

ASPECTOS MORFOMÉTRICOS Y TEÓRICOS DE UN EMBALSE TROPICAL DE ALTA MONTAÑA: REPRESA LA FE, EL RETIRO, COLOMBIA

por

Alejandra Hernani T.¹ John J. Ramírez R.²

Resumen

Hernani, A. & John J. Ramírez: Aspectos morfométricos y teóricos de un embalse tropical de alta montaña: Represa La Fe, El Retiro, Colombia. *Rev. Acad. Colom. Cienc.* **26**(101): 511-518. ISSN 0370-3908.

Se describen las características batimétricas y morfométricas de la represa La Fe y las predicciones de carácter teórico derivadas del análisis de los parámetros morfométricos y los elementos de forma. El valor del índice de desarrollo de Perímetro ($F = 2,25$) corresponde al de un sistema medianamente dendrítico. El índice de desarrollo de volumen ($Dv = 1,05$) muestra un cuenco de forma cónica ligeramente convexa y con puntos de inflexión (SCx-micro). Los valores de la profundidad relativa ($Dr = 2,07\%$) y el fetch efectivo ($L_f = 5,9 \times 10^3$ km) corresponden a un cuerpo de agua con una pista de acción reducida para el viento y una profundidad considerable en el punto de muestreo. Se predice que el embalse La Fe es un cuerpo de agua térmicamente estable, con penetración de luz y alotrofia considerables, de productividad baja, mezcla restringida sólo a los primeros metros de la columna de agua y zona litoral ampliamente desarrollada.

Palabras clave: Limnología, embalse tropical de alta montaña, morfometría.

Abstract

Batimetric and morphometric characteristics of La Fe reservoir are described. Theoretical predictions are derived from morphometrical parameters and shape elements. The shore development index ($F = 2,25$) shows a more or less dendritic system. In accordance with the values of the volume development index ($Dv = 1,05$), La Fe reservoir has a conical basin, and slightly convex shape with several inflexion points (SCx-micro). The values of relative depth ($Dr = 2,07\%$) and effective fetch ($L_f = 5,9 \times 10^3$ km) show a waterbody with a reduced road for the wind action and a considerable depth in the sampling point. It is predicted that La Fe reservoir is a freshwater system with termical stability, considerable light penetration and alotrophy, low productivity, restricted mixing to first meters of water column and a litoral zone widely developed.

Key words: Limnology, high mountain tropical reservoir, morphometry.

¹ Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. Apartado 1226, Medellín, Colombia. e-mail: alejahernani@hotmail.com

² Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. Apartado 1226, Medellín, Colombia. e-mail: jjram@matematicas.udea.edu.co

Introducción

Las dimensiones físicas de un lago interactúan con los factores climáticos y otros factores edáficos asociados para determinar la naturaleza del lago como ambiente y, por lo tanto, a los habitantes del mismo. Por ello, es necesario resaltar el control operado sobre todos los fenómenos físicos por las características morfológicas del vaso del lago, al igual que por la topografía subaérea y por la situación climatológica local (Barbanti 1985).

Los métodos para medir y analizar las dimensiones físicas de un lago o embalse se llaman morfometría. Forman parte de los métodos morfológicos que detallan las formas y los elementos de forma de un cuerpo de agua, su génesis (desde un punto de vista geográfico y ecológico) y sus papeles en una perspectiva limnológica amplia. La interpretación correcta de estos datos es una herramienta útil para el manejo de estos sistemas, pues son la base para reconocer las variaciones en la morfología del fondo y la capacidad de las cubetas, establecer la distribución de los sedimentos, y las variaciones de volumen y área del cuerpo de agua (Håkanson 1981, Cole 1983). A pesar de lo anterior, cabe destacar que la información obtenida no debe sustituir a los monitoreos adecuados, pues sólo resalta tendencias y no reporta datos sobre el funcionamiento del lago (Sperling 1994).

Algunos parámetros morfométricos son extremadamente significativos, ya que evidencian la susceptibilidad del cuerpo de agua a la eutroficación y permiten especular sobre la productividad del sistema. Otros como la profundidad máxima y el cálculo de algunas relaciones o índices conducen a conclusiones acerca de la forma de la cubeta. El conocimiento de las curvas de profundidad y volumen permite dilucidar en qué región del lago está contenida la mayor cantidad de agua, lo cual constituye un indicador importante de la posible conducta del sistema en relación con la formación de perfiles térmicos y la definición de los ciclos de estratificación y circulación de los lagos (Sperling 1994).

El presente artículo analiza las características batimétricas y morfométricas de la represa La Fe y establece predicciones teóricas basadas en el análisis de los parámetros y elementos morfométricos utilizados.

Materiales y métodos

Descripción del área. La zona de captación del embalse La Fe (antes embalse Los Salados) se ubica entre las coordenadas 6° 12' 5" 59' Norte y 75° 35' -75° 28' Oeste; cubre un área de 173 km² con alturas que oscilan entre los

2.175 y los 3.000 msnm. Fue llenada en 1973 y se sitúa en su totalidad en la formación vegetal bmh-MB, caracterizada por una precipitación media anual entre 2.000 y 4.000 mm. En la clasificación de Donato (1991) se localiza en la Provincia de alta Montaña Tropical. Es propiedad de las Empresas Públicas de Medellín (EPM-EPS) y está situada en el municipio de El Retiro, 100 m arriba del sitio La Fe, donde confluyen la quebrada Las Palmas y el río Pantanillo. Recibe las aguas de las quebradas Las Palmas, Potreros, La Miel y Espíritu Santo por gravedad y las de los ríos Pantanillo, Piedras y Buey por bombeo. Su vertedero puede descargar en condiciones normales 690 m³.s⁻¹ (Abuchaibe *et al.* 1988). Las aguas del río Pantanillo son tratadas mediante el sistema de lodos activados en una planta de tratamiento localizada en el municipio de El Retiro, antes de ser bombeadas a la represa La Fe, lo que disminuye la entrada de material particulado, pero no la del material disuelto.

El embalse es utilizado principalmente para acueducto, pero una parte del mismo está destinado a la recreación (Parque Los Salados). Parcialmente es utilizado para generación hidroeléctrica.

Del volumen total del embalse (aprox. 15 Mm³), 12 Mm³ son utilizados para regular conjuntamente con el bombeo del río Pantanillo un caudal de 8.0 m³.s⁻¹ destinado al acueducto metropolitano a través de la planta de tratamiento de la Ayurá, localizada en el municipio de Envigado (Abuchaibe *et al.* 1988).

Gran parte de la zona de estudio se sitúa en el metamórfico, pero al sur de la población de El Retiro se manifiesta el batolito antioqueño. La meteorización de estas rocas es bastante profunda en las zonas de menor pendiente, pero en las zonas de mayor inclinación, las rocas no alcanzan a aflorar. Los suelos derivados de esta meteorización son arcillosos, de colores rojo y pardo rojizo (Córdoba & Villegas 1966).

Los suelos de esta región son ricos en materia orgánica y nitrógeno total, este último asimilable sólo en pequeña cantidad. Son ácidos, con pH que varía de 4.4 a 4.5; pobres en calcio, magnesio y fósforo y medianos en potasio. Son grandes fijadores de fósforo. Las vertientes de la represa se encuentran sembradas con pinos (*Pinus patula*) y cipreses (*Cupressus lusitanica*) (Córdoba & Villegas 1966).

La torre de captación tiene un diámetro interior de 2,80 m; tiene instaladas tres compuertas deslizantes de 36" de ancho por 72" de altura: la inferior se sitúa entre las cotas 2150.65 y 2148.40, la siguiente entre la 2146.15

y la 2143.90, y la superior entre las cotas 2141.65 y 2139.40.

Con la finalidad de contrastar la información teórica brindada por los parámetros y elementos de forma con la información real obtenida se realizaron 10 muestreos entre los meses de marzo y julio de 1998 en la zona de máxima profundidad (20 – 25 m) localizada en el área limnética del embalse, cerca del sitio de presa. (Fig. 1). En esta zona se realizaron semanalmente perfiles térmicos a cada 0,05 m en los primeros 15 metros de la columna de agua, y desde allí hasta el fondo a cada 0,50 m. Se midió además el oxígeno disuelto a cada 5 metros con un kit Merck mediante el método de Winkler.

El mapa batimétrico del embalse La Fe y los datos de volúmenes y áreas en cada cota fueron suministrados por la Sección de Hidrometría de las Empresas Públicas de Medellín. Con base en estos datos y las recomendaciones de Håkanson (1981) y Cole (1983) se construyó una curva hipsográfica absoluta y con ella se estableció la forma del embalse y las profundidades mediana, del primero y del tercer cuartil. Las medidas morfométricas superficia-

les se obtuvieron sobre un mapa de escala 1:5000. Los factores de Inclinación (S) y Forma (Dv^{-1}) se calcularon con las fórmulas de Barbanti (1985).

Para establecer las unidades por encima o por debajo del valor medio estimado para un parámetro morfométrico dado se utilizó la fórmula:

$(x_i - m)/m$, donde x_i es el valor del parámetro, y m corresponde al valor de la media aritmética muestral.

La dispersión de los datos respecto del valor medio se estimó con el coeficiente de variación relativa de Pearson (CV, en porcentaje).

Con base en la dirección del viento estimada con una veleta de tela, una brújula y una rosa de los vientos, se calculó el valor del fetch efectivo (L_f), utilizando el método propuesto por el **Standard Beach Erosion Board** (1972 en Håkanson 1981). En cada jornada de muestreo se tomaron siete medidas de dirección del viento, obteniéndose para cada una un valor de L_f . El valor medio constituyó el Fetch efectivo definitivo, considerado una medida más representativa del mismo, debido al comportamiento errático del viento en la estación de muestreo.

La transparencia (D_{50}) se estimó con un disco de Secchi de 0,20 m de diámetro y bandas negras y blancas alternadas y la profundidad de la zona fótica (D_{50}) se calculó multiplicando la transparencia por 2,75. El coeficiente de atenuación lumínica (k), se estimó a través de la fórmula de Weinberg (1976):

$$k = 2.6/(D_{50} + 2.5) - 0.048$$

Resultados

La Tabla 1 presenta los valores de los principales parámetros morfométricos y elementos de forma evaluados para el embalse La Fe. De acuerdo con ellos, la represa es un cuerpo de agua pequeño; con transparencia alta, ligeramente dendrítico; alotrófico; con vaso en forma de V; fetch reducido, tendencia a la estabilidad térmica y a la anoxia de fondo; zona litoral desarrollada, exportador de calor, acumulador de nutrientes y oligomesotrófico.

Discusión

A pesar de que según Håkanson (1981) la represa La Fe es un cuerpo de agua pequeño ($A < 2,0 \text{ km}^2$), para Cole (1983) no tiene mucho sentido hablar del tamaño de un cuerpo de agua en función de su área solamente; sería necesario considerar además otras dimensiones como el volumen, pues no siempre los lagos de mayor área son los

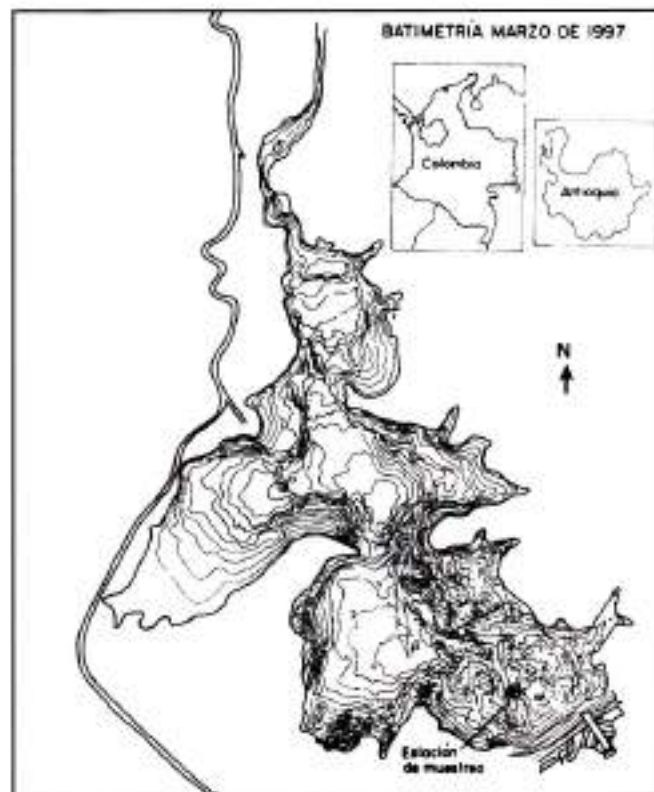


Figura 1. Mapa Batimétrico de la Represa de La Fe, señalando la estación de muestreo.

Tabla 1. Valores de los parámetros morfométricos estimados para la represa La Fe

Parámetro	Valor
Longitud máxima (L_{max}), km	0.65
Ancho máximo (B_{max}), km	0.41
Ancho medio (B_m), km	2.21
Elipsoidad (E), adimensional	0.29
Profundidad máxima (D_{max}), m	28.00
Profundidad media (D_m), m	9.79
Profundidad mediana (D_{50}), m	9.30
Profundidad del primer cuartil (D_{25}), m	16.8
Profundidad del tercer cuartil (D_{75}), m	5.00
Profundidad relativa (Dr), %	2.07
Dirección del eje mayor	SSO-NNE
Perímetro (Lo), km	9.54
Área total (A), km ²	1.43
Volumen (V), km ³	0.014
Índice de desarrollo del perímetro (F), adimensional	2.25
Índice de desarrollo de volumen (Dv), adimensional	1.05
Forma del embalse	SCxmi
D_m/D_{max}	0.35
L_{max}/B_{max}	1.41
% de la pendiente media (%MS)	4.15
Factor de pendiente (S), %	1.00
Factor de forma (Dv^{-1}), adimensional	0.95
Feich efectivo (L_e), km	5.9×10^3

más profundos ni los de mayor volumen. Por ejemplo, el Lago Chad en África Ecuatorial cubre 16.500 km² pero su profundidad media es de sólo 1,5 m y su volumen aproximadamente de 25 km³. El Lago Baikal tiene un área de 31.500 km², 2,64 veces menor que la del Lago Superior (83.300 km²); a pesar de ello, el volumen del Lago Baikal (23.000 km³) es 2,09 veces mayor que el del Superior (11.000 km³) ¿Cuál lago es entonces mayor?

El valor de F , 2,25 veces mayor que el de referencia para una cubeta circular perfecta con $F = 1,0$, indica que el lago tiene forma ligeramente dendrítica. Consecuentemente, el grado de elipsoidad ($E = 0,29$) se aleja de una forma circular, cuyo valor sería de cero. Según **Håkanson** (1981), valores de F mayores que 10 son raros y corresponderían a archipiélagos.

Cuando F presenta valores mayores que 3,5, el cuerpo de agua es clasificado como dendrítico. Al comparar el valor hallado de F con el de otros embalses (Tabla 2), se observa que se halla 0,56 unidades por debajo del valor medio lo que corrobora que se trata de un cuerpo de agua medianamente dendrítico en el cual, por los mayores pun-

tos de contacto con el área circundante, la alotrofia debe ser considerable pero contrarrestada por el cinturón de macrófitas presente, como se analizará más adelante.

Para **Wetzel** (1981), la mayoría de los lagos se desvían mucho de la forma circular presentando formas subcirculares y elípticas, con valores de F aproximadamente de 2, como es el caso del embalse La Fe (Tabla 1). Cuando la forma es más alargada aumenta notablemente el valor de F .

La razón D_m/D_{max} da un valor comparativo de la forma de la cubeta en términos de desarrollo volumétrico. Para la mayor parte de los lagos, este cociente es mayor que 0,33, valor que se obtendría en una depresión cónica. **Wetzel** (1981) reporta para más de 100 lagos un valor medio de 0,467 para esta razón, muy cercano al correspondiente a un senoide elíptico ($D_m/D_{max} = 0,464$). El valor en la represa La Fe para dicha razón es de 0,35, es decir, similar al de una depresión cónica perfecta o un cono elíptico recto. A pesar de que investigaciones realizadas en un gran número de lagos (**Hayes** 1957, **Gorham** 1958, **Neumann** 1959, **Koshinsky** 1970) concluyen que la mayoría de los lagos tienen una cubeta en forma de U en su sección cruzada, La Fe se aleja profundamente de esta tendencia. El valor de la profundidad media, ligeramente mayor que el de la profundidad mediana, resalta la regularidad de la forma en V del vaso del embalse. Esta forma se corrobora comparándola con las curvas batigrá-

Tabla 2. Valores de profundidad relativa (Dr), y de los índices de Desarrollo de Volumen (Dv) y Desarrollo de Perímetro (F) en diferentes cuerpos de agua brasileiros (Fuente: **Sperling** 1994)

Sistema	Dv	Dr	F
Três Marias	0.96	0.15	—
Formoso	1.00	0.20	—
Bocaina	0.80	0.30	—
Nova Ponte	—	0.50	5.30
Ibirite	—	—	—
Emborcação	0.86	0.60	—
Petú	—	—	6.60
Salinas	—	0.60	—
Machado Mineiro	—	0.60	—
Pampulha	0.94	0.90	3.70
Vargem das Flores	1.10	0.90	6.60
Serra Azul	1.00	1.00	5.70
Samambaia	—	1.10	—
Bananal	—	1.10	—
Soledade	—	1.40	6.00
Carafas	—	1.70	—
Calhauzinho	—	1.80	—
Mosquito	—	2.20	—
La Fe	1.05	2.07	2.25

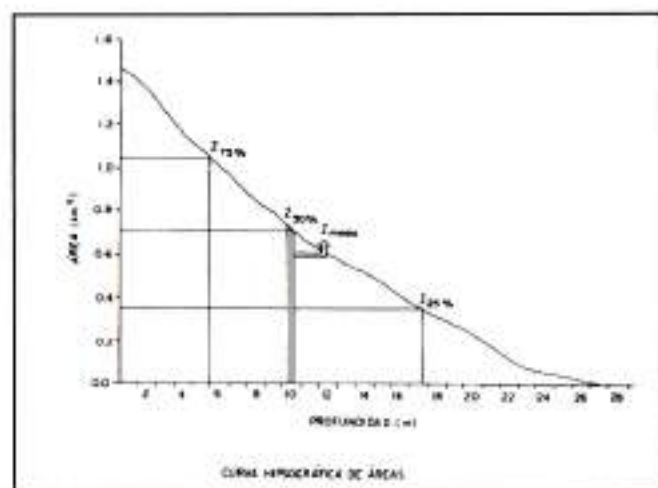


Figura 2. Curva Hipsográfica absoluta para el embalse La Fe.

ficas de vasos de lagos regulares citadas en **Khomskis & Filatova (1972)**. Los valores similares entre D_{50} y D_{10} implican además que el volumen de agua se reparte equitativamente en la columna de agua. El valor hallado para D_v (1.05) es ligeramente mayor que el valor de referencia (1.0) por lo que puede concluirse que la cubeta lacustre de la represa La Fe presenta realmente forma de V, ligeramente convexa (SCx), en la cual se ubican la mayoría de los lagos, y denominada micro por presentar varios puntos leves de inflexión (Fig. 2). En este tipo de forma la región litoral cobra importancia, pues ocupará una extensión considerable del ecosistema acuático. En concordancia con lo predicho, el embalse La Fe está rodeado por un denso cinturón de la macrófita *Egeria densa*, la cual se ha intentado infructuosamente erradicar de varias maneras (**Salazar & Díez de Arango 1987**).

El efecto de los aportes de materiales alóctonos disueltos y particulados deducidos a partir del valor de F se atenúa por la alta asimilación de nutrientes en la zona litoral debido a su acción filtrante del material disuelto, lo que disminuye la eutrofia potencial (**Sperling 1994**). Además, las macrófitas presentes actúan también como una barrera para el material alóctono particulado, disminuyendo la colmatación del embalse e incrementando su vida útil.

E. densa es una macrófita enraizada sumergida. Teóricamente, las plantas de este grupo pueden crecer hasta 11 m de profundidad, dependiendo de la disponibilidad de luz y la mayoría tienen sus órganos reproductivos flotando en la superficie. Al igual que las demás macrófitas presenta gran capacidad de adaptación y amplitud ecológica,

puediendo llegar a colonizar diferentes tipos de ambientes y a soportar largos periodos de sequía. Esta última condición hace que fracasen los intentos de combatir esta macrófita disminuyendo el nivel del embalse.

En las especies sumergidas de hojas flotantes y emergentes comúnmente se observan cambios estacionales de dominancia y de composición, pero también aparece una clara tendencia a la formación de extensas poblaciones monoespecíficas en las que se alcanza un crecimiento óptimo si existe mucha luz y temperatura y niveles adecuados de agua (**Wetzel 1981**). Este es el caso de *E. densa* en el embalse La Fe.

Las regiones litorales con amplio desarrollo de macrófitas influyen en el metabolismo del ecosistema de varias maneras (**Esteves 1998**):

- Reduciendo la turbulencia, produciendo el denominado efecto de filtro que sedimenta gran parte del material alóctono;
- Las del tipo enraizado producen el llamado efecto de «bombeamiento», que incide notablemente en la circulación de nutrientes debido a la absorción de los mismos desde las partes profundas del sedimento, donde no están disponibles para otras plantas. Posteriormente, éstos serán liberados para la columna de agua por excreción o al descomponerse la biomasa.

Esto hace que no exista una relación directa entre los valores de biomasa de macrófitas y el estado trófico, pues estos macrófitos enraizados tienen en el sedimento una fuente casi inagotable de nutrientes, lo que facilita su crecimiento sin depender de la concentración de los mismos en el agua (**Esteves 1998**).

La productividad de las macrófitas del tipo *E. densa* en sistemas con alta penetración de luz (como La Fe) es considerable, ya que además de la disponibilidad lumínica, pueden suplir sus necesidades nutricionales a partir del sedimento, que aún en lagos oligotróficos posee mayor concentración de los mismos que la columna de agua. Teóricamente, cuanto más eutroficado el ecosistema, menores serán los valores de biomasa de las macrófitas acuáticas. Esto ocurre porque en estas condiciones se favorece mayormente el crecimiento de densas poblaciones algales que reducirían la penetración de luz y podrían impedir el crecimiento de las macrófitas enraizadas en el sedimento (**Esteves 1998**). En la represa La Fe los «blooms» de *B. braunii* registrados durante todo el periodo de muestreo no cumplen esta función, pues no disminuyen la penetración de luz, como será explicado posteriormente.

La profundidad relativa (D_r) de un sistema lacustre está relacionada con las condiciones de estabilidad y estratificación del cuerpo de agua, con la transparencia y con el nivel de productividad. En general, los lagos con área superficial grande y poca profundidad presentan valores de D_r menores del 1% mientras que lagos y embalses pequeños y profundos tienen valores altos de D_r . El valor encontrado para este parámetro en la represa La Fe fue de 2,07% (Tabla 1), el cual no corrobora lo predicho por Villamizar (1984) en cuanto a que este embalse sería desestratificado. En la Tabla 2 se presentan valores de D_r de algunos embalses. Con base en ellos, se calculó que el sistema acuático se localiza 1,06 unidades por encima de la media, siendo por tanto uno de los mayores valores registrados en esta Tabla.

En teoría, los sistemas acuáticos con D_r alto están menos expuestos a las influencias del viento y presentarán valores altos de profundidad Secchi (Sperling 1994), lo cual concuerda con lo hallado ya que la transparencia (media = 4,25 m, CV = 18,4%) y la profundidad de la zona fótica (11,42 m, CV = 19,2%) mostraron valores medios altos y poco variables. El valor registrado para la zona iluminada corresponde al 41% de la profundidad total. Ésta es también la zona de producción de oxígeno, por lo que se espera que la productividad del sistema sea alta, siempre y cuando, además del clima lumínico apropiado, exista una oferta alta de nutrientes. Dicha oferta está garantizada por los aportes de los afluentes a la represa, el bombeo del río Pantanillo y la descomposición periódica de *E. densa*.

Como ya se mencionó en la descripción del área, las aguas del río Pantanillo aunque previamente tratadas, aportan al embalse altas concentraciones de diferentes formas de nitrógeno y fósforo solubles que no son retenidas por el tratamiento secundario efectuado en la planta del Retiro.

La descomposición de la biomasa proveniente de la muerte de *E. densa* permite la liberación de la mayor parte de los nutrientes retenidos y ejerce un alto consumo de oxígeno. En ecosistemas lacustres tropicales este proceso es continuo y ocurre durante casi todo el año pues las condiciones climáticas, especialmente la temperatura, son favorables y el nacimiento, crecimiento y muerte de individuos ocurre en un proceso continuo durante todo el año (Esteves 1998, Wetzel 1981). Los detritus particulados originados almacenan grandes cantidades de nutrientes orgánicos e inorgánicos que son liberados al medio a través de procesos de solubilización y descomposición por bacterias y otros organismos detritívoros (Wetzel et al. 1972).

La relativa constancia en el valor de la profundidad Secchi (CV= 118,4%), a pesar de que durante todo el tiempo de muestreo se presentó un bloom del alga verde *Botryococcus braunii*, demuestra: 1) que partículas grandes no inciden en la turbidez ni en la profundidad Secchi, como sería de esperar, y 2) que en el presente caso la absorción de la luz y no la dispersión por las partículas algales, representaría la mayoría de la atenuación lumínica.

Según Edmonson (1980) al comparar dos poblaciones fitoplanctónicas en dos lagos diferentes, con igual contenido de clorofila, suspendidas bajo 1 m² de agua, esféricas, pero una con un radio de 0,5 mm, y la otra con un radio de 5 mm, ambas absorberán luz de manera diferente, ya que se requerirán 1.000 células pequeñas (de 0,5 mm) para igualar el volumen de una sola de las células mayores. Por ser la transparencia sensible al número de partículas que absorben y dispersan la luz, la primera población produciría una disminución más notable en la profundidad Secchi. En el Lago Washington, cuando la clorofila era alta, Edmonson (1980) encontró altos valores de transparencia. Esto ocurría porque el fitoplancton era dominado por colonias grandes, con altos contenidos de clorofila, pero poca dispersión de la luz (que sería lo que harían muchas células pequeñas). Lo narrado describe lo ocurrido en la represa La Fe.

El valor de D_r hallado en la represa La Fe permite predecir también que el sistema tiene tendencia a presentar estratificación y estabilidad fuertes, es decir, alta resistencia a la acción del viento. Ésta se presentó en todos los perfiles térmicos realizados en esta investigación y serán discutidos en una publicación posterior.

La salida periódica de agua hacia la planta de tratamiento de La Ayurá a través de las dos primeras compuertas de la torre de captación y el hecho de que durante el tiempo de muestreo el embalse no haya rebosado, lo convierten en un exportador de calor y un acumulador de nutrientes. Este fenómeno incide en el patrón de estratificación del lago, pues el metalimnión asciende hacia la superficie presentándose una zona de mezcla de poco espesor. La estratificación desarrollada permitirá entonces el acumulo de nutrientes en el fondo del embalse y acrecentará la anoxia por la demanda de oxígeno para descomponer los detritos y otros materiales sedimentados. Lo anterior fue lo evidenciado en los perfiles térmicos efectuados.

Con referencia al estado trófico del embalse, el coeficiente de atenuación lumínica (0,39 m⁻¹), presentó un valor correspondiente al de un lago oligomesotrófico, muy alejado del valor citado por Howard-Williams & Vincent (1984) para un lago turbio ($k = 6,70$ a $10,0$ m⁻¹).

La profundidad crítica del lago se sitúa aproximadamente a los 5,0 m y coincide con la profundidad del tercer cuartil. Ella conforma según **Barbanti** (1985), el área dominada por la erosión y el transporte, la cual constituye una pequeña porción del embalse (25,06%). El área de acumulación ocupa un alto porcentaje (74,9%), como es evidenciado por el valor del factor de forma ($Dv^{-1} = 0,95$, Tabla 1) y por la forma regular de la curva hipsográfica. Dado que el factor de inclinación ($S = 1,00$, Tabla 1) y el porcentaje de la pendiente media del lago (%MS = 4,15%, Tabla 1) son menores del 5%, se espera que los depósitos finos erodados por el movimiento del agua en las orillas, ruedan rápidamente hacia el área de acumulación (**Barbanti** 1985).

La morfología del lago es una fuente importante en la determinación de la dinámica de la mezcla, pues la morfometría y la situación del sitio de muestreo facilitan o dificultan la acción del viento y, consecuentemente, su pista y distancia de acción, es decir, del fetch. Este parámetro, según **Håkanson** (1981), proporciona una medida más representativa de cómo el viento gobierna la longitud y altura de las olas, ya que varias direcciones del viento son tomadas en cuenta. Para **Hutchinson** (1957) el fetch del viento es el que proporciona la energía para el transporte turbulento. En la represa La Fe el valor de L , fue de $5,9 \times 10^3$ km, un valor bastante bajo cuando comparado con el de por ejemplo el lago Vänern que es de 33 km. Nótese en la Fig. 1 que la estación de muestreo se sitúa en un área donde la influencia del viento, ya de por sí pequeña, y aunque su dirección haya sido la mayoría de las veces en el sentido del eje longitudinal, queda confinada a la misma. Esto, aunado a su valor pequeño y a su poca variación (CV = 19,7 %), permite concluir que su acción en la generación de turbulencia es despreciable. Esto permitiría la formación de estratificaciones estables en el sitio de muestreo, lo cual concuerda con lo ya mencionado para la profundidad relativa (Dr).

A nivel general se concluye que muchas de las derivaciones teóricas planteadas se cumplen en el embalse La Fe. Sin embargo, ya que a partir de las predicciones fundamentadas en los estudios morfométricos se pueden plantear nuevos problemas, generar nuevas hipótesis y corroborar otras antiguas, se enuncian a continuación algunas preguntas que se constituyen en problemas a ser resueltos en futuros trabajos.

1) Si el embalse La Fe es realmente estratificado, ¿cuánto tiempo dura la estabilidad térmica? 2) ¿Es realmente conveniente retirar la macrofita acuática *E. densa* del embalse? 3) ¿Cómo es la productividad del embalse? 4) ¿Cómo influye en el estado trófico del embalse la entrada por bombeo del agua previamente tratada de los ríos

Pantanillo y Buey? 5) ¿Qué relación tiene la anterior condición con la ocurrencia periódica de blooms de distintas poblaciones algales? 6) ¿Cuál es el factor limitante en la represa? 7) ¿Cuál es el aporte de la zona litoral a la productividad del embalse? 8) ¿Cuál es la tasa de sedimentación en el embalse y qué proporción de dicho proceso es retenido por la macrofita? 9) ¿Cuál es el aporte de nutrientes al embalse por la descomposición de la macrofita? 10) ¿Cuál es la DBO ejercida por este proceso? 11) ¿Cuál es la tasa de descomposición de la macrofita?

Agradecimientos

Los autores agradecen a las Empresas Públicas de Medellín por facilitar el ingreso a la represa, el uso de sus instalaciones, equipos y material cartográfico necesario; el apoyo logístico del Departamento de Biología de la Universidad de Antioquia al permitir el uso de los equipos del laboratorio de Limnología Alexander Von Humboldt; a Ana Lucía Estrada, Álvaro Wills, Omayra Sierra, Alexandra Arango y Doralba Hernández por su interesada ayuda.

Bibliografía

- Abuchaibe, H., J. Agudelo & C. Sañudo.** 1988. Descripción general de las instalaciones del acueducto metropolitano, Revista Empresas Públicas de Medellín 10: 35-97.
- Barbanti, L.** 1985. Some problems and new prospects on Physical Limnology. *Limnology: a review*. Memorias Istituto Italiano de Idrobiologia 43: 1-32.
- Beach erosion board.** 1972. Waves in inland reservoirs. Technical Memoir 132, Beach Erosion Corps of Engineers, Washington, D.C. pp. 27-30 en: Håkanson, L. 1981. *A manual on lake morphometry*. Springer Verlag, Berlin.
- Cole, G. A.** 1983. *Textbook of Limnology*. 3rd ed. The Mosby Co., Saint Louis.
- Córdoba, G. J. & A. Villegas.** 1966. Estudio preliminar y manejo de la cuenca de captación del embalse La Fe. Revista Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", Bogotá.
- Donato, J. C.** 1991. Los sistemas acuáticos de Colombia: síntesis y revisión. Cuadernos Divulgativos 4: 1-8.
- Edmonson, W. T.** 1980. Secchi disk and chlorophyll. *Limnology and Oceanography* 25: 378-379.
- Esteves, F.** 1998. *Fundamentos de Limnología*. 2^a ed. Editora Interciencia. Pinep, Río de Janeiro.
- Gorham, E.** 1958. The physical limnology of Northern Britain: an epitome of the bathymetrical survey of the Scottish freshwater lochs, 1987-1909. *Limnology and Oceanography* 3: 40-50.
- Hayes, F. R.** 1957. On the variation in bottom fauna and fish yield in relation to trophic level and lake dimensions. *Journal of Fisheries Research Board Canada* 14: 1-32.

- Howard-williams, C. & W. I. Vincent.** 1984. Optical properties of New Zealand Lakes. I. Attenuation, scattering, and a comparison between downwelling and scalar irradiances. *Archiv für Hydrobiologie* 99: 318-330.
- Hutchinson, G. E.** 1957. *A treatise on Limnology. I. Geography, physics and chemistry.* Wiley, Nueva York.
- Khomkis, W.R & T. N. Filatova.** 1972. Principles of typology of stratified lakes in relation to vertical exchange. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Limnologie* 18: 528 - 536.
- Koshinky, G. D.** 1970. The morphometry of shield lakes in Saskatchewan. *Limnology and Oceanography* 15: 695-701.
- Neumann, J.** 1959. Maximum depth and average depth of lakes. *Journal of Fisheries Research Board of Canada* 16: 923-927.
- Salazar, A. & R. Díez de Arango.** 1987. Control de plantas acuáticas en el embalse La Fe. *Revista Ainsa (Medellín)* 2: 7-31.
- Sperling, E.** 1994. Morphometric features of some lakes and reservoirs in the State of Minas Gerais. pp. 71-76 en: Pinto-Coelho, R., A. Giani & E. Sperling (eds.). *Ecology and human impacts on lakes and reservoirs in Minas Gerais with special reference to future developments and management strategies.* Segrac, Belo Horizonte.
- Villamizar, D.** 1984. Algunas consideraciones sobre los riesgos de proliferación de plantas acuáticas en embalses. *Revista Ainsa (Medellín)* 2: 23-29.
- Weinberg, E.** 1976. Submarine daylight and ecology. *Marine Biology* 37: 291-304
- Wetzel, R. G.** 1981. *Limnología.* Edic. Omega S.A, Barcelona.
- Wetzel, R. G.; P. H. Rich; M. C. Miller & H. L. Allen.** 1972. Metabolism of dissolved and particulate detrital carbon in temperate hard-water. *Memorias Istituto Italiano de Idrobiologia* 29: 185-243.