
ESTUDIO MORFOMÉTRICO DEL LAGO GUATAVITA (COLOMBIA)

Morphometric Study of Lake Guatavita (Colombia)

CARLOS ALBERTO RIVERA RONDÓN^{1,2}, ANGELA MARÍA ZAPATA¹,
JHON CHARLES DONATO RONDÓN³

¹ Laboratorio de Limnología, Unidad de Ecología y Sistemática,
Departamento de Biología, Pontificia Universidad Javeriana,
Carrera 7 # 40-62, Bogotá, D.C., Colombia. crivera@javeriana.edu.co

² Centro de Estudios Avanzados de Blanes, CEAB-CSIC, España.

³ Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia,
Bogotá, D.C., Colombia. jcdonator@unal.edu.co

Presentado 11 de julio de 2010, aceptado 4 de noviembre de 2010, correcciones 4 de noviembre de 2010.

RESUMEN

En el lago Guatavita se estudiaron sus características morfométricas con el objeto de analizar las implicaciones de la morfología sobre su funcionamiento y discutir algunas hipótesis que existen sobre el origen del lago. El lago presenta una cubeta con una forma cónica, bajo desarrollo del perímetro, profundidad máxima de 30 m y profundidad relativa de 7,9%. La curva hipsográfica indica que el lago presenta un aumento constante del área de la sección con respecto a la profundidad. La forma del lago promueve una estratificación térmica que se mantiene durante ocho meses del año, un hipolimnio hipóxico y un fuerte gradiente en la conductividad y en la concentración de amonio. Estos resultados indican un papel muy importante de la profundidad sobre las características físicas y químicas del lago que a su vez determinan la dinámica de las comunidades biológicas y una baja productividad fitoplanctónica.

Palabras clave: batimetría, limnología física, lago de montaña, producción primaria fitoplanctónica.

ABSTRACT

Morphometric characteristics of the Lake Guatavita were investigated in order to disclose possible connections with its ecological functioning and discuss some hypotheses that exist about the origin of this lake. The lake has a basin with a conical shape, low perimeter development, maximum depth of 30 m and relative depth of 7.9%. The hypsographic curve reveals a constant increase of the sectional area with depth. The lake shape promotes a permanent thermal stratification during eight months of the year with a hypoxic hypolimnion and a strong vertical gradient in the conductivity and ammonium concentration. These results indicate an important role of depth on the physical and

chemical lake characteristics which in turn explain the dynamics of biological communities and are responsible for a relatively low phytoplankton primary productivity.

Key words: Bathymetry, physical limnology, mountain lake, phytoplankton primary production.

INTRODUCCIÓN

Los lagos presentan una variedad de formas que se derivan de las causas por las cuales fueron originados (Hutchinson, 1957). La forma de un lago tiene implicaciones en la relación que tiene con el ambiente terrestre y en la organización vertical y horizontal de las comunidades acuáticas. La geomorfología de un lago determina las características de su drenaje, la entrada de nutrientes y de sólidos y la tasa de renovación hídrica (Wetzel, 2001). La forma, volumen, área y profundidad de la cubeta, afectan el contenido de calor, el balance térmico anual y en general influyen sobre el grado de estratificación física de la columna de agua (Gorham, 1964; Timm, 1975; Benson *et al.*, 2000). La morfología está asociada al tipo de modelo térmico del lago (Lewis, 1996). Lagos con una extensa superficie pueden presentar eventos de mezcla más frecuentes que lagos con superficies pequeñas. Por otro lado, la alineación del eje más largo del lago con la dirección predominante del viento favorece la mezcla térmica (Hutchinson, 1957).

El volumen de agua es una variable importante que define la cantidad de calor que un lago puede almacenar. Pequeñas masas de agua son más susceptibles a grandes variaciones estacionales y diarias en la temperatura del agua, mientras que grandes masas de agua pueden tener una temperatura constante a lo largo del año (Mazumder y Taylor, 1994). En lagos ecuatoriales las variaciones en temperatura son bajas y su efecto está principalmente relacionado con la inestabilidad diaria de la columna de agua que puede tener importantes consecuencias sobre la variabilidad química (Barbosa y Padiśák, 2002).

La morfometría de un lago también está relacionada con la dinámica de sedimentación - erosión y con la acumulación de diferentes elementos en los sedimentos (Håkanson, 1981; Johansson *et al.*, 2007). La profundidad del lago afecta la tasa de desoxigenación y la disponibilidad de nutrientes en la columna de agua (Rast y Thornton, 2005; Meding y Jackson, 2003) y en algunos lagos, la profundidad puede explicar más la transparencia que variables como el color del agua (Håkanson, 2005).

La relación entre producción primaria y morfología del lago ha sido ampliamente discutida, debido a que la productividad es explicada principalmente por factores locales y además frecuentemente se observa una relación causal con el régimen de estratificación y la estacionalidad climática (Richardson, 1975; Fee, 1979; Patalas, 1980; Håkanson, 1981). La relación entre la profundidad media y la amplitud de la capa fótica se utiliza para inferir algunos elementos del metabolismo del lago. Así, por ejemplo, lagos de origen tectónico usualmente son muy profundos y presentan bajos valores de productividad (Wetzel, 2001).

La morfometría también tiene un efecto sobre la organización de niveles tróficos superiores. Una relación asintótica inversa se ha registrado entre la producción pesquera y la profundidad media (Rawson, 1952; Håkanson, 1981). También se ha establecido

una relación entre la tasa de crecimiento de algunas especies de peces y la profundidad del lago (Vinni *et al.*, 2000).

En Colombia, las diferencias pluviométricas y físicas de relieve generan una gran diversidad de ecosistemas acuáticos dotados de un sistema complejo de captación regulación e interacción (Donato, 2004). El efecto de esta complejidad física puede estudiarse inicialmente a partir de la morfología de la cubeta de los ecosistemas. La descripción de las características morfométricas de un lago se convierte en una herramienta necesaria para el estudio de las características limnológicas y los procesos ecológicos al interior del sistema. A partir de lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: 1. Estimar las principales variables morfométricas del lago Guatavita y 2. Analizar algunas de las implicaciones de la morfometría sobre el funcionamiento del lago.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El lago Guatavita o “Laguna del Cacique Guatavita” (2.980 m, 4° 58’ 50” N, 73° 47’ 43” W), está localizado en la vertiente Oriental de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos (Fig. 1). La cubeta de Guatavita está sobre un conjunto litológico correspondiente a la Formación Guadalupe Superior, ubicada en el anticlinal Guatavita. La

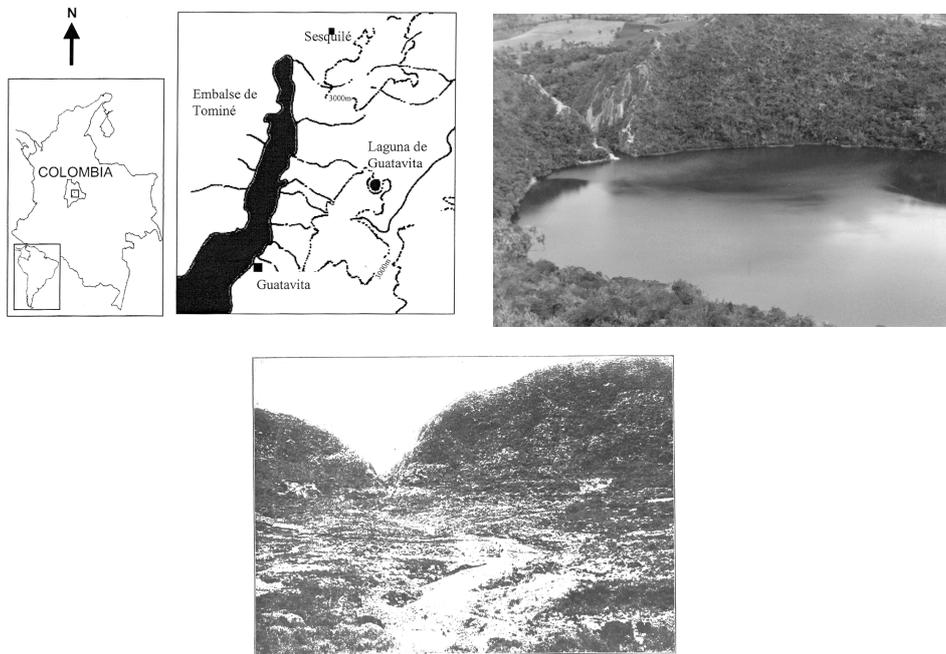


Figura 1. Ubicación geográfica del lago Guatavita (arriba izquierda), fotografía actual de lago (arriba derecha) y fotografía del lago completamente drenado (Reproducida de Beisswanger 1911). La fotografía muestra el fondo del lago con vegetación y los vestigios del canal mediante el cual fue drenado. En la parte inferior derecha de la foto se observan dos personas.

Formación Guadalupe posee en su parte superior arenisca cuarzosa; en la parte media se registra limolita cuarzosa silíceas y en la parte inferior arenisca cuarzosa; la parte media e inferior posee localmente arcillita limosa (McLaughlin y Arce, 1975).

Según los perfiles geológicos de la región se observa la presencia de depósitos salinos debajo del anticlinal Guatavita. Los suelos de alrededor de la laguna se desarrollan a partir de arcillas, son bien drenados, moderadamente profundos, de reacción ácida, bajo contenido de carbón orgánico, alto fósforo disponible en la capa arable y normal en las capas subyacentes (IGAC, 1985).

El lago se encuentra en una zona con un régimen transicional entre unimodal y bimodal con dos períodos secos y dos lluviosos y un promedio anual de lluvias de 1.124 mm (estación Potrero Largo, a 4 km y 2.790 m). Los meses más secos son diciembre, enero y febrero, después ocurre un período de intensa lluvia entre marzo y agosto, con valores más altos en julio. La temperatura promedio total multianual es de 12,1 °C, con un máximo promedio de 12,8 °C en abril y un mínimo promedio de 11,6 °C en julio.

El lago Guatavita es uno de los sitios referenciados como parte de la “Leyenda del Dorado” y fue uno de los principales centros ceremoniales precolombinos (Merchant, 1954). Desde la llegada de los españoles y hasta el siglo pasado fue secado varias veces por compañías extranjeras y nacionales con el objeto de extraer del fondo piezas de oro que fueron lanzadas al lago durante rituales indígenas. En la figura 1 se presenta una fotografía de uno de los drenados más recientes que fue documentado por Beisswanger, 1911. El drenado se realizó como parte de una campaña de explotación de oro desarrollada a comienzos del siglo XX. Ramírez, 1975, presenta una explicación más detallada de la historia de la laguna.

Actualmente, el lago hace parte de una reserva regional que está bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma y Regional de Cundinamarca y es un sitio turístico por su historia y atractivo paisajístico. Pese al alto grado de intervención ocurrido en la cuenca, la zona continúa presentando un interés desde el punto de vista arqueológico y científico (Anderson y Bray, 2006).

MÉTODOS

Para desarrollar el mapa batimétrico de lago se ubicaron varios puntos en la costa mediante un mapa a escala 1:10.000. A partir de estos puntos se extendieron líneas guías a través del lago sobre las cuales cada cinco metros se midió la profundidad mediante un sonar con error de 1 m. Se realizaron 528 mediciones de profundidad en abril de 2000, los datos se ubicaron en un plano de coordenadas de referencia y el mapa se construyó con el método de interpolación Kriging (Legendre y Legendre, 2000). El volumen total se calculó mediante la integración de capas de un metro de espesor. El área superficial y de cada sección se calculó planimétricamente. A partir de estos datos y siguiendo las recomendaciones de Wetzel y Likens, 2000, se construyó una curva hipsográfica y una curva de volumen.

Las variables morfométricas se obtuvieron mediante las ecuaciones sugeridas por Hutchinson, 1957, y Wetzel y Likens, 2000. No se calculó el campo de acción del viento sobre el espejo de agua, dado que observaciones de campo indicaron que el viento actúa con ráfagas de dirección muy variable durante cada día. La longitud máxima del lago (L) se calculó como la distancia más larga entre dos puntos ubicados en la costa del lago. El

ancho máximo (b) se calculó como la máxima distancia en línea recta entre dos puntos perpendiculares al eje de la longitud máxima. El ancho medio (b) se calculó como:

$$b = A_0 / L \quad (\text{E. 1})$$

Donde A_0 es el área superficial. La profundidad máxima (Z_m) se tomó de las observaciones realizadas en campo y la profundidad media (z) se calculó como:

$$z = V / A_0 \quad (\text{E. 2})$$

La profundidad relativa (Z_r) se calculó como:

$$Z_r = \frac{50Z_m\sqrt{\pi}}{\sqrt{A_0}} \quad (\text{E. 3})$$

La línea de playa (perímetro, SL) se calculó midiendo el contorno de la costa del lago. El desarrollo del perímetro (D_L) se calculó como:

$$D_L = \frac{SL}{2\sqrt{\pi \cdot A_0}} \quad (\text{E. 4})$$

Finalmente, el desarrollo del volumen (D_V) fue calculado como:

$$D_V = \frac{A_0 \bar{z}}{1/3 z_m A_0} \quad (\text{E. 5})$$

Esta información se comparó con datos morfométricos recopilados para 52 lagos que incluyen cinco lagos de zonas templadas, cuatro lagos subtropicales y 43 lagos de la zona intertropical. La información fue obtenida de Donato, 2001, Gocke, 1981, Haberyan *et al.*, 2003, Hutchinson, 1957, y de la base de datos del International Lake Environment Committee, 2008.

A partir de la información obtenida se establecieron relaciones entre la batimetría del lago y su comportamiento químico y biológico, utilizando los datos reportados por Pinilla *et al.*, 2006, Rivera *et al.*, 2005, Zapata *et al.*, 2006, y datos de productividad primaria fitoplanctónica recopilados entre 2000 y 2004.

La productividad primaria se cuantificó en diferentes campañas en 2000 y 2003 mediante incubaciones realizadas durante diferentes momentos del año y en siete profundidades que abarcaron la zona fótica y afótica en un solo punto central del lago. En 2004 también se realizaron mediciones en un punto de la zona litoral. En todos los casos se utilizó el método de evolución de oxígeno en botella clara y oscura, cuantificando el oxígeno mediante el método Winkler. La metodología de incubación y cuantificación de los cambios en la concentración de oxígeno siguió las recomendaciones de APHA *et al.*, 1998, Carignan *et al.*, 1998, y Zapata, 2001. Para establecer diferencias en la producción primaria entre las zonas litoral y limnética se integraron los valores de la columna de agua y se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis (Sokal y Rohlf, 2000).

RESULTADOS

El mapa batimétrico indica que el lago presenta una cubeta con forma elíptica y la zona más profunda se encuentra orientada hacia el occidente del lago (Fig. 2). La cubeta del lago se encuentra en una depresión rodeada por montañas que alcanzan más de 100m por encima de la superficie del agua.

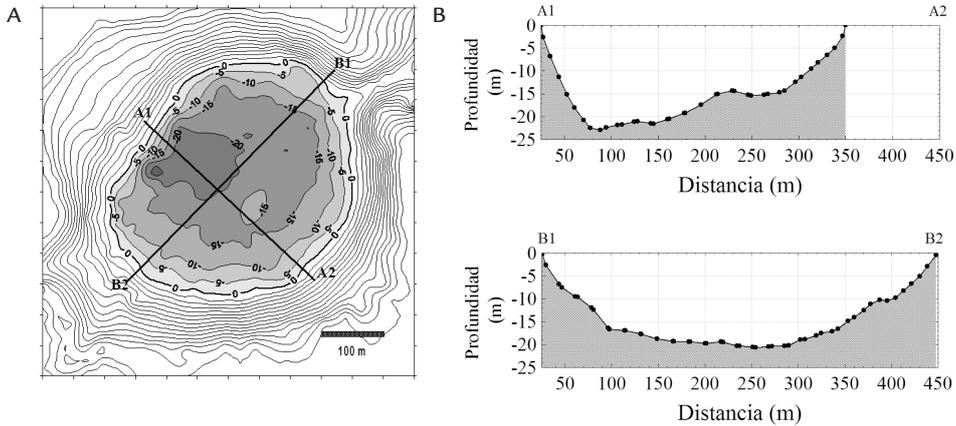


Figura 2. Mapa batimétrico del lago Guatavita y perfiles de profundidad desarrollados para la longitud (A) y el ancho máximo (B).

El lago presenta un bajo desarrollo del perímetro debido a la baja sinuosidad de la zona litoral (Tabla 1). La profundidad relativa fue de 7,9%, por lo que la cubeta es profunda con respecto a su área superficial. El valor de D_L indica que el lago se aproxima a una forma circular o subcircular.

Variable	Valor
Longitud máxima (L)	437 m
Ancho máximo (b)	325 m
Ancho medio (b)	260,9 m
Área superficial (A_o)	114.017 m ²
Volumen (V)	1'450.510 m ³
Máxima profundidad (Z_{max})	30 m
Línea de playa (SL)	1.305 m
Desarrollo del perímetro (D_L)	1,09
Profundidad relativa (Z_r)	7,9%
Profundidad media (z)	12,7 m
Desarrollo del volumen (D_V)	1,27
Relación z/Z_{max}	0,42

Tabla 1. Valores de las variables morfométricas en el lago de Guatavita.

Los perfiles realizados sobre los dos ejes principales del lago indican que sobre el eje mayor la cubeta presenta una pendiente del 15-17%. Si bien este gradiente es pronunciado, es menor que la pendiente que se presenta sobre el eje trazado en el ancho máximo. En este último caso se presenta una pendiente del 16% sobre el costado sur-occidental y una pendiente del 33% sobre el costado nor-occidental (Fig. 2); esta pendiente se mantiene en algunas de las laderas que están por encima del espejo de agua. De acuerdo con el desarrollo del volumen y los perfiles de profundidad, el lago presenta una forma cóncava, aunque el eje A1-A2 tiende a ser acañado.

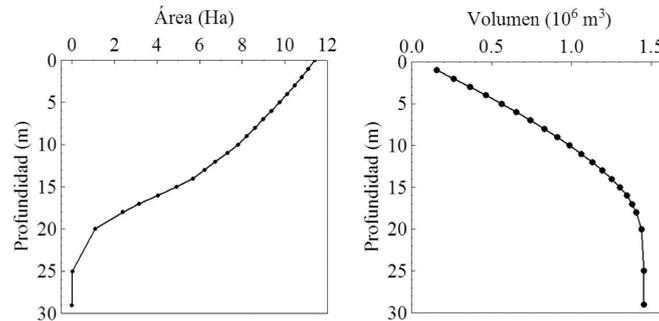


Figura 3. Curvas hipsográfica y de volumen del lago Guatavita.

La curva hipsográfica indica que el lago presenta un aumento constante del área de la sección con respecto a la profundidad; este patrón se extiende hasta los 15 m (Fig. 3). Posteriormente, el lago presenta una gran extensión relativamente plana entre los 15 y 20 m de profundidad (Fig. 2B).

La curva de volumen indica que la mayor parte del volumen del lago se encuentra en profundidades que están entre 0 y 17 m. Así mismo, el lago presenta un rápido incremento de volumen en los primeros 10 m. La tendencia casi lineal durante los primeros 15 m indica una forma cónica.

Cuando se compara con otros lagos tropicales de montaña (Tabla 2), el lago presentó valores bajos de productividad primaria fitoplanctónica durante 2000 y 2003. Estos datos sugieren que el lago tiende a presentar aguas desmineralizadas y con bajo contenido de nutrientes (Banderas *et al.*, 1991; Chacon y Rosas, 1998; Miller *et al.*, 1984; Pollinger y Bergman, 1991). Los valores obtenidos durante los muestreos de 2004 muestran una tendencia a valores más altos en la zona limnética, no obstante durante este año los valores a escala diaria fueron muy variables y no se presentaron diferencias significativas entre las dos zonas estudiadas ($p=0,27$, $n=36$).

DISCUSIÓN

La forma de la cubeta y las variables morfométricas permiten discutir algunas de las diferentes hipótesis que se han formulado para explicar el origen del lago (Ramírez, 1975). Un origen glaciar para esta cubeta profunda es poco probable debido a que la cuenca es pequeña y su altura máxima no supera 3.200 m. El mayor avance glaciar en las montañas colombianas descendió hasta los 3.000 m (Flores, 2002), por lo que el lago y su área circundante estarían ubicados en el límite periglacial.

Existen evidencias en los alrededores del embalse de Tominé de actividad volcánica durante el cenozoico tardío. Actualmente, se conocen dos cuellos volcánicos en la zona y para las formaciones geológicas presentes en la cubeta del lago se han documentado regionalmente vulcanitas de tipo lahar (Galvis *et al.*, 2006). No obstante, la hipótesis de que su forma se deriva de un cráter volcánico inactivo no se ha sustentado.

Un eje mayor con una moderada concavidad con respecto al ancho mayor, la profundidad de la cavidad en la cual se encuentra toda la cubeta del lago, la ausencia de escombros típicos de impactos, sugieren que la hipótesis de un impacto meteorítico es

Lagos tropicales	Producción primaria (g C m ⁻² año ⁻¹)	Producción primaria (g C m ⁻² año ⁻¹)
Lagos de alta montaña		
Lagos Ecuatorianos		12,1 - 1
Lago Sol (Méjico)		0,44 - 0,06
Lago Titicaca (Bolivia)	372	1,13
Mucubaji (Venezuela)		0,16
L. Guatavita (2000)	179,22	0,49
L. Guatavita (2003)	175,2	0,48
L. Guatavita zona limnética (2004)	306,6	0,84
L. Guatavita zona litoral (2004)	124,1	0,34
Lagos de baja altitud		
George (Uganda)	1.980	
Chilwa (Malawi)	730 - 1.300	
Victoria (Uganda)	640	
Lanao (Filipinas)	620	
Kivu (Zaire)	540	
Castanho (Brasil)	350 - 1.500	
Cristalino (Brasil)	53 - 1.500	
Don Helvecio (Brasil)	68	
Lago Boa (Colombia)		0,6-2,3

Tabla 2. Comparación de valores promedio de producción primaria de algunos lagos tropicales de alta montaña (Miller *et al.*, 1984; Banderas *et al.*, 1991; Pollinger y Bergman, 1991) y de zonas bajas (Esteves, 1998; Pinilla, 2009), con respecto al Lago de Guatavita.

poco probable. Así mismo, no se han encontrado evidencias regionales sobre un posible impacto (Beattie y Lowman, 1966; Dietz McHone, 1972).

La forma fuertemente acuñada de uno de los ejes (Fig. 2A) y la presencia de una terraza entre 10 y 15 m, podría indicar la actividad de una falla. De acuerdo con INGEOMINAS 1999, cerca de la cubeta se encontraría una falla que transcurre orientada en el sentido NE-SO y que coincide con la zona de mayor pendiente del lago. Es importante considerar que el fondo de la cubeta sufrió una fuerte intervención en el pasado (1830-1935), cuando fue drenado por lo menos cuatro veces (Ramírez, 1975). No obstante, la profunda depresión en la cual se encuentra la cubeta del lago sustenta que antes de la intervención antrópica debió ser profundo.

La forma circular de la cubeta del lago ($D_L < 1,15$), también podría explicarse por un proceso cárstico. El terminal nororiental del anticlinal donde se ubica la laguna de Guatavita finaliza inclinándose posiblemente por falta de sostén interior, por disolución de sales ya que en la parte superior de las montañas y anticlinales hay frecuentes fracturas y grietas por donde penetra el agua lluvia que baja a disolver la sal a alguna profundidad (McLaughlin SF, en Ramírez 1975). Estas son algunas de las premisas en que se basa la hipótesis con respecto al origen de la depresión de la laguna que establece su formación por un colapso originado por la solución de las intrusiones o estratos salinos subyacentes. No obstante, en el área cercana al lago no se han encontrado otras geoformas semejantes

que sean producto de procesos cársticos, la evidencia más próxima de formaciones salinas está dada por la mina de Zipaquirá, ubicada a unos 25 km del lago. También se han documentado algunas depresiones pseudos-cársticas de poca profundidad en laderas del valle de Guasca a una distancia aproximada de 7 km (Robertson, 1980).

El origen cárstico está asociado a la formación de una cubeta pequeña, profunda y con un bajo volumen embalsado (Fig. 2). Este resultado coincide con la relación Z/Z_{\max} igual a 0,42, que indica que la cubeta del lago presenta una forma sinusoide elíptica (Wetzel, 2001). Guatavita presenta una alta Z_r si se compara con otros lagos tropicales (Fig. 4), con lagos de tierras bajas de Colombia (Benjumea *et al.*, 2008; Montoya 2005, 2008) y con sistemas artificiales como embalses (Hernani y Ramirez, 2002). No obstante, la Z_r de Guatavita es menor que la presentada por los lagos Río Cuarto y Boeri, y es semejante al lago Chirripó que son de origen volcánico (Tabla 3). Los lagos Chirripó y Río Cuarto son de tipo volcánico-maar y presentan una tendencia a la meromixis (Haberyan *et al.*, 2003). La Z_r en Guatavita es mayor que otros lagos volcánicos tropicales como el lago Hule en Costa Rica (Gocke, 1996) cuya Z_r es 2,4%. Lagos con altitudes superiores a 1.000 m rara vez presentan valores altos de Z_r . De los 32 lagos tropicales ubicados a más de 1.000 m y comparados en este estudio, únicamente Guatavita, Chingaza, Otún, Verde, Chirripó y Crater, presentan Z_r mayores a 4% (Fig. 4).

La alta Z_r determina una zona litoral poco desarrollada, con una elevada pendiente, en donde las comunidades de macrófitas están ausentes y posiblemente las comunidades planctónicas no presentan diferencias horizontales. A pesar de la alta profundidad en la zona litoral, el 35% de la cubeta del lago está dentro del epilimnio, por lo que podría existir un importante flujo de nutrientes desde el sedimento hacia la zona iluminada. La forma de la cubeta también es importante para la organización vertical del lago, dado que permite la formación de una estratificación térmica con un gradiente vertical de temperatura menor a 3 °C, que se mantiene durante un periodo de ocho meses y con un epilimnio de 6 a 12 m de amplitud (Rivera *et al.*, 2005). El extenso periodo de estrati-

Lago	Altitud (m)	Latitud	Longitud	Área (ha.)	Volumen (m ³)	Profun. máx. (m)	Profun. media (m)	Profun. Relativa (%)
Lanao (Filipinas)	702	8°00'N	123°50'E	3,75x10 ⁴		112	60	0,51
Victoria (Africa)	1134	10°4'S	33°1'E	6,88x10 ⁶	2,8x10 ¹²	84	40	0,03
Tanganyika (Africa)	773	6°0'S	30°1'E	3,2x10 ⁶	1,8x10 ¹³	1471	572	0,73
Valencia (Venezuela)	405	10°1'N	67°4'W	3,5x10 ⁴	6,3x10 ⁹	39	18	0,18
Titicaca (Bolivia)	3812	15°4'S	69°4'W	8,37x10 ⁵	8,9x10 ¹¹	281	107	0,27
Boeri (Dominica)	869	15°21'N	61°19'W	3,6		39,6		18,5
Nicaragua	32	11°30'N	85°30'W	8,15x10 ⁵	1,1x10 ¹¹	70		0,07
Río Cuarto (C, Rica)	380	10°21,6'N	84°12,6'W	31,5		66		10,42
Chirripó (C, Rica)	3520	9°29'N	83°29'W	7,8		22		6,98
Amatitlán (México)	1188	14°3'N	90°4'W	1520	2,9x10 ⁸	33		0,75
Guamuez (Colombia)	2850	1°09'N	77°07'W	4114		75		1,04
Cumbal (Colombia)	3424	1°07'N	77°58'W	224	2,2x10 ⁷	26	10	1,54
Guatavita (Colombia)	2980	4°58'N	73°47'W	11,4	1,5x10 ⁶	30	13	7,87

Tabla 3. Comparación de algunas variables morfométricas entre diferentes lagos tropicales y el Lago Guatavita. Datos tomados de: Donato (2001), Gocke (1981), Haberyan *et al.* (2003), Hutchinson (1957) e *International Lake Environment Committee* (2008).

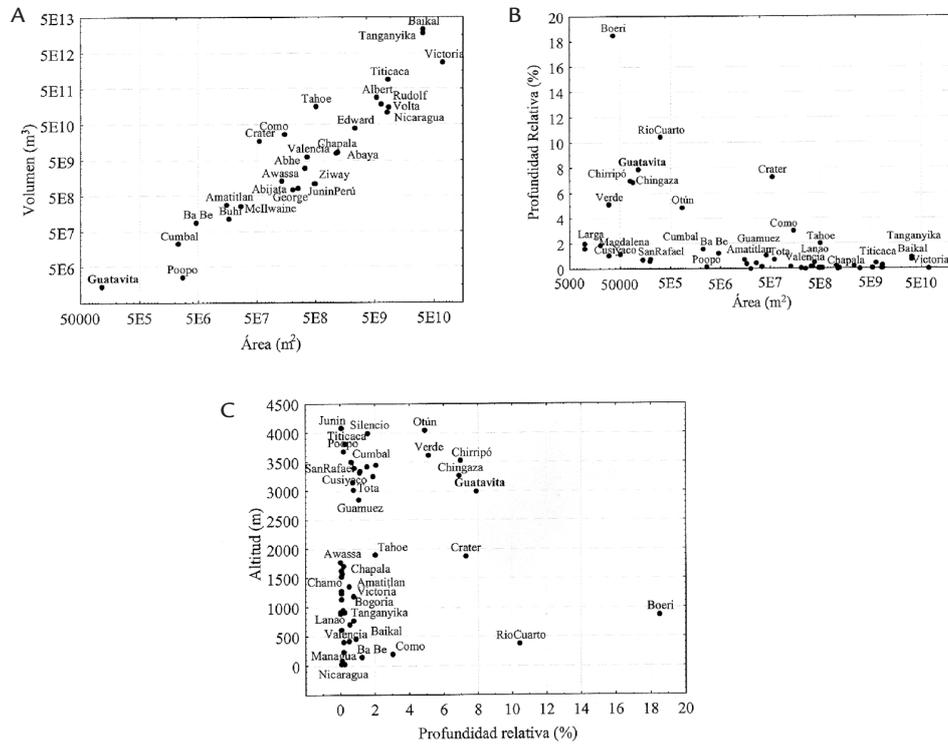


Figura 4. Comparación entre volumen y área (A), profundidad relativa y área (B), y altitud y profundidad relativa (C), de algunos lagos templados, lagos tropicales y subtropicales.

ficación provoca la formación de un hipolimnio hipóxico y un fuerte gradiente en la conductividad y la concentración de amonio. Así, durante el mes de mayor estabilidad térmica (marzo), el epilimnio presenta $2,8 \mu\text{mol NH}_4/\text{L}$ y el hipolimnio $80 \mu\text{mol NH}_4/\text{L}$. Este gradiente químico y la atenuación de la radiación incidente determinan la formación de un gradiente vertical en la composición y riqueza de la comunidad algal, que sumada al largo periodo de estratificación genera una sucesión autogénica de la comunidad en donde Chlorophyceae, Euglenophyceae, Dinophyceae y Zygothyceae son los grupos más importantes (Rivera *et al.*, 2005). La permanente estratificación térmica también conduce a la limitación de nitrógeno en el epilimnio y a la formación de un pico metalimnético de clorofila a (Zapata *et al.*, 2006). Durante el periodo estratificado también se reporta una mayor eficiencia fotosintética en el metalimnio (Pinilla *et al.*, 2006).

El bajo desarrollo del perímetro, la forma subcircular y la escasa zona litoral, implican que el lago es muy dependiente del reciclaje de nutrientes y que el aporte desde la zona litoral es bajo, por lo que la productividad fitoplanctónica de la zona litoral no difiere significativamente de la zona limnética.

Dado que la transparencia del lago oscila entre 1,4-2,6m (Rivera *et al.*, 2005), un 70% de la columna de agua no está iluminada; así, el lago presenta un amplio hipolimnio en donde el reciclaje de la materia orgánica es importante para la organización de las comunidades heterotróficas. Esta baja transparencia sumada a la alta profundidad

tiene implicaciones en la baja productividad primaria registrada para el lago, cuando se compara con lagos más profundos y oligotróficos.

CONCLUSIONES

En conclusión, el lago Guatavita es un lago pequeño pero proporcionalmente profundo, con una forma circular-subcircular y una cubeta sinusoidal elíptica. La profundidad relativa es alta en comparación con otros lagos de alta montaña y semejante a lagos volcánicos tropicales. Estas características confieren al lago la formación de un fuerte gradiente vertical físico y químico que determina la dinámica vertical y temporal de las comunidades biológicas y que parecen influir en una baja productividad primaria del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Pontificia Universidad Javeriana y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas Colciencias por la financiación. Este trabajo se desarrolla bajo la financiación de los proyectos: Producción primaria fitoplanctónica de las zonas litoral y limnética en el lago de Guatavita (ID PRY 527) y La productividad de los lagos andinos: un problema de escala espacial y temporal (ID PRY 1408, N.º Colciencias 1203-13-203-99). A la Corporación Autónoma y Regional de Cundinamarca-CAR, por su colaboración durante el desarrollo del estudio. A Jürgen Guerrero Kommritz por su colaboración en la consecución de la fotografía antigua del lago.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATERWORKS ASSOCIATION, WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION. Standard methods for examination of water and sewage and wastewater. Nueva York: American Public Health Association; 1998.
- ANDERSON K, BRAY W. The amber of El Dorado: class IB archaeological ambers associated with Laguna Guatavita. *Archaeometry*. 2006;48(4):633-640.
- BANDERAS A, GONZÁLEZ R, LANZA G. Limnological aspects of a high-mountain lake in Mexico. *Hydrobiologia*. 1991;224:1-10.
- BARBOSA FAR, PADISÁKJ. The forgotten lake stratification pattern: atelomixis, and its ecological importance. *Verh Internat Verein Limnol*. 2002;28:1385-1395.
- BEATTIE DA, LOWMAN PD JR. Origin of Laguna de Guatavita, Colombia. *Geol. Soc. Meeting*; 1966.
- BEISSWANGER K. Am Lande der heiligen Seen. Reisebilder aus der Heimat der Chibcha-Indianer (Kolumbien), Druck und von K. Beisswanger, Nürnberg; 1911.
- BENJUMEA C, WILLS A, AGUIRRE N. Principales aspectos morfológicos de la ciénaga de Cachimberos. *Ges. Ambient*. 2008;11(2):1-8.
- BENSON BJ, LENTERS JD, MAGNUSON JJ, STUBBS M, KRATZ TK, DILLON PJ, *et al.*, Regional coherence of climatic and lake thermal variables of four lake districts in the upper Great Lakes region of North America. *Freshwater Biol*. 2000;43:517-527.

CARIGNAN R, BLAIS AM, VIS CH. Measurement of primary production and community respiration in oligotrophic lakes using the Winkler method. *Can J Fish. Aquat. Sci.* 1998;55(5):1078-1084.

CHACON A, ROSAS C. Water quality characteristics of a high altitude oligotrophic Mexican lake. *Aquatic Ecosystem Health and Management Society, Canada. Aquat Ecosys Health.* 1998;1:237-243.

DIETZ R, MCHONE J. Laguna Guatavita: Not meteoritic, probable SALT collapse crater. *Meteoritic.* 1972;7(3):303-307.

DONATO J. Fitoplancton de los Lagos Andinos del Norte de Sudamérica (Colombia). Composición y factores de distribución. Bogotá: Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universitat de Barcelona. Colección Jorge Álvarez Lleras N.º 19; 2001.

DONATO J. Consideraciones generales sobre el estado de los ambientes acuáticos de agua dulce en Colombia. En: Neiff JJ, editor. *Humedales de Iberoamérica.* Buenos Aires: CYTED; 2004. p. 226-236.

ESTEVES FA. *Fundamentos de limnología.* 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Inter-ciencia Ltda; 1998.

FEE E. A relation between lake morphometry and primary productivity and its use in interpreting whole-lake eutrophication experiments. *Limnol Oceanogr.* 1979;24(3):401-416.

FLORES A. Movilidad altitudinal de páramos y glaciares en los Andes colombianos. En: Jaramillo C, Castaño C, Arjona F, Rodríguez JV, Duran C, editores. *Memorias Congreso Mundial de Páramos, Paipa (Boyacá).* Bogotá: Conservación Internacional; 2002. p. 80-90.

GALVIS J, DE LA ESPRIELLA R, CORTÉS R. Vulcanismo cenozoico en la Sabana de Bogotá. *Rev Acad Colomb Cienc.* 2006;30(117):495-502.

GOCKE K. Basic morphometric and limnological properties of Laguna Hule, a caldera lake in Costa Rica. *Rev Biol Trop.* 1981;29(2):165-174.

GOCKE K. Basic morphometric and limnological properties of laguna Hule, a caldera lake in Costa Rica. *Rev Biol Trop.* 1996;44(3)/45(1):537-548.

GORHAM E. Morphometric control of annual Heat Budgets in Temperate Lakes. *Limnol. Oceanogr.* 1964;9(4):525-529.

HABERYAN KA, HORN SP, UMAÑA G. Basic limnology of fifty-one lakes in Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 2003;51(1):107-122.

HÅKANSON, L. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology - ranking based on statistical analyses. *Hydrobiologia.* 2005;541:117-137.

HÅKANSON, L. *A manual of lake morphometry.* Berlin: Springer-Verlag; 1981.

HERNANI A, RAMIREZ JJ. Aspectos morfométricos y teóricos de un embalse tropical de alta montaña: Represa La Fe, El Retiro, Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2002;26(101):511-518.

HUTCHINSON G. *A treatise on limnology.* Vol I. Geography, physics and chemistry. New York: John Wiley & Sons inc.; 1957.

INTERNATIONAL LAKE ENVIRONMENT COMMITTEE - ILEC. World lakes database. 2008; Disponible en: URL: <http://wldb.ilec.or.jp>. Consulta mayo de 2010.

INGEOMINAS. Mapa geológico del Departamento de Cundinamarca. Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería; 1999.

- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI - IGAC. Estudio general de suelos del oriente de Cundinamarca y municipio de Umbita (Boyacá). Bogotá: Subdirección Agrología Instituto Geográfico Agustín Codazzi; 1985.
- JOHANSSON H, BROLIN A, HÅKANSON L. New approaches to the modeling of lake basin morphometry. *Environ Model Asses.* 2007;12:213-228.
- LEGENDRE P, LEGENDRE L. Numerical ecology. *Developments in Environmental modelling*, 20. 2 ed. Amsterdam, Elsevier Science; 2000.
- LEWIS W. Tropical lakes: how latitude makes a difference. En: Schiemer F, Boland KT, editors. *Perspectives in tropical Limnology*. Amsterdam: SPB Academic Publishing; 1996. p. 43-64.
- MAZUMDER A, TAYLOR W. Thermal structure of lakes varying in size and water clarity. *Limnol Oceanogr.* 1994;39(4):968-976.
- MCLAUGHLIN D, ARCE M. Mapa geológico del cuadrángulo Zipaquirá (K-11) Colombia. Bogotá: Ingeominas; 1975.
- MEDING M, JACKSON L. Biotic, Chemical, and Morphometric Factors Contributing to Winter Anoxia in Prairie Lakes. *Limnol. Oceanogr.* 2003;48(4):1633-1642.
- MERCHANT F. Legend and Fact about Gold in Early America. *West Folk.* 1954;13(2/3):170-183.
- MILLER M, KANNAN M, COLINVAUX P. Limnology and primary productivity of Andean and Amazonian tropical lakes of Ecuador. *Verh Internat Verein Limnol.* 1984;22:1264-1270.
- MONTOYA Y. Caracterización morfométrica básica de tres lagos someros en el municipio de el Carmen de Viboral (Antioquia), Colombia. *Actual Biológicas.* 2005;27(82):79-86.
- MONTOYA Y. Caracterización morfométrica de un sistema fluviolacustre tropical, Antioquia, Colombia. *Caldasia.* 2008;30(2):413-420.
- PATALAS K. Comment on "A Relation Between Lake Morphometry and Primary Productivity and its Use in Interpreting Whole-Lake Eutrophication Experiments" (E. J. Fee). *Limnol Oceanogr.* 1980;25(6):1147-1149.
- PINILLA G, DONATO J, RIVERA C. Photosynthetic efficiency of phytoplankton in a tropical mountain lake. *Caldasia.* 2006;28(1):57-66.
- PINILLA G. Producción primaria en un lago de aguas claras de la Amazonía colombiana (Lago Boa). *Acta biol. Colomb.* 2009;14(2):21-30.
- POLLINGHER U, BERMAN T. Phytoplankton composition and activity in lakes of the warm belt. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1991;24:1230-1234.
- RAST W, THORNTON J. The phosphorus loading concept and the OECD eutrophication programme: Origin, application and capabilities. En: O'Sullivan P, Reynolds C, editors. *The lakes Handbook. Vol. 2: Lake Restoration and rehabilitation*. Massachusetts: Blackwell Publishing; 2005. p. 354-385.
- RAWSON D. Mean Depth and the Fish Production of Large Lakes. *Ecology.* 1952;33(4):513-521.
- RAMÍREZ JE. La laguna de Guatavita. *Bol. Soc. Geogr. Colomb.* 1975;29(107):45-60.
- RICHARDSON J. Morphometry and lacustrine productivity. *Limnol Oceanogr.* 1975;20(4):661-663.
- RIVERA RONDON C, SOLANO D, ZAPATA A, DONATO-RJ. Phytoplankton diversity in a tropical high mountain lake. *Verh Internat Verein Limnol.* 2005;29(1):418-421.

ROBERTSON K. Mapa geomorfológico del valle de Guasca. [Trabajo de Grado Geógrafo]. Bogotá: Facultad de Ingeniería Geográfica. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Colombia; 1980.

SOKAL R, ROHLF J. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. 3 ed. New York: W.H. Freeman; 2000.

TIMMS B. Morphometric Control of Variation in Annual Heat Budgets. *Limnol Oceanogr.* 1975;20(1):110-112.

VINNI M, HORPPILA J, OLIN M, RUUHIJÄRVI J, NYBERG K. The food, growth and abundance of five co-existing cyprinids in lake basins of different morphometry and water quality. *Aquat Ecol.* 2000;34:421-431.

WETZEL R. *Limnology: Lake and river ecosystems*. Third Edition. San Diego: Academic Press; 2001. p. 142-150.

WETZEL R, LIKENS G. *Limnological Analyses*. Third Edition. New York: Springer-Verlag; 2000. p. 208-212.

ZAPATA A. Variaciones diarias y mensuales de la producción primaria en un lago Andino (Laguna de Guatavita: Cundinamarca). [Tesis de Maestría]. Bogotá: Facultad del Ciencias. Pontificia Universidad Javeriana; 2001.

ZAPATA ANZOLA A, RIVERA RONDON C, DONATO J. Dynamic of photosynthetic pigments in an Andean lake of Colombia. *Lake Reserv Res Manage.* 2006;11(1):29-38.