

Limnología de un Lago Tropical de Alta Montaña, en Ecuador: Características de los sedimentos y tasa de sedimentación

Günter Gunkel

Universidad Técnica de Berlin, Alemania, Departamento de Manejo de la Calidad de Agua, Strasse des 17. Juni 135; Sekr. KF 4; 10623 Berlin, Alemania; gunkel@itu206.ut-berlin.de

Recibido 24-VI-2001. Corregido 21-I-2002. Aceptado 11-III-2002.

Abstract: Equatorial high mountain lakes are a special type of lake occurring mainly in the South American Andes as well as in Central Africa and Asia. They occur at altitudes of a few thousand meters above sea level and are cold-water lakes ($< 20^{\circ}\text{C}$). Relatively little is known about them. A long-term limnological study was therefore undertaken at Lake San Pablo, Ecuador, to analyze the basic limnological processes of the lake, which has a tendency for eutrophication. Sediment quality of San Pablo Lake is given under consideration of horizontal and vertical distribution using sediment cores. Significance of sediments for eutrophication process of lakes is demonstrated using phosphorus concentration of sediments as well as the phosphorus retention capacity of the sediments by ratio Fe/P. Dating of the sediments is done using ^{137}Cs and ^{210}Pb , but the activity of ^{137}Cs in the sediment was very low nearly at the detection level. Sedimentation rate is determined to be 3.5 mm/year and the sediment cores represent about 110 years. P concentration of the sediments is high (~ 5 g/kg dry substance), and P retention capacity by Fe is insufficient (Fe/P = 4). The sediment quality did not change significantly during the past decades, and the trophic state of San Pablo Lake was already less or more eutrophic 110 years ago. The contamination of the lake sediments by heavy metals is insignificant.

Keywords: Lago San Pablo, sedimentation rate, ^{137}Cs , ^{210}Pb , eutrophication, Ecuador, Andes.

Los lagos tropicales de alta montaña son un caso especial del ecosistema acuático; ellos están ubicados principalmente en Colombia, Ecuador y en el norte del Perú. Hasta el momento poco se conoce sobre estos lagos (Steinitz-Kannan 1983, Lewis 1987, Gunkel 2000). El fenómeno de eutroficación observado requiere del manejo y conservación de estos lagos. La evaluación de la calidad del agua es una tarea importante que solo puede ser realizada con un conocimiento profundo de los procesos limnológicos. Desde hace algunos años se están realizando investigaciones en el Lago San Pablo (Ecuador), ubicado a 2660 msnm. Está disponible alguna información limnológica básica sobre este lago (Gunkel 2000, Casallas y Gunkel 2001). El mapeo y la evaluación de las macrófitas está ya concluido (Kiersch *et*

al. 2001) y se ha comprobado que la limitación de la producción biológica está causada por procesos de mezcla convectiva (Gunkel y Casallas 2001).

Los sedimentos de un lago son parte del ecosistema acuático; por lo tanto las interacciones entre el sedimento y la columna de agua tienen un alto significado (Psenner y Gunatillaka 1988, Sas 1989, Hupfer 1995, Gonsiorczyk *et al.* 1997). Los sedimentos actúan como depósito y fuente de nutrientes, por lo tanto sus características físicas y químicas deben ser consideradas dentro de la evaluación del sistema. Estas características, determinadas a lo largo de un perfil vertical, sirven para definir la historia del desarrollo del un lago. De este modo, la dinámica de los cambios ocurridos puede ser registrada y cuantificada. La obtención

de datos puede ser realizada por medio de ^{137}Cs (deposición causada por pruebas atómicas con un registro máximo en 1963 y una vida media de 30.0 años) y ^{210}Pb (deposición natural, 22.3 años de vida media; Smith y Walton 1980, Oldfield y Appleby 1984, Erten *et al.* 1985, Gunten *et al.* 1987, Albrecht 1999).

En el Lago San Pablo se han realizado investigaciones paleolimnológicas (Athens 1997), a partir de núcleos de sedimentos tomados entre 0.85 y 10.70 m de profundidad, correspondientes al período de tiempo entre 200 y 7 000 años calculados desde el presente. No se han realizado estudios de los sedimentos superficiales (0-0.85 m), por lo que los acontecimientos recientes en este lago, correspondientes a los últimos 200 años son desconocidos.

La liberación de fósforo por parte de los sedimentos, causada ya sea bajo condiciones anóxicas (por medio de reacciones químicas de óxido-reducción), por medio de procesos de mezcla (diferencia en los gradientes de concentración), o debidos a la bioturbación y a los burbujeros por la producción de metano (metanogénesis por bacterias), ponen de manifiesto la importancia que tiene la acumulación de este elemento en la eutroficación de los lagos.

En los lagos de la zona templada del hemisferio norte, la correlación entre el estado trófico de un lago y la concentración de fósforo en sus sedimentos está aún bajo discusión (Anónimo 1980, Baigun y Marinone 1995). Por lo tanto, la utilización en zonas tropicales de técnicas de evaluación aplicadas en el hemisferio norte, debe ser considerada con reservas (Roldán 1992).

MATERIALES Y MÉTODOS

Lago San Pablo: El Lago San Pablo es un lago de alta montaña, ubicado en la parte norte de los Andes ecuatorianos, cerca de Otavalo, a 2 660 msnm, y a los $0^{\circ}13' \text{ N}$, $78^{\circ}14' \text{ W}$. El lago tiene una forma casi circular con orillas de pendiente pronunciada, se asemeja a la forma de una piscina con paredes verticales. La superficie del espejo de agua es de 668 ha, la pro-

fundidad máxima es de 35.2 m y la media de 26.0 m (Fig 1). Los aportes de agua provienen principalmente de riachuelos de montaña, y el tiempo de residencia de las aguas en el lago ha sido estimado en 3.2 años.

Desde el punto de vista del estado trófico, el lago se considera eutrófico, con altas cargas de nutrientes aportadas en gran parte por aguas de escorrentía (provenientes de actividades agrícolas) y por aguas residuales domésticas. El intenso desarrollo de macrófitas sumergidas han contribuido al estado trófico actual. El sistema de estratificación del lago ha establecido el carácter monomítico, con un período de completa circulación durante la época de fuertes vientos en los meses de verano (entre Junio y Agosto). Durante el resto del año se presenta una estratificación térmica de baja estabilidad. La distribución de oxígeno sigue las fases de estratificación térmica con valores de 70% de saturación en el hypolimnion durante la mezcla. Durante la etapa de estratificación se presenta una sobresaturación en los estratos superiores y un déficit efectivo de oxígeno en las aguas profundas con condiciones anaerobias.

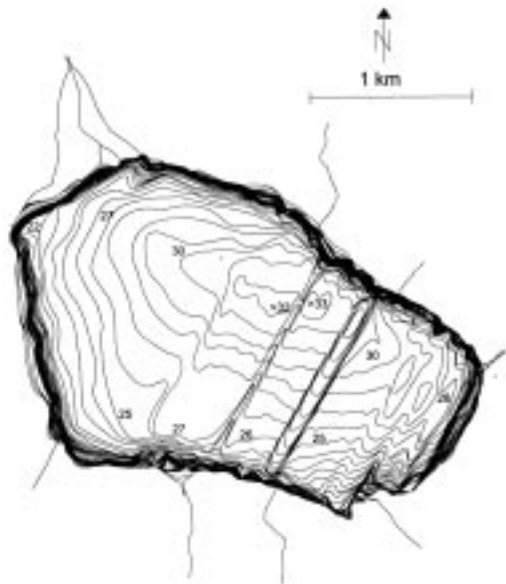


Fig. 1. Morfometría del Lago San Pablo.

Fig. 1. Morphometric data of San Pablo Lake.

Metodología: El muestreo de sedimentos fue realizado en julio y agosto de 1998, con un equipo Ekman-Birge, y un muestreador de núcleos no comercial, compuesto por un tubo de plexiglas acoplado a un tapón de caucho. El muestreador permite extraer secciones de sedimento de aproximadamente 50 cm de longitud no mezcladas, y muestras de agua sobrenadante. A continuación el agua se retira y el sedimento se divide en secciones de 2.5 cm.

Los análisis químicos fueron realizados siguiendo una metodología estándar: pH por electrodo; contenido de agua por secado a 80°C; contenido orgánico por combustión a 550°C; C por análisis de carbono de combustión y análisis de carbon dióxido de carbono; C también por cromatografía de gases (N-C-Analyser 1500, Fisons); P por digestión ácida (H₂O₂ + HNO₃ concentrado, 120°C, 1.3 bar, 1 h) y luego por determinación como azul de molibdeno por medio de inyección de flujo (Flow Injection Analyses, FIAstar Tecator); N por análisis Kjeldahl; Fe, Mn, Ca, Mg, K, Na y metales pesados (Cu, Cd, Pb, Zn) por espectrometría atómica de absorción (Anónimo 1995).

La actividad radioactiva de las muestras se midió con un espectrómetro ORTEC Gamma, utilizando como detector germanio de alta pureza. Para cada caso se utilizaron entre 10 y 20 gramos (peso seco) de muestra. Con ²¹⁰Pb se registró 46,5 KeV, con ¹³⁷Cs se registró 661.6 KeV. Con ayuda de los resultados obtenidos y siguiendo el método propuesto por Smith y Walton 1980, Oldfield y Appleby 1984, Wan *et al.* 1987, se determinó la tasa de sedimentación.

La actividad total de ²¹⁰Pb presente en los sedimentos está representada por dos componentes, ambos originados en el decaimiento del ²²²Rn: primero el ²¹⁰Pb proveniente del decaimiento que tiene lugar en el sedimento, el cual es denotado como ²¹⁰Pb_(supporta) y segundo el ²¹⁰Pb proveniente del decaimiento que ocurre en la atmósfera (llamado ²¹⁰Pb_(unsupporta)) o ²¹⁰Pb_{exceso}, fórmula 1). El valor de ²¹⁰Pb_(supporta) se estima de la por la actividad de ²²⁶Ra. El exceso de la ²¹⁰Pb_(unsupporta) se determina por la

diferencia entre el valor de ²¹⁰Pb total y el ²²⁶Ra presente en los sedimentos

$$^{210}\text{Pb}_{\text{total}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{supporta}} + ^{210}\text{Pb}_{\text{unsupporta}} \quad (1)$$

El valor correspondiente a ²¹⁰Pb_(unsupporta) se utiliza para la determinación de la tasa de sedimentación. El modelo matemático para el cálculo de la tasa de sedimentación es el CFCS simple (flujo constante y sedimentación constante; Oldfield y Appleby 1984, Sanchez-Cabeza *et al.* 2000). La correlación lineal se calculó con base en la función log/lin, usando el programa estadístico SPSS:

$$\log [^{210}\text{Pb}_{\text{unsupporta}}] = a [\text{profundidad (cm)}] + b \quad (2)$$

'a' y 'b' están constantes de la correlación lineal.

RESULTADOS

Caracterización físico-química del sedimento superficial: Los sedimentos del lago San Pablo son de color negro, debido al contenido de sulfidos metálicos y al alto contenido de materia orgánica, características típicas de lagos eutróficos. Una capa superficial de sedimentos óxicos no se encuentra en el lago. Los parámetros químicos más importantes se presentan en el Cuadro 1. El contenido de agua es alto (90.7%) y la capa superficial del sedimento es casi líquida (la claridad del agua sobrenadante indica que no ocurrieron efectos de mezcla durante el muestreo). El contenido orgánico es de 21.1% en peso seco. La concentración media de fósforo es de 4.3 g/kg en peso seco, y es casi homogénea en todo el lago (Fig. 2). La concentración de fósforo en los sedimentos es algo elevada, lo que indica una alta carga en el lago, condición corroborada por los resultados de los análisis químicos de la columna de agua: la cantidad de fósforo total en el agua del hypolimnion varía entre 0.06 a 0.6 mg/l de P (los años 1998/1999); el valor promedio es

CUADRO 1

Datos físicos y químicos de la superficie del sedimento (0 – 5 cm profundidad)
en el Lago San Pablo (16 muestras de todas partes del lago)

TABLE 1

Physical and chemical data of the upper sediment layer (0 – 5 cm)
in San Pablo Lake (16 samples from the whole lake area)

Parámetros	Promedio	Desviación estándar
pH	6.8 *)	5.4 – 7.0 **)
Contenido de agua (%)	90.7	± 3.3
Cateria orgánica (=sólidos volátiles) (% de peso seco)	21.1	± 7.2
Carbón orgánico (% peso seco)	4.0	± 2.4
Carbón inorgánico (% peso seco)	5.2	± 3.8
N (g/kg peso seco)	6.8	± 3.5
P (g/kg peso seco)	4.3	± 0.9
Fe (g/kg peso seco)	25.9	± 5.2
Fe/P-ratio (atómico)	4.0	± 0.7
Mn (g/kg peso seco)	0.7	± 0.2
Ca (g/kg peso seco)	4.7	± 1.1
Mg (g/kg peso seco)	1.8	± 0.2
K (g/kg peso seco)	1.1	± 0.2
Na (g/kg peso seco)	1.4	± 0.4

*) = median del pH, **) = valores extremos de pH

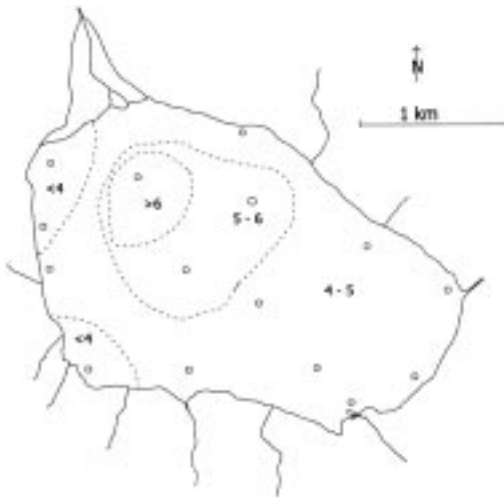


Fig. 2. Concentraciones de fósforo (g/kg P en peso seco) de la superficie (0 – 5 cm) del Lago San Pablo.

Fig. 2. Concentrations of phosphor (g/kg dry substance) at the upper sediment layer (0-5 cm) of San Pablo Lake.

0.24 mg/l P; las concentraciones de fósforo reactivo están en 0.01 – 0.29 mg/l SRP, promedio 0.14 mg/l SRP (Casallas y Gunkel 2001).

Se determinó una baja concentración de hierro en los sedimentos (25.9 g/kg en peso seco), con una relación Fe/P de 4.0 (Cuadro 1). La retención de fósforo requiere de una relación atómica de Fe/P cercana a 10, pero la formación de fosfato hierro es regulada por la concentración de sulfatos y por la farmación de sulfito de hierro (Cooke *et al.* 1993).

Tasa de sedimentación: Para la determinación de la tasa de sedimentación se comparan dos métodos diferentes: los depósitos de ^{137}Cs y los resultados por el efecto de descomposición del ^{210}Pb . La aplicación del método con ^{137}Cs para la obtención de datos no fue positiva, porque a 19 cm de profundidad la actividad registrada con ^{137}Cs fue solamente de 2.3 Bq/kg en peso seco. El valor total de ^{137}Cs registrado (15 Bq/m²) en el Lago San Pablo es

muy bajo, considerando que la precipitación de ^{137}Cs por las pruebas atómicas atmosféricas fue de $5\,500\text{ Bq/m}^2$ año en el hemisferio norte (Wan *et al.* 1987, Albrecht 1999). El cálculo de la tasa de sedimentación con base en los residuos baja de ^{137}Cs , lo que da un valor de aproximadamente 5.3 mm/año .

Las determinaciones por medio de ^{210}Pb dieron mejores resultados. Los valores obtenidos, así como la curva de regresión, se presentan en la Fig. 3:

$$\log {}^{210}\text{Pb} = 0.0388 \text{ profundidad (cm)} + 1.8947$$

con un $r^2 = 0.68$ para $n = 11$

La tasa de sedimentación estimada con el método de ^{210}Pb corresponde a 3.5 mm/año . Este valor incumbe a la estimación con el método del Cesio, que ha dado un valor de 5.3 mm/año . A partir de estos resultados se ha estimado que las formaciones de sedimentos estudiadas comprenden aproximadamente los últimos 110 años de historia del lago.

Caracterización físico-química de los sedimentos en perfiles verticales. Algunas de las características físico-químicas del sedimento, determinadas a lo largo de un perfil vertical de aprox. 40 cm , se presentan en el Cuadro 2. Para cada uno de los parámetros estudiados, se ha correlacionado la concentración (peso seco) con la profundidad y se ha establecido una ecuación de regresión.

En la Fig. 4 se presentan los valores porcentuales correspondientes al peso seco y al contenido de materia orgánica. A 38 cm de profundidad se puede observar el efecto significativo de la compactación de sedimentos antiguos, lo que genera una disminución en el contenido de humedad y, por ende, un incremento en el contenido de materia seca, desde 10% en capas superficiales hasta 32% en capas más profundas. Paralelamente se observa una disminución - desde 24% a 15% - en el contenido de materia orgánica, debida al efecto de mineralización. Más importante es el comportamiento del fósforo, con una concentración media de $P_{\text{medio}} = 4.3\text{ g/kg}$ en peso seco a lo largo del perfil (Fig. 5). A partir de la

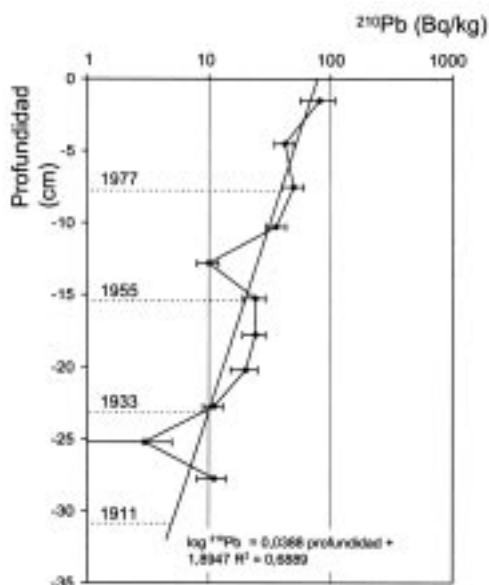


Fig. 3. Concentraciones de ^{210}Pb en el perfil vertical en el Lago San Pablo y cálculo de semivida radioactiva de ^{210}Pb .

Fig. 3. Concentrations of ^{210}Pb in a vertical profile of San Pablo Lake and calculation of the half-life time of ^{210}Pb .

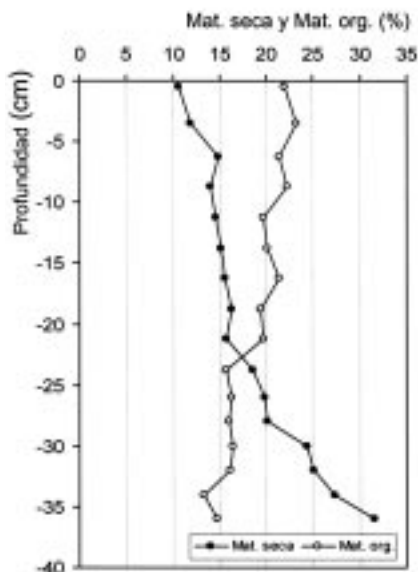


Fig. 4. Contenido de sólidos secos y de materia orgánica (= sólidos volátiles) en el perfil vertical en el Lago San Pablo.

Fig. 4. Content of dry substance and organic material (as volatile solids) in the vertical profile of San Pablo Lake.

CUADRO 2

Distribución vertical de las características de la calidad de los sedimentos del Lago San Pablo de la posición central; están presentados los análisis de regresión lineal de muestras de sedimentos de 0 hasta 38 cm profundidad; la regresión lineal está comparada con la pendiente ($b = 0$), si $b = 0$ solamente el valor medio y es dado ($b \neq 0$)

TABLE 2

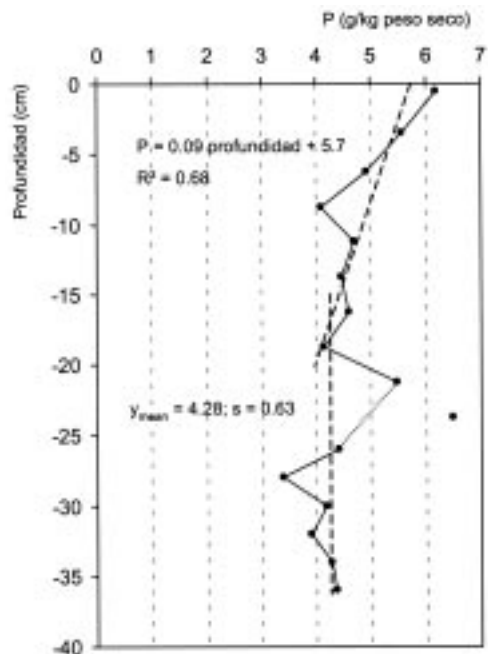
Vertical characteristics of the sediment of San Pablo Lake at the central position, given are the linear regression analyses of the sediment parameters from 0 to 38 cm, the linear regression was compared with the slope = 0, when the slope is zero, a median value of y is given ($b \neq 0$)

Parámetros	Regresión lineal $y = a + b x$	n	significancia	regresión lineal $b \neq 0$
Sólidos secos	$y = 9,10 - 0,483 x$	16	$r^2 = 0.86$	$a < 0.001$
Materia orgánica (=sólidos volátiles)	$y = 23.53 + 0.25 x$	16	$r^2 = 0.87$	$a < 0.001$
N (g/kg peso seco)	$y = 7.66 + 0.105 x$	16	$r^2 = 0.69$	$a < 0.01$
P (g/kg peso seco):	0 - 19 cm $y = 5.70 + 0.09 x$	8	$r^2 = 0.68$	$a < 0.1$
	19-38 cm $y_{\text{mean}} = 4.28$		$\sigma = 0.63$	n. s.
C (g/kg peso seco)	$y = 96.23 + 1,369 x$	15	$r^2 = 0.66$	$a < 0.01$
Fe (g/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 35,88$	16	$s = 3.83$	n. s.
Fe/P (relación atómica)	$y_{\text{mean}} = 3.72$	16	$s = 0.67$	n. s.
Mn (g/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 0.88$	16	$s = 0.14$	n. s.
Ca (g/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 5.65$	16	$s = 1.36$	n. s.
Mg (g/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 1.91$	16	$s = 0.15$	n. s.
K (g/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 1.47$	16	$s = 0.28$	n. s.
Na (g/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 1.86$	16	$s = 0.44$	n. s.
Cu (mg/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 28.58$	16	$s = 6.93$	n. s.
Pb (mg/kg peso seco)	$y = 19.03 + 0.323 x$	16	$r^2 = 0.72$	$a < 0.001$
Cd (mg/kg peso seco)	$y = 0.74 + 0.017 x$	16	$r^2 = 0.52$	$a < 0.05$
Zn (mg/kg peso seco)	$y_{\text{mean}} = 276$	16	$s = 109$	n. s.

superficie y hasta los 18 cm, la concentración decrece constantemente desde 6.1 a 4.1 g/kg en peso seco. Entre 18 cm y 38 cm la correlación de fósforo, con la profundidad, no es significativa. Es necesario anotar, que la concentración de fósforo correspondiente a 110 años atrás del presente (> 4.3 g/kg en peso seco) es muy alta, y la disminución de fósforo con la profundidad del sedimento es pequeña y poco significativa, lo cual indica altas aportaciones

Fig. 5. Concentraciones de fósforo en el perfil vertical en el Lago San Pablo. El incremento moderado de fósforo puede reseñarse con dos correlaciones lineales (la valor de 23 cm parece de poco significancia)

Fig. 5. Concentrations of phosphorus in a vertical profile of San Pablo Lake. The slight increase of phosphorus can be described in a good manner by two distinct linear correlations (data at 23 cm seems to be little significant).



de fósforo hacia el lago desde hace mucho tiempo.

La relación Fe/P con respecto a la profundidad, muestra una tendencia contraria a la observada en el caso del fósforo: cuando la concentración de P disminuye, la relación Fe/P aumenta (Fig. 6). En general, cuando las relaciones Fe/P son muy pequeñas, éstas se deben a un ingreso insuficiente de Fe en el lago. Este bajo nivel en el ingreso de hierro ha ocurrido desde hace 110 años (Cuadro 2). La cantidad media de fósforo en el agua del lago es de 30.8×10^3 kg P y la sedimentación anual de P es de 8×10^3 kg, lo cual demuestra la movilidad del fósforo.

No hay resultados significativos sobre la contaminación del lago por causa de metales pesados (Cu, Pb, Cd, Zn). Las concentraciones de estos metales se encuentran en niveles ínfimos con relación a otros lagos (Förstner y Wittmann 1981), incrementos de nuevos depósitos sólo se dan en Pb y Cd (Cuadro 2), pero con niveles bajos.

DISCUSIÓN

El proceso de sedimentación en el Lago San Pablo es prácticamente uniforme a lo largo y ancho de la cubeta, y las características físico-químicas de los sedimentos no cambian significativamente a lo largo del perfil horizontal. Consecuentemente, toda la superficie del sedimento toma parte en las reacciones de equilibrio que ocurren en las aguas del lago. De mayor importancia es la gran liberación de fósforo desde los sedimentos, posiblemente ocasionada por una insuficiente capacidad de retención y por las altas concentraciones del mismo. Consecuentemente ocurre una intensificación del ciclo del fósforo y del proceso de eutrofización.

Un problema central en limnología, es la correlación del estado trófico de los lagos y la concentración de fósforo en los sedimentos. Las altas concentraciones de fósforo en los sedimentos no están claramente correlacionadas con el estado trófico de un cuerpo de agua.

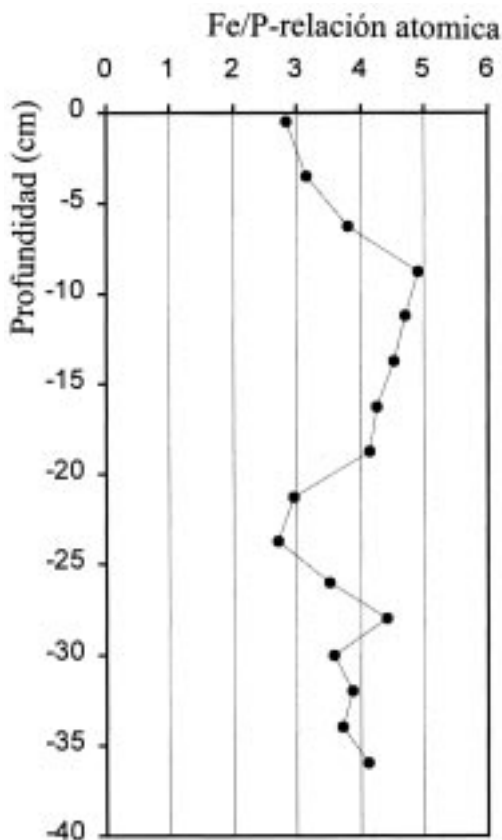


Fig. 6. Relación Fe/P (en molar) en el perfil vertical en el Lago San Pablo.

Fig. 6. Molar Fe/P-relationship in a vertical profile of San Pablo Lake.

Hupfer (1995) anota, que las concentraciones de P en sedimentos están en el rango de 0.1 a ~ 7 g/kg en peso seco, y que la concentración de fósforo en los sedimentos no es adecuada para pronosticar el estado trófico de los lagos (Cuadro 3).

Las reacciones químicas en las capas superiores del sedimento y en la interfase agua-sedimento, determinan que aquél actúe como trampa o como fuente de fósforo. La movilización del fósforo es el factor más importante en el proceso de eutrofización (Psenner y Gunatilaka 1988, Sas 1989, Hupfer 1995), la que depende en gran parte de la concentración del mismo en la columna de

CUADRO 3

Estado trófico y concentraciones de fósforo en los sedimentos de lagos, datos de Hupfer (1995)

TABLE 3

Trophic state and phosphorus concentrations of lakes sediments (data from Hupfer, 1995)

Estado trófico de los lagos	concentración de P medio de los sedimentos (g/ka peso seco)	variación	n
oligotrófico	2.07	1.33	19
mesotrófico	1.83	1.59	29
eutrófico	1.97	1.26	54
politrófico	3.20	2.37	21

agua. Altas concentraciones de P_{total} en los sedimentos de un lago, pueden tener su origen en altas aportaciones externas, causando así un proceso de eutroficación. Sin embargo, este proceso de eutroficación puede ser también una consecuencia de la escasa capacidad de retención del fósforo por parte del sedimento como hierrofosfato.

La capacidad de retención se puede evaluar por la relación Fe/P en los sedimentos. La concentración de hierro en el sedimento debe ser más alta que la concentración de fósforo. Partes del hierro forman el hierrosulfide y no sirven a causa de la absorción del fosforo (Hupfer 1995). Consecuentemente, la capacidad de retención de fósforo en los sedimentos de Lago San Pablo es muy baja y ocasiona que estos sirvan como fuente del mismo. El fósforo es transportado desde la columna de agua hacia los sedimentos, —con los detritus, por ejemplo— pero es insuficientemente retenido por éstos. Otro aspecto muy significativo que se presenta temporalmente, es una disminución de los niveles de oxígeno en el hypolimnion, la cual afecta igualmente a los sedimentos, generando condiciones anóxicas que favorecen la movilización de fósforo mediante reacciones químicas de tipo redox (Wetzel 1983).

El análisis de la distribución vertical del fósforo permite rehacer la historia del Lago San Pablo, afectada tanto por los cambios climáticos como por el incremento de carga debido a la intensificación del uso de la tierra y de la ganadería. Mediante análisis de ^{210}Pb se obtuvieron buenos resultados correspondientes a sedimentos recientes. La actividad del ^{137}Cs de

las pruebas atómicas atmosféricas no es aplicable en la datación de los sedimentos del lago San Pablo. También no hay residuos significativos en el hemisferio sur de la deposición de trazas de elementos radiactivos debido a la catástrofe de Chernobyl, en 1986 (Pinglot y Pourschet 1995).

La deposición calculada de ^{210}Pb es de 27 Bq/m² año; comparativamente la menor deposición en los lagos alpinos es de 140 Bq/m² año (Albrecht 1999). La actividad estimada de ^{137}Cs de 2 Bq/kg es baja comparada con la de los lagos de la zona templada del hemisferio norte (50 a 100 Bq/kg en peso seco; Albrecht *et al.* 1998). Con base en consideraciones sobre el área de muestreo del lago y referentes al tiempo de residencia de las aguas, podemos asumir que las pruebas atómicas tuvieron poco significado en esta zona ecuatorial. La estimación de la tasa de sedimentación con ^{137}Cs da un valor comparable al obtenido mediante el método de ^{210}Pb , especialmente si se considera la posible migración de ^{137}Cs hacia las capas profundas de los sedimentos.

Las tasas de sedimentación de 3.5 mm/año correspondientes a los últimos 110 años, están acordes con las tasas obtenidas con datos paleolimnológicos de los últimos 4000 años, con una carga tasa de sedimentación de 1.5 mm/año (Athens 1997).

Las cargas de fósforo en el Lago San Pablo se han incrementado durante los últimos 110 años en cerca del 50%, debido a las actividades humanas. Este aumento podría considerarse como moderado, al compararlo con el incremento que se ha observado en los lagos del

hemisferio norte, donde se ha detectado un proceso de eutroficación muy alto. La carga de fósforo correspondiente a 110 años atrás también es alta, y el lago debió haber estado en condiciones mesotróficas a eutróficas. La evaluación vertical de la concentración de fósforo en los sedimentos del lago permite considerar un normal incremento de la tasa de sedimentación. Es altamente significativo el incremento de las precipitaciones de calcita (como consecuencia de la eutroficación), ya que ésta es pobre en fósforo. Un incremento en la tasa de sedimentación provoca un decrecimiento en las concentraciones de fósforo, por efecto de la disolución. La concentración de fósforo en el sedimento es entonces un resultado de la carga de fósforo por m^2 en el lago y de la tasa de sedimentación.

El análisis comparativo entre las capas inferiores de los sedimentos del Lago San Pablo, indica que hay grandes depósitos de fósforo relacionados con afluentes de las áreas aledañas al área de muestreo, debido a: (1) Intensa descomposición de compuestos orgánicos de los suelos, por la alta temperatura, (2) Intensa mineralización de los suelos orgánicos y de las rocas, debido a la extrema variación de temperatura y a la alta radiación solar, (3) Lavado intenso de fósforo debido a las fuertes lluvias que se presentan en las estaciones de invierno, hecho que está influenciado por la acidez de los suelos.

Otros datos no publicados sobre los lagos tropicales de las altas montañas del Ecuador, (Laguna La Mica y Laguna Toreadora) confirman también esta tendencia natural a la eutroficación. Ambas lagunas están situadas en áreas montañosas sin intervención antrópica, pero presentan bajas concentraciones de oxígeno en el hipolimnion con sedimentos orgánicos anóxicos.

AGRADECIMIENTOS

La investigación del Lago San Pablo es un proyecto científico de la Escuela Politécnica Nacional de Quito y la Universidad Técnica de

Berlín, Departamento de Manejo de la Calidad de Agua. Se agradece el apoyo financiero de la Sociedad Científica Alemana (Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG) y del Ministerio de Cooperación Económica y Desarrollo (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, BMZ), quienes hicieron posible el desarrollo del proyecto. Se agradece al señor Skade, de la Oficina Federal Alemana para la Protección contra la Radiación (Bundesamt für Strahlenschutz, Berlín) por la cooperación en la determinación de ^{137}Cs y ^{210}Pb en las muestras, y a las estudiantes Anneke Hadelier y Claudia Kirmes por la colaboración en el trabajo de campo.

RESUMEN

Se han realizado estudios sedimentológicos en el Lago San Pablo, un lago tropical de alta montaña, situado en los Andes del Ecuador, a 2 660 m sobre el nivel del mar. El lago presenta características propias de un estado eutrófico y, como consecuencia de esto se ha observado un crecimiento intenso de macrófitas y un hypolimnion anóxico con contenido de sulfitos orgánicos en los sedimentos. A partir de las características físico-químicas de los sedimentos superficiales, se ha podido establecer una distribución homogénea de éstos a lo largo y ancho del fondo de la cubeta. Los perfiles verticales mostraron altos contenidos de fósforo (4.3 g/kg en peso seco) y una baja relación Fe/P (4.0), indicando una deficiente capacidad de retención de fósforo. La tasa de sedimentación pudo ser determinada mediante la aplicación de la prueba de ^{210}Pb , con la cual se obtuvo un valor de 3.5 mm/año. El análisis del contenido de ^{137}Cs no fue significativo debido a los bajos valores obtenidos. Los análisis verticales de sedimentos destacan el incremento de los depósitos de fósforo durante los últimos 110 años, pero este incremento representa el 50% de la concentración previa, lo cual es bastante moderado. En el pasado los ingresos de fósforo al lago también fueron altos, y se debieron a procesos naturales. Los lagos tropicales de alta montaña estudiados en el Ecuador, muestran una tendencia hacia la eutroficación. Este hecho es contradictorio, ya que estos lagos se encuentran en zonas poco pobladas y de bajo desarrollo de la vegetación.

REFERENCIAS

- Albrecht, A. 1999. Radiocesium and ^{210}Pb in sediments, soils and surface waters of a high alpine catchment:

- A mass balance approach relevant to radionuclide migration and storage. *Aquat. Sci.* 61: 1-22.
- Albrecht, A., R. Reiser, A. Lück, J.-M.A. Stoll & W. Giger. 1998. Radiocesium dating of sediments from lakes and reservoirs of different hydrological regimes. *Environ. Sci. Technol.* 32: 1882-1887.
- Anónimo, 1980. Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos calidos tropicales. Centro Panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente (CEPIS). O.M.S.
- Anónimo, 1985. DIN 38414. Schlamm und Sedimente. DEV (Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- u. Schlammuntersuchung). Physikalische, chemische, biologische und bakteriologische Verfahren. Hrsg. Fachgruppe Wasserchemie, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim. Loseblattsammlung.
- Athens, J.St. 1997. The maize record at Lake San Pablo, Ecuador. *Waikato Radiocarbon Laboratory, Newsletter* 4. Hamilton, New Zealand.
- Baigun, C. & M.C. Marinone. 1995. Cold-temperate lakes of South America: Do they fit northern hemisphere models? - *Archiv Hydrobiol.* 135: 23-51.
- Casallas, J. & G. Gunkel. 2002. Algunos aspectos limnológicos de un lago altoandino: El Lago San Pablo, Ecuador. *Limnetica* 20 (2), 29-46.
- Cooke G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson & P.R. Newroth. 1993. *Restoration and Management of Lakes and Reservoirs*. Lewis, Boca Raton. 548 p.
- Erten, H.N., H.R. von Gunten, E. Rössler & M. Sturm. 1985. Dating of sediments from Lake Zurich (Switzerland) with ^{210}Pb and ^{137}Cs . *Schweiz. Z. Hydrol.* 47(1): 5-11.
- Förstner, U. & G.T.W. Wittman. 1981. *Metal pollution in the aquatic environment*. Springer, Berlin. 486 p.
- Gonsiorczyk, T., P. Casper & R. Koschel. 1997. Variations of phosphorus release from sediments in stratified lakes. *Water Air Soil Pollut.* 99: 427-434.
- Gunkel, G. 2000. Limnology of an equatorial high mountain lake in Ecuador, Lago San Pablo. *Limnologica* 30: 113-120.
- Gunkel, G. & J. Casallas. 2002. Limnological of an equatorial high mountain lake, Lago San Pablo, Ecuador: Limitation of lake productivity by deep diurnal mixing. *Proc. Int. Ass. Theoret. Applied Limnol.* 28 (in press).
- Gunten, von H. R., M. Sturm, H.N. Erten, E. Rössler & F. Wegmüller. 1987. Sedimentation rates in the central Lake Constance determined with ^{210}Pb and ^{137}Cs . *Schweiz. Z. Hydrol.* 49/3: 275-283.
- Hupfer, M. 1995. Bindungsformen und Mobilität des Phosphors in Gewässersedimenten. *In* C. Steinberg, H. Bernhard & H. Klapper (eds.). *Handbuch "Angewandte Limnologie"*. Ecomed, Landsberg, IV-3-2: 1-22.
- Kiersch, B., R. Mühleck & G. Gunkel. 2003. Las macrófitas de algunos lagos altoandinos del Ecuador y su posible utilización como bioindicadores. *Rev. Biol. Trop.* 51(4): en prensa.
- Lewis W.M. Jr. 1987. Tropical limnology. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 18: 159-184.
- Oldfield, F. & P.G. Appleby. 1984. Empirical testing of ^{210}Pb -dating models for lake sediments. *In* Y. Hareworth & J.W.G. Lund (eds.). *Lake Sediments and Environmental History*. Leicester University, 93-124.
- Pinglot, J.F. & M. Pourchet. 1995. Radioactivity measurements applied to glaciers and lake sediments. *Science of the Total Environment* 173/174: 211-223.
- Psenner, R. & A. Gunatilaka. 1988. Proceedings of the first international workshop on sediment phosphorus. *Erg. Limnol.* 30. Schweizerbart'sche, Stuttgart. 115 p.
- Roldán, G. 1992. *Fundamentos de limnología neotropical*. Ed. Universidad de Antioquia. 529 p.
- Sanchez-Cabeza, J.A., I. Ani-Ragolta & P. Masque. 2000. Some considerations of the ^{210}Pb constant rate of supply (CRS) dating model. *Limnol. & Oceanogr.* 45: 990-995.
- Sas, H. (ed.). 1989. *Lake restoration by reduction of nutrient loading: Expectations, experiences, extrapolation*. Academia, St. Augustin. 497 p.
- Smith, J.N. & A. Walton. 1980. Sediment accumulation rates and geochronologies measured in the Saguenay Fjord using the Pb-210 dating method. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 44: 225-240.
- Steinitz-Kannan, M., P.A. Colinvaux & R. Kannan. 1983. *Limnological Studies in Ecuador 1. A Survey of chemical and physical properties of Ecuadorian lakes*. *Archiv Hydrobiol. Supplement* 65: 61-105.
- Wan, G. J., P.H. Saantschi, M. Sturm, K. Farrenkothen, A. Lück, E. Werth & C. Schuler. 1987. Natural (^{210}Pb , ^{7}Be) and fallout (^{137}Cs , 239 , ^{240}Pu , ^{90}Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland. *Chem. Geol.* 63: 181-196.
- Wetzel, R.G. 1983. *Limnology*. Saunders College, Philadelphia. 767 p.