

Ciclo anual de estratificación y circulación en el Embalse Arenal, Costa Rica

Gerardo Umaña Villalobos^{1, 2}

- 1 Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), Universidad de Costa Rica, 2060 San José, Costa Rica; gumana@biologia.ucr.ac.cr
- 2 Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica, 2060 San José, Costa Rica

Recibido 24-II-2005. Corregido 30-VIII-2005. Aceptado 30-III-2006.

Abstract: Yearly cycle of stratification and circulation at the Arenal Reservoir, Costa Rica. The behavior of the water column of Arenal Reservoir, a tropical reservoir in Costa Rica, is analyzed based on temperature and dissolved oxygen data gathered on a monthly to bimonthly basis between 1986 and 1992. The depth profiles of temperature at Arenal Reservoir show the typical asymmetry of reservoirs, with a greater stratification in its deeper part near the dam, even though the main outflow is located at its head at the northwest end instead of the dam. A comparison of sampling stations at both ends show a deeper circulation pattern at the northern end. This coincides with other reports of a tilted structure of the thermal isopleth pattern in front of the water outlet. The dissolved oxygen showed some degree of anoxia at the bottom during part of the year, mainly from May until October. This was caused by the decomposition of the organic matter accumulated at the bottom at the time, mainly as remains of the vegetation from the former lagoon that was not removed before flooding. The stratification is clearly seasonal, occurring during the rainy season (April to October), specially in the deeper zones of the reservoir. Rev. Biol. Trop. 54 (Suppl. 1): 257-263. Epub 2006 Sept. 30.

Key words: tropical limnology, tropical reservoirs, stratification, water temperature, temperature, dissolved oxygen, Costa Rica, Arenal Reservoir, limnology.

Los cuerpos de agua distan mucho de ser homogéneos en toda su extensión, tanto horizontal como vertical. El agua es un mal conductor de calor (Hutchinson 1957, Margalef 1983) y debido a que la fuente principal de energía en los ecosistemas de la tierra es el Sol, solamente logra calentarse directamente con su luz la capa más superficial de cualquier cuerpo de agua con más de 2 m de profundidad. Este calor tiende a acumularse en la zona superior de la columna de agua, difundiéndose poco hacia zonas más profundas, principalmente con ayuda del viento pero sin alcanzar el fondo. Esto trae como consecuencia la formación de capas o estratos separados por diferencias de temperatura.

En zonas tropicales con una marcada estacionalidad climática, que presentan una época fría y ventosa y otra época cálida y de poco viento, los lagos y embalses suelen sufrir un

ciclo estacional de estratificación en los periodos cálidos y calmos, y otro de circulación y homogeneización de la columna de agua en los periodos fríos y ventosos. Este ciclo influye en la distribución, no sólo de la temperatura, sino también de sustancias disueltas en el agua así como partículas en suspensión y organismos planctónicos. Por este motivo es importante conocer el patrón de circulación de un lago para entender su ecología.

En las regiones tropicales puede existir toda una gama de patrones de circulación (Hutchinson & Löffler 1956, Lewis 1983). Desde lagos que no muestran ninguna estratificación y pueden circular todos los días o lagos polimícticos, hasta lagos que circulan completamente una vez al año o en raras ocasiones, permaneciendo estratificados casi constantemente, o lagos oligomícticos. Las diferencias dependen de factores como altitud, clima local, forma de la cubeta

que contiene al lago (morfometría) y topografía de los terrenos aledaños.

En un embalse puede darse también una estratificación térmica. Sin embargo, los embalses poseen características que los diferencian de los lagos. Margalef (1983) resume las principales diferencias entre las que cabe destacar la asimetría longitudinal de un embalse, desde su cabecera a la represa. Esta se debe al alto volumen del flujo de entrada y salida que suele haber en un embalse, y la forma misma del embalse, que suele alcanzar su máxima profundidad no en el centro como en un lago común, sino junto a la represa. Esta asimetría influye en la extensión y localización horizontal de las capas de agua, de modo que la estratificación, cuando ocurre, no es detectable en toda la extensión del embalse, sino solamente en la parte más profunda, cercana a la represa.

Varios estudios han tratado de caracterizar el patrón de circulación del embalse Arenal desde su creación (Vega-Mejía 1980, Horne 1985, Seifert & Beck 1989, SOGREAH 1990). En todos los casos se ha mencionado que el embalse es polimíctico, en respuesta a los fuertes vientos que azotan la zona. Sin embargo, en algunos casos es evidente la heterogeneidad entre los diferentes puntos de medición sin que se haya hecho un análisis del motivo que genera las diferencias.

En el presente trabajo se analiza la variación de la temperatura y del oxígeno disuelto en dos estaciones de muestreo en el Embalse Arenal, E.3 y E.9, localizadas en ambos extremos del embalse (Fig. 1), por espacio de al menos dos años (1986-1992 y 1988-1992 respectivamente). Se analiza también la información de la literatura. Se plantea la hipótesis de que el Embalse Arenal muestra la asimetría típica de un embalse pese a que en este caso la toma de aguas no se localiza en la represa sino cerca de la cabecera del mismo (Fig. 1), y que su patrón de circulación típico es monomíctico, de acuerdo al clima de la región y su altitud.

DESCRIPCION DEL SITIO DE ESTUDIO

El Embalse Arenal se halla entre las provincias de Alajuela y Guanacaste, Costa Rica ($10^{\circ} 26'$ a $10^{\circ} 34'$ N, $84^{\circ} 43'$ a $84^{\circ} 59'$ W). Fue inundado en 1979 para producir energía eléctrica y trasvasar el agua para riego en la zona más seca de Guanacaste. Por su uso presenta fluctuaciones de nivel de más de 10 m de amplitud al año. Al nivel máximo de 545 m s.n.m. presenta una área superficial de 87 km², una profundidad máxima de 55 m y media de 25.6 m. Dada su extensión tiene un valor bajo de profundidad relativa, de 0.52, lo que le da un carácter de poco profundo (Hutchinson 1957). Tiene una longitud de litoral de 170.6 km, para un desarrollo de orilla de 5.28, bastante alto debido a lo irregular de la orilla. Tiene 29 km de longitud total y un *fetch* máximo de 6 km.

METODOLOGÍA

Entre 1986 y 1993 se recabaron datos de temperatura y oxígeno disuelto en la columna de agua del embalse como parte de proyectos de investigación del CIMAR, Universidad de Costa Rica. Durante este tiempo se visitaron periódicamente dos sitios de muestreo que se muestran en el Figura 1. Las estaciones visitadas

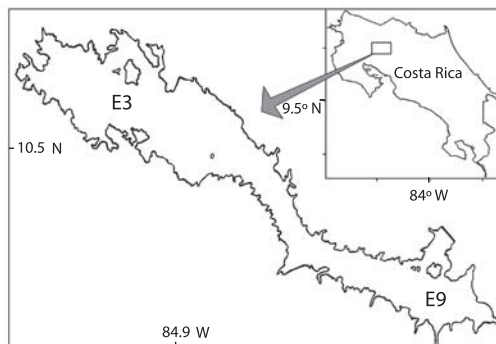


Fig. 1. Mapa del embalse Arenal mostrando ubicación de las estaciones de muestreo. A-E estaciones de SOGREAH 1990. 3 y 9 estaciones visitadas en este estudio, Costa Rica.

se denominan E.3 y E.9. La estación E.3 ubicada en el extremo noroccidental a medio lago, frente a la toma de agua, se visitó mensualmente del 12 de abril de 1989 al 13 de julio de 1993. La estación E.9, ubicada en el extremo suroriental del embalse, frente al Volcán Arenal, se visitó mensualmente del 5 de agosto de 1986 al 8 de noviembre de 1988, siempre en horas alrededor del medio día. En cada visita se tomaron mediciones de la temperatura y del oxígeno disuelto con un medidor YSI, modelo 57. Se tomaron medidas cada metro hasta los 10 m y luego cada 5 m hasta el fondo. Las mediciones se hicieron siempre alrededor del mediodía.

RESULTADOS

La distribución vertical de la temperatura indica que el embalse se haya casi homeotermo gran parte del año (Fig. 2). El extremo suroriental (Estación 9) se estratifica más pronunciadamente que el extremo noroccidental (Estación 3). La diferencia de temperatura puede alcanzar hasta 3.0 °C o más en días cálidos en el extremo suroriental. En el otro extremo la diferencia de

temperatura entre la superficie y el fondo apenas llega a 1.8 °C. Esta estratificación permanece generalmente entre abril y agosto, aunque se empieza a degradar mucho antes.

Tanto las aguas superficiales, como cerca del fondo muestran una oscilación de la temperatura, de modo que no existe una temperatura mínima del hipolimnion como suele suceder en lagos de zonas templadas. Sin embargo, a 20 m la fluctuación osciló entre 22 y 25.5°C, sin alcanzar los valores altos que se alcanzan en la superficie, entre 22 y 28.5°C (Fig. 3). La comparación de la variancia de la temperatura a ambas profundidades revela que la diferencia en la variación es significativa: $s^2=2.32$ a 0 m y $s^2=0.95$ a 20 m ($F_{75,73}=2.34$, $\alpha<0.01$). La comparación de la temperatura promedio a ambas profundidades mediante una *t* de Student pareada también indica que hay diferencias significativas ($t_{70}=6.83$, $\alpha<0.01$). El oxígeno también da claras evidencias de un período de estratificación más fuerte en los meses más cálidos y menos ventosos del año (Fig. 4).

Se hicieron cálculos del Número de Wedderburn ($W = g \cdot h^2 / u_*^2 \cdot L$) el cual mide la razón entre las fuerzas de presión baroclínicas

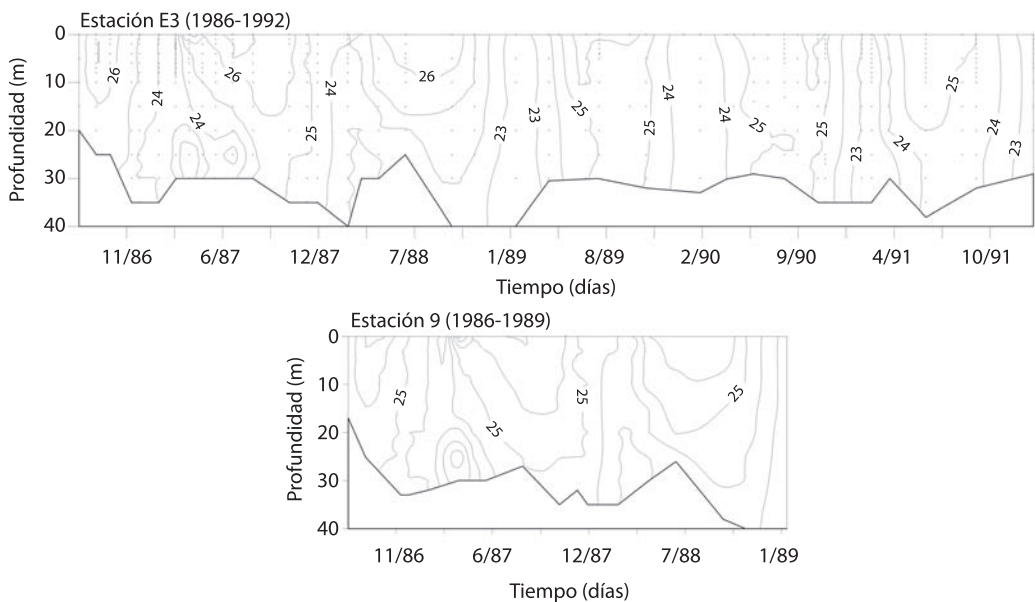


Fig. 2. Variación de la temperatura en la columna de agua de dos estaciones en el Embalse Arenal. A. E.3, frente a la toma. B. E.9, cerca del volcán. La variación del nivel se muestra como oscilación del fondo.

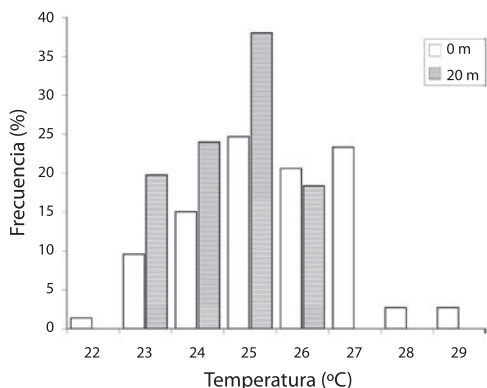


Fig. 3. Distribución de frecuencias de las temperaturas a 0 y 20 m de profundidad para las estaciones E.3 y E.9 del Embalse Arenal durante el periodo estudiado.

en el punto de la surgencia de aguas profundas, y las fuerzas impuestas por el arrastre del viento sobre la superficie (Imberger & Patterson 1990). El cálculo se hizo para ambas estaciones, tomando el fetch máximo (L) en cada estación (6 km en la E.3 y 4.6 km en la E.9), los datos de viento promedio mensual para las estaciones Tejona para la E.3 y Sangregado para la E.9 con base en la información de Laporte et al. (1976) para el cálculo de la velocidad del agua por fricción debido a la fuerza del viento (u_*). Además se consideró la profundidad del epilimnion (h) en cada caso de acuerdo al perfil de cada fecha, como el punto más profundo en el que se alcanzaba el cambio máximo en temperatura superior a $0.1^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$, de acuerdo a la definición de Kalff (2002, p. 161). Y la gravedad corregida (g') considerando que la densidad del agua depende solamente de la temperatura. Se utiliza este parámetro como un indicador de la posibilidad de que el lago circule bajo la influencia de los vientos predominantes en la zona (Lamont et al. 2005), un valor de $W < 1$ indica una columna que se mezclará fácilmente con los vientos presentes en la zona, provocando una surgencia de aguas profundas a barlovento, lo que es una indicación de falta o debilidad de la estratificación, y viceversa (Fig. 5). Se puede ver que hay una fluctuación estacional del valor de W, alcanzando valores máximos al final de la época seca (marzo a mayo), correspondiendo a la época de mayor temperatura del agua, para luego

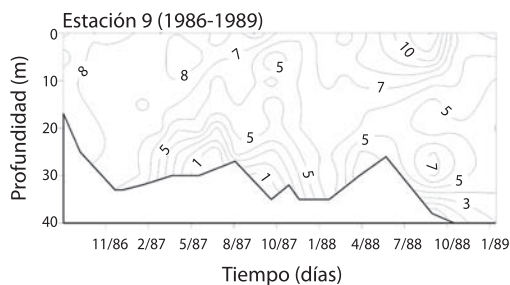


Fig. 4. Variación del oxígeno disuelto en la columna de agua en la E.9, cerca del volcán. La variación del nivel se muestra como oscilación del fondo.

bajar incluso hasta cero cuando la columna está homeoterma. Los valores en el E.9 fueron más altos que para la E.3 para la misma época, indicando que la estratificación es más fuerte en el extremo sur oriental del embalse.

DISCUSIÓN

La variación de la temperatura y oxígeno disuelto en las dos estaciones de muestreo a lo largo del año indican que hay un cambio estacional en la estratificación del embalse, con un periodo de circulación profunda en los meses secos y otro de estratificación más o menos pronunciada en los meses lluviosos, no tanto por la influencia de las precipitaciones sino por la coincidencia de los mayores vientos con la época seca (Herrera 1985), los cuales han sido señalados como el factor más importante en determinar la época de circulación profunda en los lagos tropicales (Lewis 1996).

La variación de la temperatura en aguas superficiales y profundas indican que aunque hay un periodo en el cual el calor logra distribuirse hacia las capas profundas del embalse y las aguas profundas se calientan hasta 25 o 26°C ; por encima de este punto la entrada de calor al lago supera la capacidad del viento y otras fuerzas generadoras de turbulencia de distribuir el exceso de calor acumulado en la superficie, estableciéndose entonces la estratificación térmica observada.

El bajo valor de la profundidad relativa del embalse Arenal ($Z_r = 0.52$) ocasiona que los vientos que logran viajar varios kilómetros sobre la superficie del agua durante la mayor parte del

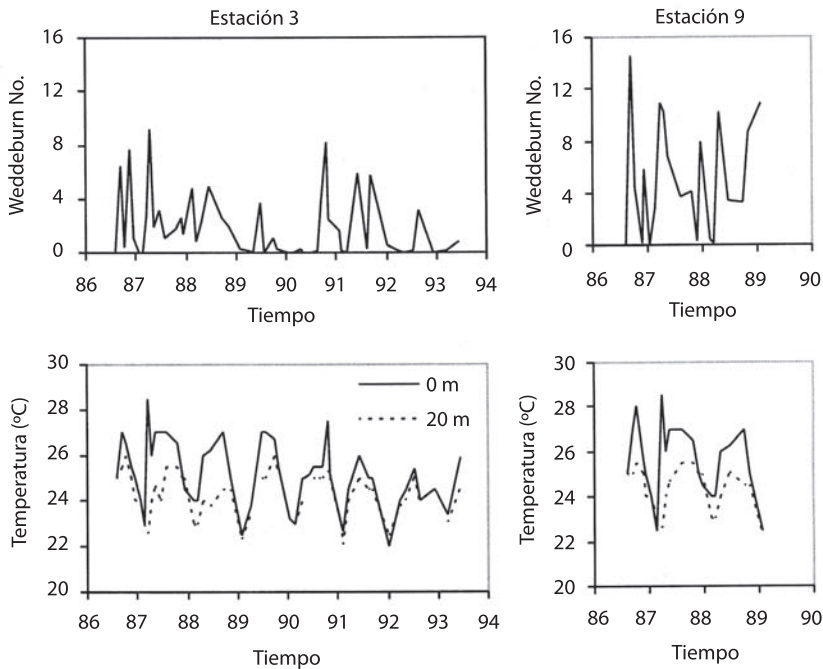


Fig. 5. Variación en el tiempo del número de Wedderburn (W) y de la temperatura a 0 m y 20 m, en diferentes fechas en las estaciones E.3 y E.9 del Embalse Arenal.

año (Fernández *et al* 1986), provoca una fuerte turbulencia que involucra fácilmente toda la columna de agua. Esto impide el establecimiento de una fuerte estratificación en el mismo.

A este efecto de la turbulencia generada por los vientos se suma el hecho señalado en el informe de la firma SOGREAH. Ellos anotan que la posición de la toma de aguas, en la cuota 512 ejerce una extracción selectiva de las aguas profundas y frías hundiendo la termoclina. Esto hace que la estratificación en el extremo noroeste sea menos marcada, lo que hace difícil hablar de una estratificación en esta zona. No obstante no se puede descartar otro efecto que puede causar un efecto similar, cual es la acumulación de agua en el extremo a sotavento por efecto del arrastre causado por el viento, como ha sido descrito en la formación de oscilaciones tipo seiches en los lagos (Kalf 2002). Sin embargo en el caso del Embalse Arenal, la dirección prevaleciente de los vientos es del noreste (vientos alisios), los cuales cruzan el embalse en dirección aproximadamente

perpendicular al eje longitudinal del embalse, por lo que no podrían ocasionar el hundimiento de la termoclina observado.

La mayor estratificación de la zona sureste ha sido descrita por diversos autores (Vega Mejía 1980, Horne 1985, Seifert & Beck 1989). Esta puede verse favorecida por la entrada de aguas más frías de los tributarios que se ubican en esta zona. Estos tributarios drenan en general un área mayor y tienen un mayor caudal (ICE 1992). Paaby (1995) ha planteado la hipótesis que las aguas que aportan los tributarios, localizados principalmente en la mitad suroriental pueden estar fluyendo aún en la zona profunda, hacia el área de la represa (dirección sur este). Esto debido a que por su menor temperatura respecto a las aguas superficiales del embalse, son de mayor densidad y se hunden en el embalse. Esto explicaría la presencia de aguas más frías en la zona más profunda del embalse cercana a la presa Sangregado casi durante todo el año. Paaby (1995) también propone la división del embalse

en dos regiones de comportamiento diferente, idea que se refuerza con la información presentada en este trabajo. Se han observado diferencias similares entre sitios a lo largo de otros lagos tropicales alargados, como por ejemplo en el lago Tanganyika (Plisnier et al. 1999). Si el flujo de agua ocurre de esta manera, la acumulación de aguas frías en el extremo sureste provoca un aumento del volumen del hipolimnion en este extremo en contraposición con el extremo noroeste, donde la entrada de aguas por afluentes es menor, ayudando a provocar la inclinación ya descrita.

Los embalses típicamente presentan este doble gradiente, vertical y longitudinal (Margalef 1983, Thornton et al. 1990). El embalse Arenal se comporta en la forma esperable. La novedad que presenta se debe a la ubicación de la toma de aguas, cercana a la cabecera superior del embalse, provocando el hundimiento mencionado de la termoclina en la cabecera.

La distribución vertical y estacional del oxígeno disuelto presenta una variante interesante al esquema antes propuesto. Aunque en los muestreos de 1986 a 1989 en la Estación 9 se aprecia una época en la que el fondo llega a estar anóxico, en el estudio de la firma SOGREAH (1990) se muestra también una zona anóxica profunda en gran parte del embalse hacia el mes de junio. La zona noroeste llegó a presentar anoxia en el fondo, a pesar de su menor tendencia a estratificarse, como se mencionó antes. Este comportamiento del oxígeno se explica por la acumulación de materia orgánica en el fondo, principalmente de la vegetación que quedó inundada al crearse la represa.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue posible gracias al financiamiento de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, proyectos 808-86-041 y 808-89-416, y del CONICIT, proyecto No. 89-325-BID. También fue indispensable la ayuda de muchos estudiantes de la Escuela de Biología que durante esos años

aguantaron aguaceros, viento y oleaje fuerte o sol calcinante en el Embalse Arenal para recabar la información de campo; a todos ellos mi agradecimiento.

RESUMEN

Se analiza el comportamiento de la columna de agua del embalse Arenal, un embalse tropical en Costa Rica, con base en datos de temperatura y oxígeno disuelto recolectados mensualmente o bimensualmente entre 1986 y 1992. El embalse Arenal muestra la asimetría típica de los embalses, con una mayor estratificación en su zona más profunda cerca de la represa. Esto pese a que el flujo de salida del agua se halla localizado atípicamente en la cabecera, cerca del extremo noroccidental y no en la represa. La comparación de dos estaciones de muestreo ubicadas a ambos extremos del embalse, muestra una circulación más profunda en la zona noroccidental. Esto coincide con reportes anteriores de una inclinación de las isotermales frente a la toma de aguas. El oxígeno disuelto muestra un cierto grado de anoxia en el fondo durante parte del año, principalmente entre mayo y octubre. Esto se debe a la descomposición de la materia orgánica presente en el fondo en esa época, principalmente como restos de la vegetación de la antigua laguna que no se removió previo a la inundación del embalse. Hay una evidente estacionalidad en la estratificación, que ocurre durante la época lluviosa (de abril a octubre), sobre todo en las zonas más profundas del embalse.

Palabras clave: embalses tropicales, estratificación, temperatura, oxígeno disuelto, Costa Rica, Embalse Arenal, limnología.

REFERENCIAS

- Fernández, W., R.E. Chacón & J.W. Melgarejo. 1986. Modifications of air flow due to the formation of a reservoir. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 25: 982-988.
- Herrera, W. 1985. Clima de Costa Rica. Vol. II, 118 p. *In* L.D. Gómez (ed.). *Vegetación y Clima de Costa Rica*. EUNED, San José, Costa Rica.
- Horne, A.J. 1985. Preliminar limnological investigation, origin and causes of the emergence of 'gamalote' and recommendations for future studies. Instituto Costarricense de Electricidad, San José, Costa Rica. 46 p.
- Hutchinson, G.E. 1957. *A treatise on Limnology*. Vol. II. Wiley, Nueva York, Nueva York, EEUU. 1015 p.
- Hutchinson, G.E. & H. Löffler. 1956. The thermal classification of lakes. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 42: 84-86.

- ICE. 1992. Boletín Hidrológico, No. 19. Oficina de Hidrología-ICE, San José, Costa Rica. 214 p.
- Imberger, J. & J.C. Patterson. 1990. Physical limnology. *Adv. Appl. Mech.* 27: 303-475.
- Kalff, J. 2002. *Limnology: inland water ecosystems*. Prentice-Hall, Nueva Jersey, EEUU. 592 p.
- Lamont, G., B. Laval, R. Pawlowicz, R. Pieters & G.A. Lawrence. 2004. Physical mechanisms leading to upwelling of anoxic bottom water in Nitinat Lake, 8 p. *In* 17th ASCE Engineering Mechanisms Conference, June 13-16, 2004. University of Delaware, Newark, Delaware, EEUU.
- Lewis, W.M., Jr. 1983. A revised classification of lakes based on mixing. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 1779-1787.
- Lewis, W.M., Jr. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference, p. 43-64. *In* F. Schiemer & K.T. Boland (eds.). *Perspectives in tropical limnology*. SPB, La Haya, Holanda.
- Margalef, R. 1983. *Limnología*. Omega, Barcelona, España. 1010 p.
- Paaby, P. 1995. Características físico-químicas de las aguas de los afluentes del Embalse Arenal, Costa Rica y su relación con el plancton. *Rev. Biol. Trop.* 43: 139-149.
- Plisnier, P.D., D. Chitamwebwa, L. Mwape, K. Tshibangu, V. Langenberg & E. Coenen. 1999. Limnological annual cycle inferred from physical-chemical fluctuations at three stations of Lake Tanganyika. *Hydrobiol.* 407: 45-58.
- Seifert, K. & R. Beck. 1989. Potencial pesquero del Embalse Arenal. Informe Final. Proyecto MAG-GTZ, "Fomento de la Acuicultura", San José, Costa Rica.
- SOGREAH Ingenieurs Conseils. 1990. Estudio limnológico del Embalse Arenal. Informe Final Comprensivo. SOGREAH-ICE, San José, Costa Rica (mimeografiado). 216 p.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel & F.E. Payne. 1990. *Reservoir limnology: Ecological perspectives*. Wiley, Nueva York, Nueva York, EEUU. 245 p.
- Vega-Mejía, A. 1980. Estudio de limnología, Embalse Arenal, p. 267-297. *In* J. Tosi Olin (ed.). *Estudio ecológico integral de las zonas de afectación del proyecto Arenal*. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.

