las medias de Las Playas y San Lorenzo. Las parejas formadas fueron significativamente similares a un valor p de 0.05 (Fig. 2E).

El fósforo soluble reactivo en el sitio de muestreo en el embalse Punchiná fue significativamente diferente del hallado en los demás embalses (Fig. 2F). El valor medio de NH_4 en Las Playas fue el más alto y significativamente distinto de aquellos en Punchiná y San Lorenzo; las concentraciones de este ión en el lugar de muestreo en Punchiná no fueron significativamente diferentes de las halladas en El Peñol; su concentración media en San Lorenzo fue la menor de todas (Fig. 2G). Las concentraciones medias de NO_3 de los sitios de muestreo en los embalses Punchiná, Las Playas y El Peñol, no fueron consideradas significativamente distintas. El valor medio de este nutriente hallado en la estación de muestreo en San Lorenzo fue menor y diferente de las concentraciones medias halladas en los demás embalses (Fig. 2H).

En las Figuras 3A, 3B, 4A y 4B puede observarse que en la mayoría de los muestreos en los cuatro embalses se presentaron a la hora de la toma de muestras estratificaciones térmicas relativamente claras acompañadas de disminuciones de oxígeno hacia el fondo.

Se halló variación vertical significativa en todos los sitios de muestreo para oxígeno disuelto y pH; para la conductividad sólo en el lugar de muestreo en los embalses Punchiná y El Peñol; para el fósforo soluble reactivo en ninguno de los sitios estudiados; y para la alcalinidad en Las Playas y San Lorenzo. Punchiná no presentó diferencias significativas para ninguno de los nutrientes estudiados; el NH_4 mostró aumentos significativos con la profundidad solamente en Las Playas y San Lorenzo; y el NO_3 en El Peñol (Tab. III).

A. Temperatura del agua (°C)	22.5 Pe	23.8 SL	24.2 PI	25.3 Pu
B. Transparencia (m)	1.33 PI	1.78 Pu	1.88 SL	2.68 Pe
C. Oxígeno (mg/l)	4.43 SL	4.92 PI	5.93 Pe	7.54 Pu
D. Log (Conductividad) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	3.48 SL	3.54 Pu	3.67 Pe	3.68 PI
E. Log (Alcalinidad) (mg. CaCO_3/l)	2.70 Pe	2.70 Pu	2.78 PI	2.79 SL
F. Fósforo soluble reactivo ($\mu\text{g}/\text{l}$)	7.56 SL	9.79 Pe	10.13 PI	148.00 Pu
G. Amonio ($\mu\text{g}/\text{l}$)	463.33 SL	499.33 Pu	713.88 Pe	895.00 PI
H. Nitrato ($\mu\text{g}/\text{l}$)	73.3 SL	129.67 PI	148.00 Pu	164.19 Pe

Figura 2: Resultados de la comparación de medias entre embalses para las variables físicas y químicas consideradas en esta investigación. SL = San Lorenzo, PI = Las Playas, Pu = Punchiná, Pe = El Peñol.

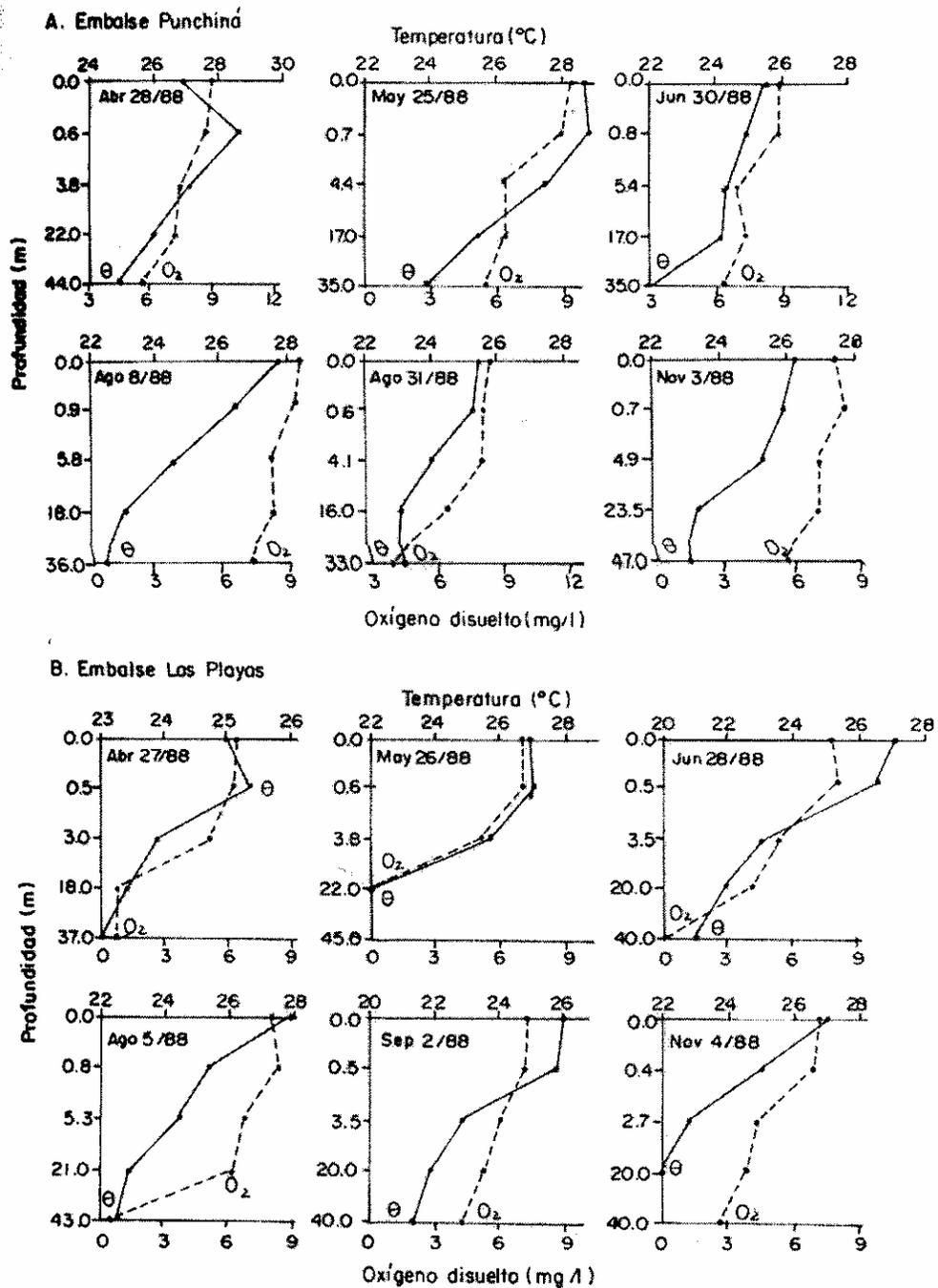
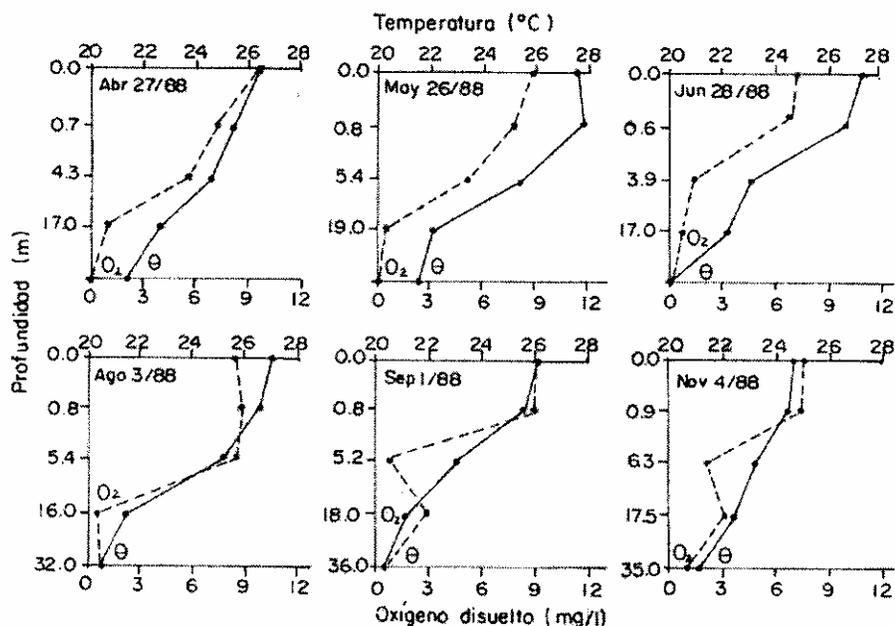


Figura 3: Perfiles de temperatura y oxígeno disuelto en cada día de muestreo en los embalses Punchiná (A) y Las Playas (B).

A. Embalse San Lorenzo



B. Embalse El Peñol

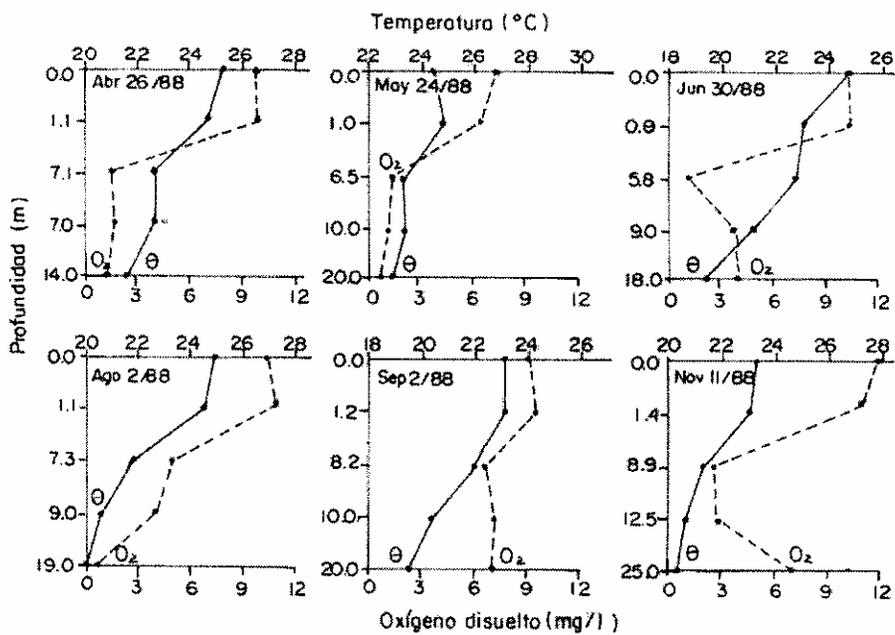


Figura 4: Perfiles de temperatura y oxígeno disuelto en cada día de muestreo en los embalses San Lorenzo (A) y El Peñol (B).

Tabla III: Significancia estadística de las diferencias verticales en cada embalse (n = 30). (n.s. = no significativo; * = significativo con $\alpha < 0.05$; ** = significativo con $\alpha < 0.01$; *** = significativo con $\alpha < 0.001$).

Variable	Punchiná			Las Playas		San Lorenzo		El Peñol	
	F	χ^2	α	F	α	F	α	F	α
Conductividad	11.94	----	0.0000 ***	1.42	0.2630 n.s	1.78	0.1732 n.s	9.88	0.0001 ***
Oxígeno	4.70	----	0.0053 **	24.18	0.0000 ***	39.92	0.0000 ***	25.74	0.0000 ***
Alcalinidad	1.08	----	0.3520 n.s	5.15	0.0078 ***	4.80	0.0047 ***	0.89	0.8030 n.s
pH	9.28	----	0.0002 ***	12.32	0.0245 *	14.87	0.0153 *	19.33	0.0000 ***
P- soluble reactivo	-----	8.80	0.0660 n.s	1.82	0.1649 n.s	0.57	0.6835 n.s	1.03	0.4168 n.s
NH ₄	1.97	----	0.1375 n.s	5.58	0.0035 *	6.39	0.0018 **	1.01	0.4272 n.s
NO ₃	0.72	----	0.5887 n.s	0.36	0.8303 n.s	2.06	0.1241 n.s	4.89	0.0065 **

A pesar de que la prueba de Tukey mostró las medias de conductividad (Figs. 5A y 6B) pH (Figs. 5A, 5B, 6A y 6B) de algunas profundidades como significativamente diferentes de otras, los valores hallados no presentaron en ninguno de los cuerpos de agua variaciones verticales contrastantes.

A. Embalse Punchiná

Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	32.5 Sup	33.3 50% lo	34.5 1% lo	37.1 1/2	37.3 Fondo
Oxígeno (mg/l)	5.7 Fondo	7.1 1/2	7.2 1% lo	8.8 50% lo	8.9 Sup
pH	6.22 50%	6.55 1% lo	6.55 1/2	6.80 Sup	7.00 Fondo

B. Embalse Las Playas

Oxígeno (mg/l)	1.28 Fondo	3.32 1/2	5.48 1%	7.25 Sup	7.27 50% lo
pH	6.27 Fondo	6.33 1/2	6.53 1% lo	6.80 Sup	6.92 50%
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	15.7 Sup	16.0 50% lo	16.3 1% lo	16.7 1/2	16.8 Fondo
Amonio ($\mu\text{g}/\text{l}$)	461.7 Sup	518.3 1% lo	530.0 50% lo	1296.7 1/2	1668.3 Fondo

Figura 5: Resultados de la comparación de rangos múltiples para el comportamiento de las variables físicas y químicas en el eje gravedad-luz de los embalses Punchiná (A) y Las Playas (B).

En Punchiná la concentración de oxígeno en el fondo de la estación de muestreo fue bastante alta (Fig. 5A); en los demás embalses el oxígeno disminuyó drásticamente hacia esta profundidad (Figs. 5B, 6A y 6D).

A. Embalse San Lorenzo					
Oxígeno (mg/l)	0.47 Fondo	1.30 1/2	3.53 1% lo	8.20 50% lo	6.68 Sup
pH	6.18 Fondo	6.63 1/2	6.68 1% lo	7.23 50% lo	7.38 Sup
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /l)	15.1 1/2	15.5 Fondo	16.7 Sup	16.8 50%	17.2 1%
Amonio (µg/l)	9.67 Sup	210.0 % lo	243.3 1% lo	391.5 1/2	1216.7 Fondo
B. Embalse El Peñol					
Conductividad (µS/cm)	33.1 Sup.	34.1 50% lo	40.4 1% lo	45.7 1/2	48.6 Fondo
Oxígeno (mg/l)	3.1 1% lo	3.2 Fondo	3.6 1/2	9.8 50% lo	9.9 Sup.
pH	6.28 Fondo	6.38 1% lo	6.40 1/2	7.23 50% lo	7.38 Sup.
Nitrato (µg/l)	110.0 Sup.	1100 50% lo	165.0 1% lo	248.3	293.3 Fondo

Figura 6: Resultados de la comparación de rangos múltiples para el comportamiento de las variables físicas y químicas en el eje gravedad-luz de los embalses San Lorenzo (A) y El Peñol (B).

La hipótesis de asociación entre las variables físicoquímicas analizadas y las características morfométricas consideradas fue aceptada sólo para la temperatura y la transparencia. El modelo de correlación mostró en todos los casos niveles de significancia mayores del 99.99%. La temperatura mostró relación inversa con el área ($r_s = -0.63$, $p = 0.00085$), la altitud ($r_s = -0.67$, $p = 0.00032$) y el tiempo de retención ($r_s = -0.64$, $p = 0.00068$). La transparencia presentó asociación significativa con la altitud ($r_s = 0.75$, $p = 0.00002$), el área ($r_s = 0.77$, $p = 0.00001$) y el tiempo de retención ($r_s = 0.80$, $p = 0.00000$).

Discusión

Comportamiento de las variables entre embalses.

La causa principal de las diferencias encontradas entre embalses para la transparencia y el oxígeno fue el distinto tiempo de residencia en cada uno de ellos, puesto que a medida que ésta se hace mayor, aumenta también el tiempo de sedimentación de los materiales alóctonos y autóctonos presentes. Consecuentemente, estos materiales demandarán una mayor cantidad de oxígeno en aquellos embalses con un mayor tiempo de retención (El Peñol y San Lorenzo), los cuales a su vez presentaron también una mayor transparencia. Para explicar estas diferencias debe considerarse que en el embalse Punchiná se usa descarga de fondo y que el 100% de su área inundada fue adecuada, removiéndose así el material que podría demandar oxígeno. Igual-

mente, su situación altitudinal respecto a los demás, le confiere ventajas, puesto que, según Margalef (1983), para los embalses en cascada puede llegar incluso a presentarse una mayor regularidad en las condiciones de oxigenación para los situados en las partes más bajas, ya que los embalses anteriores servirán como trampas de sedimentación, con las subsiguientes consecuencias favorables en los valores de transparencia, turbidez y en las concentraciones de oxígeno y nutrientes. Estas condiciones incidieron además en la no significancia de las diferencias de pH. Estas últimas pudieron deberse a la demanda fotosintética de la comunidad fitoplanctónica que fue densa a lo largo del tiempo de muestreo y poco variable desde el punto de vista de la composición de especies y en todos los casos, con excepción de San Lorenzo, compuesta en su mayoría por Chlorococcales (Ramírez *et al.*, 2000).

Observando los valores medios de conductividad eléctrica y alcalinidad mostrados en las Figuras 2D y 2E, puede verse que las diferencias fueron mínimas. Esto se debe posiblemente a las condiciones geoquímicas similares de las cuencas de los embalses estudiados, sobre las cuales estas dos variables brindan información. Las pequeñas diferencias encontradas sugieren aguas provenientes de áreas cuya geología corresponde a sitios altamente lixiviados y geoquímicamente muy pobres, consideradas normales y características de aguas tropicales poco duras, con bajas concentraciones iónicas y poco material en suspensión (Payne, 1986; Talling & Talling, 1965) (Tab. II).

Debido a que los valores de conductividad medidos fueron menores que $600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, todos los sitios de muestreo en los embalses estudiados pertenecen a la Clase I de la clasificación sugerida por Talling & Talling (1965). En ella se localizan la mayoría de los lagos tropicales de conductividad y alcalinidad bajas.

Para Straskaba *et al.* (1995) la retención del fósforo (total y soluble) en lagos y embalses es función del tiempo de retención, presentándose una retención del fósforo entre 10 y 80% para embalses con tiempo de retención menor que 100 días. Esta propuesta no se cumplió en esta investigación, ya que el punto de colecta en el embalse Punchiná, que mostró el menor tiempo de retención (5.8 días), presentó las mayores concentraciones de fósforo soluble reactivo, cuando debería suceder lo contrario. Estos mayores valores de fósforo soluble reactivo en el sitio de muestreo en este embalse se debieron posiblemente a dos factores:

1) a la ausencia de dominancia en la comunidad fitoplanctónica encontrada, o sea a la baja demanda biológica presente por la disminución de la biomasa debida al menor tiempo de retención que no consigue equilibrar la carga de entrada de fósforo de los afluentes principales del embalse (San Carlos y Guatapé) que traen los nutrientes de los otros embalses y en conjunto representan el mayor caudal de entrada del sistema ($145.0 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$); y 2) a la pérdida de fósforo en la descarga de fondo, que lleva el fósforo retenido en el sedimento para el río Samaná Norte. Cabe resaltar que por presentar una alta concentración de oxígeno en el fondo, la retención de fósforo en el sedimento de este embalse debió ser bastante alta.

Las concentraciones medias de nutrientes encontradas en los embalses estudiados fueron consideradas bajas y normales cuando comparadas con las de otros embalses tropicales citados en la Tab. IV, ya que al igual que en las selvas de esta región, estos embalses se localizan sobre suelos con extrema escasez de nutrientes (Odum, 1972). Además, las condiciones de pH e intercambio catiónico imperantes en los suelos de las cuencas de los embalses estudiados, permiten tal acontecimiento. Contribuyeron también para estos resultados el que, en esta zona, los nutrientes no se encuentran libres, sino que constantemente se incorporan y reciclan en la vegetación presente, en este caso, el fitoplancton. Estas bajas concentraciones de nutrientes son reflejadas por los bajos valores de conductividad eléctrica encontrados en todos los embalses. Estas bajas concentraciones corresponden a las encontradas en lagos oligotróficos de zonas templadas y, muy raramente, son equivalentes a las de lagos eutróficos de las mismas zonas (Beadle, 1973; Esteves, 1988). En las aguas tropicales el pH tiende a mantenerse por debajo de la neutralidad. La conductividad en Colombia es baja como consecuencia del lavado asociado con el alto índice de precipitación pluvial (Márquez, 1996). Debe considerarse también que en los ecosistemas lacustres tropicales la alta temperatura reinante ocasiona

Tabla IV: Valores máximos y mínimos para algunas variables físicas y químicas en embalses tropicales (C. E. = conductividad eléctrica; FSR = fósforo soluble reactivo).

Embalse		C. E.	pH	FSR	NH ₄	NO ₃	Ubicación
Chuzá	Mín	35.0	6.9	0.06	0.0	0.0	Colombia
	Máx	68.0	7.4	56.4	1.5	0.64	(Donato <i>et al.</i> , 1996)
Chingaza	Mín	24.0	5.5	0.6	----	0.0	Colombia
	Máx	155.0	7.0	2.2	----	3.2	(Donato <i>et al.</i> , 1996)
La Fe	Mín	18.8	6.8	0.45	----	0.0	Colombia
	Máx	42.0	7.5	2.2	----	0.08	(Ramírez & Machado, 1982)
Monjollinho	Mín	10.8	5.5	0.0	0.0	5.8	São Carlos, Brasil
	Máx	62.7	7.6	38.0	320.0	113.6	(Nogueira, 1990)
Jurumirim	Mín	44.0	6.8	9.0	3.0	75.0	Botucatu, Brasil
	Máx	76.0	7.4	28.0	15.0	170.0	(Henry, 1993)
Kpong	Mín	62.0	6.4	0.0	0.0	0.0	Ghana, Africa
	Máx	82.0	7.3	2.0	0.88	0.18	(Antwi & Ofori-Dodson, 1993)
Barra Bonita	Mín	183.0	6.6	5.0	30.1	0.03	São Paulo, Brasil
	Máx	200.0	7.3	45.4	72.9	0.096	(Calijuri 1988)
Subang	Mín	7.0	4.6	0.0	0.0	0.0	Africa
							(Arumagam & Furtado 1980)
Punchiná	Máx	41.3	7.08	0.0	1100.0	244.0	Este estudio
	Mín	26.3	6.16	8.0	216.0	56.0	
Las Playas	Máx	49.2	6.86	20.0	1778.0	262.0	Este estudio
	Mín	30.8	6.00	0.0	420.0	0.0	
San Lorenzo	Máx	37.8	7.30	20.0	906.0	132.0	Este estudio
	Mín	25.3	6.16	0.0	240.0	10.0	
El Peñol	Máx	46.6	6.96	20.0	1196.0	366.0	Este estudio
	Mín	34.2	6.40	0.0	500.0	50.0	

el llamado "metabolismo en corto circuito" consistente en la liberación de gran parte del fósforo de los detritos aún sin llegar al sedimento (donde normalmente ocurre la liberación del mismo), lo que facilita la rápida asimilación del fósforo soluble reactivo por la comunidad fitoplanctónica y disminuye sus concentraciones (Ruttner, 1975).

Los menores valores de NH₄, NO₃ y fósforo soluble reactivo en el sitio de muestreo en San Lorenzo pueden estar relacionados con la demanda de la comunidad fitoplanctónica, que en este sitio fue dominada por *Cosmarium* sp. (Tab. I), principalmente en la superficie y al 50% l₀, profundidades en las que esta especie alcanzó contribuciones relativas entre 90 y 95% de la comunidad fitoplanctónica presente (Ramírez *et al.*, 2000). Es necesario anotar que esta dominancia se presentó durante la mayoría del tiempo de muestreo, disminuyendo solamente hacia la última colecta en octubre. Esto permite pensar que el taxón mencionado debió presentar demandas altas de estos nutrientes para poder obtener energía, y mantener así una alta tasa reproductiva. Aunque no fue identificada a nivel específico, la especie de *Cosmarium* encontrada presentó un tamaño bastante pequeño y, como es de esperar, un valor bajo de la relación S/V. Los organismos fitoplanctónicos con valores disminuidos para esta relación muestran altas tasas metabólicas (Reynolds, 1984), lo que también auxiliaría en la explicación de los menores valores de nutrientes encontrados. Sin embargo, Ramírez *et al.* (2000) encontraron que los períodos de máxima y mínima abundancia de fitoplancton en los cuatro embalses (excepto para el NO₃ en San Lorenzo), no fueron determinados por la disponibilidad de nutrientes, pero sí por la alternancia de los períodos húmedo y seco.

Comportamiento de las variables con la profundidad. El rasgo característico de un lago tropical no son las altas temperaturas de superficie sino las ligeras variaciones

estacionales en temperatura y las pequeñas diferencias entre superficie y fondo (Ruttner, 1975). Para Lewis (1996) estas diferencias son realmente pequeñas (aproximadamente 1.5°C) en lagos ecuatoriales, mientras que en los lagos cerca de las márgenes de los trópicos varían entre los 5 y 6°C. Las diferencias superficie-fondo halladas en la presente investigación son similares a las citadas por este autor (Punchina: 1.8 - 5.2°C, Las Playas: 2 - 6°C, San Lorenzo: 3.7 - 7.5°C, y El Peñol: 2.5 - 4.5°C), las cuales están influenciadas por las relaciones entre entradas y salidas en cada embalse y por la forma, tamaño y localización de cada uno de ellos.

Las discontinuidades térmicas halladas en cada embalse no pueden considerarse estables, pues posiblemente se deben a la hora en que fueron efectuados los muestreos. Esta ausencia de estabilidad térmica se evidencia por los bajos valores de los coeficientes de variación para parámetros que según Tundisi & Tundisi (1982) están relacionados con dicho fenómeno, como son la conductividad eléctrica y el pH. Las diferencias entre los valores de superficie y fondo para estas variables son altas cuando la estratificación dura el tiempo suficiente para permitirlo, cosa que no aconteció en ninguno de los cuerpos de agua estudiados (Figs. 5 y 6).

Se considera que la extracción de agua del "fondo" en embalses tiene un efecto perturbador de la estratificación, ya que los gradientes térmicos se distancian de la superficie (Margalef, 1983). Este proceso opera en los cuatro embalses estudiados, por su función generadora de energía. Sin embargo, para autores como Márquez (1996) existe la tendencia a que los embalses situados en los pisos cálidos presenten estratificaciones más estables que los fríos, la cual es modificable por la influencia de los vientos locales o por las altas tasas de renovación del agua, entre otros factores. Para este autor, existen en Colombia casos de polimixis (embalses Tominé y Chivor), monomixis (considerada más improbable), dimixis (en Neusa), y al menos un caso de meromixis en Prado.

En todos los casos, las aguas superficiales estuvieron bien oxigenadas debido a la acción del viento y a la fotosíntesis. Las diferencias de oxígeno con la profundidad, más acentuadas en San Lorenzo, Las Playas y El Peñol; fueron debidas al mayor tiempo de residencia y a la mayor demanda de este gas por la fitomasa inundada, principalmente en El Peñol que no fue adecuado inicialmente y a su contorno dendrítico que facilita el mayor intercambio y recepción de material demandante de este gas proveniente de la cuenca de captación.

Las diferencias verticales de oxígeno, menos acentuadas en el sitio de muestreo en Punchiná, se deben a razones opuestas a las ya explicadas para los embalses San Lorenzo y El Peñol, en especial su mayor recambio de agua (tiempo medio de retención = 5.8 días) y la entrada de los ríos Guatapé y San Carlos, que impiden la formación de gradientes estables de oxígeno, conductividad y pH.

Según Ruttner (1975) en los lagos y embalses tropicales la alta temperatura es el factor controlador de la concentración de oxígeno, pues influencia tanto la respiración de los organismos como otros procesos oxidativos. Este efecto directo se basa en la regla de Van T'Hoff, según la cual la elevación de la temperatura de las soluciones en 10°C puede duplicar o triplicar la velocidad de las reacciones. Para este autor austriaco la temperatura del hipolimnion de los cuerpos lacustres tropicales es por lo menos 20°C más elevada que la del hipolimnion de lagos templados y, consecuentemente la descomposición de materia orgánica muerta en este nivel en un lago tropical es cuatro a nueve veces más rápida, implicando un mayor consumo de este gas. Como consecuencia, en la mayoría de los casos, los cuerpos de agua tropicales presentan fuertes déficits de oxígeno en el eje gravedad-luz.

La ausencia de diferencias significativas para los nutrientes estudiados en el embalse Punchiná tiene su explicación en el bajo tiempo de retención del agua, como ya fue mencionado. Los aumentos significativos de NH_4 con la profundidad en los sitios de muestreo en los embalses Las Playas y San Lorenzo se debieron a la acentuada disminución del oxígeno para el fondo, que ocasiona altas tasas de descomposición y liberación de este compuesto para la columna de agua.

Relación de las variables físicas y químicas con las variables morfométricas.

En general, cuando el área y el tiempo de retención aumentan, se hace mayor también la evaporación y la pérdida por radiación y conducción debido al mayor tiempo que dura la masa de agua expuesta a la radiación solar. Dicha disipación del calor ocurre principalmente por la vía del agua superficial, cuya capacidad para eliminar calor adicional es bastante alta. La evacuación del calor por evaporación, radiación y conducción es función de la temperatura superficial y depende, entre otras características, del viento, la humedad, la turbulencia y de la distribución de la temperatura en esas capas superficiales (Margalef, 1983). La altitud del embalse influye también notablemente en el intercambio y la eliminación de calor, pues a mayor altura sobre el nivel del mar, la temperatura disminuye gradualmente, interviniendo en el intercambio de energía por reflexión, por emisión en superficie y por transmisión del calor al sedimento. Estas, según Margalef *et al.* (1976), son fracciones importantes de la energía total intercambiada en el agua. Margalef (1983) considera que de manera aproximada, el aumento de 1°C de temperatura superficial incrementa en un 6% la pérdida de calor por evaporación, y en 1.4% la pérdida de calor por radiación. A temperaturas superficiales mayores, el aumento en la evaporación sigue contribuyendo de manera proporcional al aumento total en el flujo de calor. Con viento fuerte, aire seco, temperaturas altas y, consecuentemente, baja humedad relativa, la evaporación del calor puede ser mayor.

Cuando el tiempo de retención, el área y la altitud aumentan simultáneamente, como es el caso del embalse El Peñol, las partículas suspendidas están sometidas durante mayor tiempo a la acción gravitacional, por lo que se precipitan más fácilmente, favoreciendo con ello una mayor transparencia. El mayor tiempo para la sedimentación de las partículas reducirá entonces la turbidez inorgánica e incrementará la transparencia (Straskaba *et al.*, 1993).

Con respecto a la altitud, puede decirse que a medida que ésta aumenta, las condiciones edáficas se hacen diferentes y ocurre un menor arrastre de sedimentos y otros materiales, por lo que se espera que los lagos y embalses situados a mayor altura tengan una mayor transparencia. Debe considerarse que los embalses San Lorenzo y El Peñol, situados a mayor altura sobre el nivel del mar se encuentran en la formación conocida como "Batolito Antioqueño", cuyos suelos son derivados de cenizas volcánicas y rocas ígneas, por lo que ceden muy pocos materiales por acción de la lixiviación, a pesar de que la precipitación es superior a los 4000 mm de lluvia anual y se presentan pendientes altas (Espinal, 1985).

Agradecimientos

Los autores agradecen a Interconexión Eléctrica S.A (I.S.A) y a las directivas del departamento de Biología de la Universidad de Antioquia por el patrocinio económico y académico; al personal de la División de Planeamiento y Desarrollo Ecológico de I.S.A; a Rubén Ramírez por su generosa, valiosa y oportuna ayuda en las labores de campo; y a las Empresas Públicas de Medellín (EPM-ESP) por la ayuda logística para la toma de muestras en los embalses Las Playas y El Peñol.

Referencias citadas

- American Public Health Association. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th ed. United Books Press, Inc. Baltimore.
- Antwi, L. A.K. & Ofori-Danson, P. K. 1993. Limnology of a tropical reservoir (The Kpong reservoir in Ghana). *Trop. Ecol.* 34: 75-87.
- Arumagan, P.T. & Furtado, J.I. 1980. Physico-chemistry, destratification and nutrient budget of a lowland eutrophicated malaysian reservoir and its limnological implications. *Hydrobiologia*, 70: 11-24.
- Beadle, L. C. 1973. The inland waters of tropical Africa. An introduction to tropical ecology. Longman Group, London. 363 p.

- Calijuri, M. C. 1988. Respostas fisiocológicas da comunidade fitoplanctônica e fatores ecológicos em ecossistemas com diferentes estágios de eutrofização. São Carlos, Universidade de São Paulo, 293 p. (Tesis).
- Crisman, T. L. & Streever, W. J. 1995. The legacy and future of tropical limnology. *In*: Timotius, K. H & Göltenboth, F (eds.). Tropical limnology. Vol III. Satya Wacana University Salatiga, Indonesia. p. 235-249.
- Chutter, F. M. 1985. Seasonality/aseasonality: chairman's summary. *Hydrobiologia*, 125: 191-194.
- Donato, J. C. González, L. E. & Rodríguez, C. L. 1996. Ecología de dos sistemas acuáticos de páramo. Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Colección Jorge Alvarez Lleras, 9, Santa Fe de Bogotá, DC. 125 p.
- Espinal, S. 1985. Geografía ecológica del departamento de Antioquia (zonas de vida del departamento de Antioquia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía de Medellín*, 38: 5-106.
- Esteves, F. A. 1988. Considerações sobre a aplicação da tipologia de lagos temperados a lagos tropicais. *Acta Limnol. Brasil.*, 2: 3-28.
- Henry, R. 1993. Primary production by phytoplankton and its controlling factors in Jurumirim reservoir (São Paulo, Brazil). *Rev. Bras. Biol.*, 53: 489-499.
- Interconexión Eléctrica S.A. (ISA). Departamento de Cuencas Hidrográficas. 1984a. Estudio, planeación y ejecución de la adecuación de la zona de inundación del embalse Punchiná. Reporte final. Documento ABRN-073.
- Interconexión Eléctrica S.A. (ISA). Departamento de Cuencas Hidrográficas. 1984b. Proyecto hidroeléctrico de Jaguas. Alternativas para la limpieza del vaso del embalse San Lorenzo. Documento ABRN-079.
- Lewis, W. J. 1987. Tropical Limnology. *An. Rev. Ecol. Syst.*, 18: 159-184.
- Lewis, W. J. 1996. Tropical lakes: how altitude makes a difference. *In*: Schiemer, F. & Boland, K. T. (eds.). Perspectives in tropical limnology. SBP Academic Publishing bv, Amsterdam The Netherlands. p. 43-64.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega, SA, Barcelona. 1010 p.
- Margalef, R., Planas, R. D., Armengol, M. J., Vidal, C. A., Pratt, N., Guiset, S. A., Santillana, J. T. & Estrada, M. 1976. *Limnología de los embalses españoles*. Departamento de Ecología. Universidad de Barcelona. Barcelona. 452 p.
- Márquez, G. 1996. Ecosistemas estratégicos y otros estudios de ecología ambiental. Fondo Fen Colombia. Santafé de Bogotá DC. p 45-63.
- Nogueira, M. G. 1990. Dinâmica das populações planctônicas e fatores físico-químicos de um pequeno sistema artificial raso (represa de Monjolinho, São Carlos, SP). São Carlos, Universidade de São Paulo. 244 p. (Disertación).
- Odum, E. 1972. *Ecología*. 3ª ed. Editorial Interamericana, SA, México. 639 p.
- Payne, I. 1986. *Ecology of tropical lakes and rivers*. Wiley, New York. 301 p.
- Ramírez, J. J., Bicudo, C. E., Roldán, G. & García, L. C. 2000. Temporal and vertical variation of phytoplankton community structure and its relation with some morphometric factors in four Colombian reservoirs. *Caldasia*, 22: 108-126.
- Ramírez, J. J. & Machado, T. 1982. Influencia de la precipitación y los ortofosfatos sobre el fitoplancton de la represa La Fe. *Actual. Biol.*, 11: 3-21.
- Revista Empresas Públicas de Medellín. 1988. Proyecto hidroeléctrico Playas. 10. Enero-marzo.
- Roldán, G., Correa, M., Machado, T., Ramírez, J. J., Velásquez, L. F. & Zuluaga, F. 1984. Estudio limnológico de la represa El Peñol. *Actual. Biol.*, 13: 94-105.
- Reynolds, C. S. 1984. Phytoplankton periodicity: the interaction of form, function and environmental variability. *Freshwat. Biol.*, 14: 111-142.
- Ruttner, F. 1975. *Fundamentals of Limnology*. 3ª ed. University of Toronto Press. Toronto. 307 p.
- Straskaba, M., Tundisi, J. G., Duncan, A. 1993. Statement of the art of reservoir limnology and water quality management. *In*: Straskaba M, J. G. Tundisi & Duncan, A. (eds.). Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management. Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 216 p.

- Straskaba, M., Dostáková, I., Hejzlar, J. & Vyhnálek, V. 1995. The effect of reservoirs on phosphorus concentration. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.*, 80: 403-413.
- Talling, J. F. & Talling, I. B. 1965. The chemical composition of African lake waters. *Int. Rev. ges. Hydrobiol.*, 50: 421-463.
- Tundisi, J. G. & Tundisi, T. M. 1982. Estudos limnológicos no sistema de lagos do Médio Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. *Anais do II Seminário Regional de Ecologia* p. 133-258.

Recebido em: 29 / 01 / 2001

Aprovado em: 31 / 07 / 2001