

II.3 Patrones de sedimentación temporal en la zona litoral del Huiñaimarca

MICHAEL W. BINFORD, MARK BRENNER, DANIEL R. ENGSTROM

Estudios estratigráficos de cilindros de sedimento lacustre cuya edad se conoce proveen medidas del cambio en el ritmo (tasa) al cual materiales de la vertiente se han acumulado en la cuenca al paso del tiempo (BINFORD *et al.*, 1987). En algunos lagos, amplias zonas litorales existen entre el margen y el área de aguas profundas donde las columnas de sedimento generalmente se colectan. Una vez que materiales alóctonos arriban a la zona litoral son sometidos a procesos físicos (como la retención de partículas) y biológicos (como la absorción de nutrientes en solución por las macrofitas) cuya actividad promueve el estancamiento de dichos materiales en esta zona. En zonas litorales densamente cubiertas de macrofitas, dichas plantas contribuyen a regular el funcionamiento total del ecosistema lacustre (WETZEL, 1983) en parte debido a la influencia que ejercen en el desplazamiento de nutrientes (C, N, P) y sedimentos cuando éstos pasan de la vertiente hacia las partes profundas del lago (HOWARD-WILLIAMS, 1985; HOWARD-WILLIAMS y LENTON, 1975). El retenimiento de materiales en la zona litoral puede, por lo tanto, afectar las inferencias ecológicas basadas en estudios de sedimentos colectados en sitios profundos alejados del margen. Una pequeña cuenca al sureste del lago Titicaca (conocida como Lago Titicaca Pequeño, Lago Titicaca Menor y Lago Huiñaimarca) cuenta con una vasta zona litoral que sin duda controla el flujo de materiales transferidos del medio terrestre al lacustre, así como su desplazamiento ulterior desde la zona litoral hacia los sedimentos profundos. El lago Titicaca Menor cubre un área de 1.430 km², un 70 % de la cual contiene aguas someras de baja profundidad (< 10 m). Poco más de la mitad (58 %) de la cuenca está cubierta de macrofitas (COLLOT *et al.*, 1983). Esta comunidad, asociada con colonias de clorofitas filamentosas, está dominada por *Schoenoplectus tatora*, *Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Elodea* y *Chara*. (Nota: los datos batimétricos se basan en un mapa trazado a una escala de 1: 100,000 hecho por la Dirección de Hidrografía de la Marina de Bolivia y el Instituto Geográfico Militar del Perú).

Los sedimentos acumulados en la zona litoral de este lago constituyen una parte esencial de la cantidad total depositada en el sistema. Por tal motivo, al estudiar el efecto de cambios climáticos o el impacto de actividades humanas en la ecología del lago, es necesario considerar las tasas de sedimentación del área litoral. La acumulación neta de nutrientes y sedimentos en zonas marginales de aguas bajas viene a representar materiales interceptados que de otra manera pudieran haberse depositado en áreas más profundas.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 36607, ex 2

Cote : A

En este estudio se reportan cambios en el ritmo de sedimentación en la zona litoral del Huiñamarca durante los últimos 150 años. La columna de sedimento estudiada mide 98 cm de longitud (contando desde la transición entre el agua y el fango hacia abajo) y fue colectada en una pequeña bahía cercana al sitio arqueológico Lukurmata, ubicado en la parte norte de la península de Taraco (Fig. 1). Los resultados incluyen fechamiento de los depósitos con ^{210}Pb y datos de varios análisis químicos. En nuestra discusión comparamos las tasas de sedimentación obtenidas para la zona litoral del Huiñamarca con valores registrados en otros lagos tropicales y subtropicales. También se discuten los efectos que la acumulación de sedimentos en la zona litoral pueda tener en los procesos ecológicos que ocurren en sitios distantes del margen.

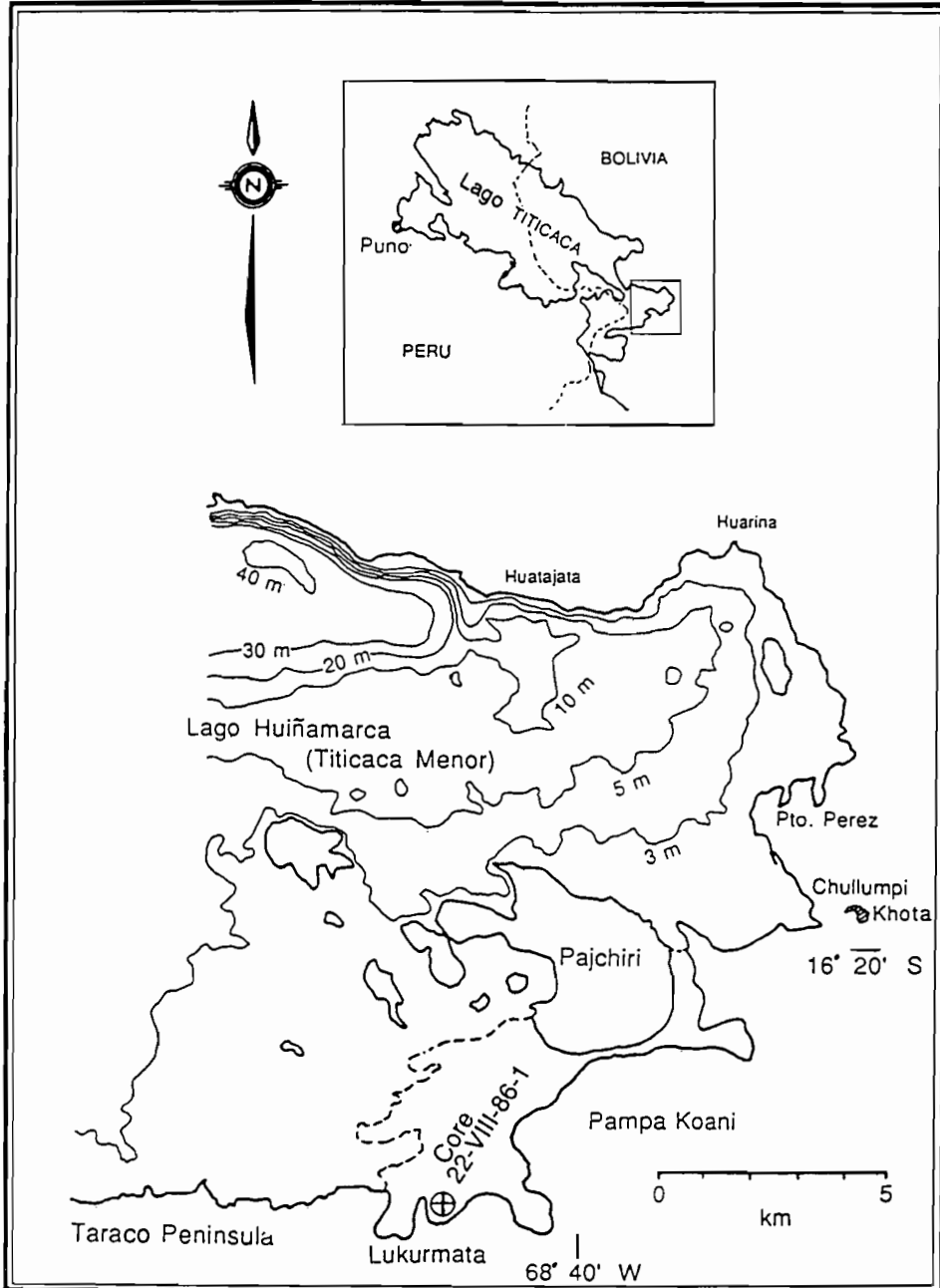


Figura 1. Mapa del Lago Titicaca Menor. Se muestra la ubicación del sitio Lukurmata, al lado norte de la península de Taraco, donde se colectó la columna de sedimento 22-VIII-86-1.

Materiales y Métodos

El cilindro de sedimento utilizado para este estudio se identifica como Lukurmata 22-VIII-86-1, y se colectó con un muestreador de pistón ensamblado a un tubo plástico que mide 1.9 m de largo y 4 cm de diámetro. Inmediatamente después de colectarse, la columna de sedimento se extrajo del tubo de plástico y fue cortada en secciones (muestras) de diverso grosor. Los cortes transversales se hicieron a cada 2 cm en la parte superior del cilindro (0-10 cm), a cada 1 cm en la parte media (10-30 cm), y a cada 4 cm en la porción inferior (30-98 cm). Las muestras se tomaron conforme el cilindro de sedimento se fue extrayendo del tubo. En el laboratorio, muestras más pequeñas (1 ó 2 cm³) se secaron por 24 horas a una temperatura de 105°C para determinar su peso seco y contenido de agua. Una vez deshidratadas, las muestras se sometieron a una temperatura de 550°C por 2 horas para determinar el contenido orgánico (HÅKANSON y JANSSON, 1983). Las cenizas originadas durante este proceso fueron luego digeridas con una solución de 1 N HCl y la solución resultante fue utilizada para medir el P total (ANDERSEN, 1976), S total, y los cationes. El P total se midió en un espectrofotómetro Coleman Modelo 14. Antes de poner las muestras en el espectrofotómetro, se agregó un reactivo consistente en ácido ascórbico y molibdato de amonio a las muestras hasta que éstas cambiaron de incoloras a un tono azul (APHA, 1975). El S total también se determinó espectrofotométricamente, pero usando un método turbidimétrico (APHA, 1975). El contenido catiónico se determinó en un analizador llamado Jarrell-Ash ICP 9000. El N total se determinó en un autoanalizador después que las muestras fueron digeridas usando una versión modificada del método de digestión Kjeldahl (NELSON y SOMMERS, 1975). El carbono total y el inorgánico fueron medidos en un aparato llamado Coulometro Modelo 5011 de la compañía Coulometrics Inc. Para determinar el C total las muestras se incineraron a 950°C en un accesorio llamado "Sistema 120" ensamblado al coulometro. Un accesorio diferente llamado "Sistema 140" se ensambló al coulometro para medir el carbono inorgánico, en este caso mediante la emisión de CO₂ liberado al disolver las muestras con 2N HClO₄. De las muestras disponibles sólo algunas fueron seleccionadas para determinar el C inorgánico.

La secuencia de pasos para la determinación (indirecta) de ²¹⁰Pb en los sedimentos es como sigue: a) destilación para extraer el radionúclido ²¹⁰Po, que viene a ser un "nieto" del ²¹⁰Pb cuando éste se desintegra, b) disolución del concentrado de ²¹⁰Po en una solución diluida de HCl, y c) adhesión del ²¹⁰Po a una plaquita de plata que luego se sometió a espectrometría para medir la emisión de partículas alfa (siguiendo una modificación del método sugerido por EAKINS y MORRISON, 1978). A cada muestra se agregó una cantidad conocida de ²⁰⁸Po con el propósito de medir y corroborar el rendimiento radioactivo del ²¹⁰Po. El cálculo de las edades de los sedimentos por medio de su contenido de ²¹⁰Pb se basó en un modelo conocido como Ritmo Constante de Abastecimiento (Constant Rate of Supply o CRS Model de APPLEBY y OLDFIELD, 1978).

Resultados

Las características físicas y químicas de la columna de sedimento Lukurmata 22-VIII-86-1 se muestran en la figura 2. Tanto la densidad del sedimento (Rho = peso seco cm⁻³ hidratado) como el porcentaje de peso seco son más altos en los depósitos comprendidos entre la base y 30 cm; arriba de este nivel ambos valores gradualmente declinan. El contenido orgánico comprende de 23.6 % a 51.2 % del peso seco y se correlaciona con el C total ($r = 0.96$, $P < 0.001$).

LAGO TITICACA

LUKURMATA M.W. INT. CORE 22-VIII-86-1

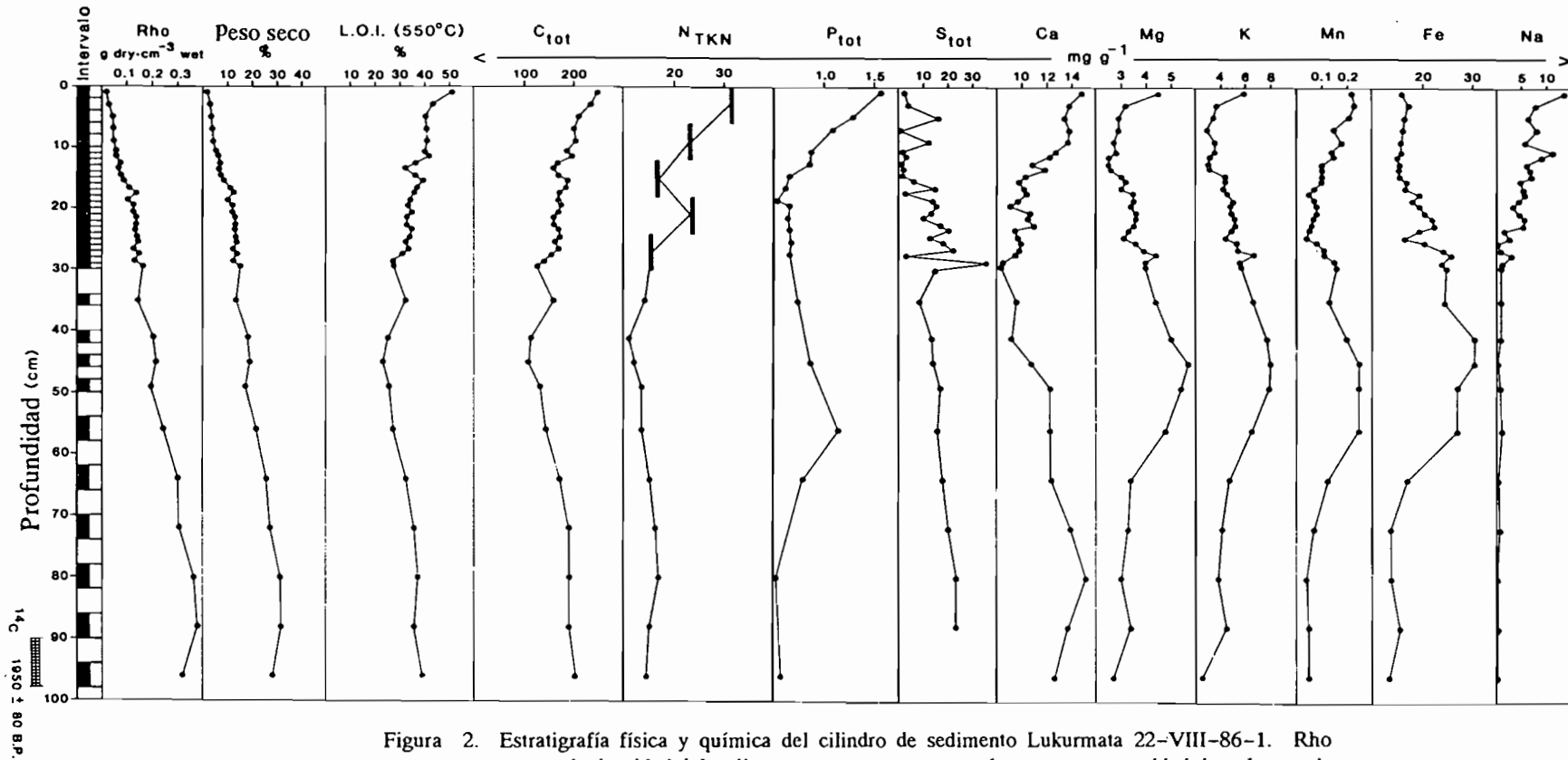


Figura 2. Estratigrafía física y química del cilindro de sedimento Lukurmata 22-VIII-86-1. Rho representa la densidad del sedimento y se expresa como el peso seco por unidad de volumen de sedimento hidratado (g cm⁻³). El porcentaje de peso seco es igual a :

$$\frac{1 - \text{peso perdido al deshidratar a } 105^{\circ}\text{C} \times 100}{\text{peso original del sedimento hidratado}}$$

Se puede decir con certeza que casi todo el carbono es de origen orgánico ya que sólo se detectaron cantidades inapreciables de carbonatos (fuentes de C inorgánico). Las concentraciones de N en los sedimentos ($11.2\text{--}31.4\text{ mg g}^{-1}$) son mucho más altas que en los suelos de las tierras altas circunvecinas, los cuales cuentan con 2.0 mg g^{-1} (de acuerdo a datos sin publicar obtenidos por M. Brenner). En contraste, el contenido promedio de P en los depósitos lacustres (0.82 ± 0.28 , $n = 19$) es similar al de los suelos (1.10 ± 0.24 , $n = 9$). El contenido de S es muy variable en los sedimentos ($1.3\text{--}35.9\text{ mg g}^{-1}$) y carece de correlación con el C total ($r = -0.31$, $P < 0.05$). El Ca varía de 8.4 a 15.1 y el Na de 0.2 a 13.4 mg g^{-1} . Tanto el Ca como el Na se correlacionan con el contenido orgánico ($r = 0.58$, $P < 0.001$ y $r = 0.80$, $P < 0.0001$, respectivamente). Las concentraciones de Mg, K, Mn y Fe se correlacionan entre sí y es muy posible que en su mayoría estos cationes estén ligados a las arcillas.

Bajo las premisas del modelo de fechamiento conocido como Ritmo Constante de Abastecimiento (Constant Rate of Supply o CRS), la relación entre el logaritmo de la radioactividad del ^{210}Pb y la profundidad a lo largo de la columna de sedimento es lineal si: 1) el flujo de ^{210}Pb atmosférico hacia los sedimentos ha permanecido constante durante los pasados 150 años, 2) no ha habido movilización del ^{210}Pb después de su deposición, 3) los sedimentos no han sido mezclados por procesos físicos o de otra naturaleza, 4) los sedimentos se han acumulado a un ritmo constante en los últimos 150 años, y 5) la densidad del sedimento (Rho) es constante a lo largo de toda la columna. No hay evidencia de que el flujo de ^{210}Pb atmosférico haya fluctuado en el pasado reciente. Migración de ^{210}Pb después de su asentamiento en el fondo del lago es poco probable ya que a un alto pH, como el que caracteriza las aguas y lodos del lago Titicaca, éste se adhiere a las partículas sedimentadas. Las concentraciones de compuestos químicos muestran variaciones estratigráficas bien definidas a lo largo del cilindro, incluyendo su parte superior (ver la figura 2 y el trabajo de BINFORD *et al.*, 1988). Esta estratigrafía sugiere que los sedimentos lacustres no han sufrido mezclamiento (homogeneización) después de depositarse en la cuenca.

LUKURMATA CORE 22-VIII-86-1

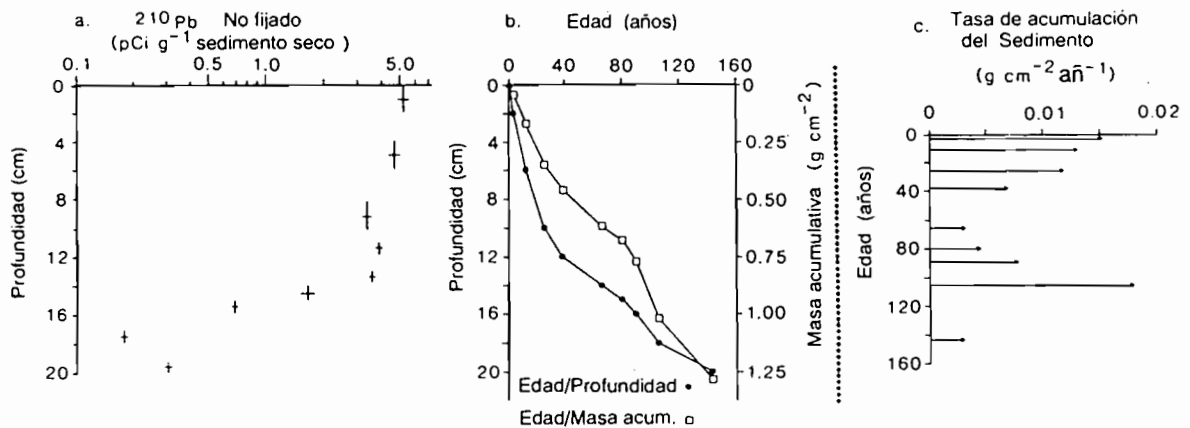


Figura 3a. Radioactividad del ^{210}Pb atmosférico medida a lo largo de la columna de sedimento. Las barras verticales representan la radioactividad del ^{210}Pb dentro de un intervalo analizado, y las horizontales el error del conteo. 3b. Esta figura incluye dos gráficas: una titulada "edad/longitud" que muestra la edad de los sedimentos a varios niveles de la columna, y otra titulada "edad/masa seca acumulativa" que indica la cantidad de masa seca acumulada por unidad de área (g cm^{-2}) en los pasados 150 años. Las edades fueron calculadas mediante interpolación de la radioactividad del ^{210}Pb medida en los intervalos analizados. 3c. Ritmo de acumulación de sedimentos. Los valores fueron trazados en la fecha en que cada intervalo fechado se inició.

Después de descartar estos factores (1 al 3) se considera que las desviaciones con respecto a la línea recta indicada en la figura 3a son debidas a cambios en la densidad del sedimento (Rho, Figura 2) y a cambios en el ritmo de acumulación de sedimentos (figura 3c). Estos dos factores también determinan la configuración del perfil que muestra la relación entre edad y longitud (de la columna de sedimento) en la figura 3b. En la misma figura se incluye otro perfil, edad/masa seca acumulativa, el cual ilustra la variabilidad en ritmos de sedimentación.

La sección de sedimento fechada con ^{210}Pb muestra dos episodios, uno que empezó hace 143.2 años y el otro hace 64.6 años, en los cuales se registra el ritmo de sedimentación más bajo: $0.0032 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (Figura 3c). Con la excepción de este valor, las tasas de sedimentación han sido variables y más altas en el último siglo después de haber alcanzado una máxima de $0.0180 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ hace 105.6 años. En promedio, los sedimentos se han acumulado a un ritmo de $0.009 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ en los últimos 143 años y a un ritmo de $0.0152 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ durante el período de 1984 a 1986. Parte del ^{210}Pb originalmente precipitado de la atmósfera se integra a los sedimentos lacustres. Se estima que la acumulación total de ^{210}Pb en los depósitos del sitio muestreado es igual a 2.76 pCi cm^{-2} . Esta acumulación equivale a un flujo de ^{210}Pb , de la atmósfera hacia los sedimentos, de $0.09 \text{ pCi cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Fechamiento de los sedimentos basales del cilindro con radicarbono indica que éstos tienen una edad de $1950 \pm 80 \text{ A.P.}$ (muestra GX-13052). Basándose en esta edad, la tasa media de sedimentación en los últimos dos mil años es de $0.011 \text{ g cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (BINFORD y BRENNER, 1989).

Discusión

Los cienos superficiales de la columna de sedimento Lukurmata 22-VIII-86-1 son ricos en materia orgánica y se asemejan en composición a los lodos superficiales que yacen en el margen norte de la península de Taraco. La distribución y características de estos yacimientos litorales fueron estudiadas por BOULANGE *et al.* (1981). La mayoría del material orgánico probablemente representa restos de macrofitas y algas que habitaron cerca del área muestreada. El resto del sedimento carece de carbonatos y consiste de arcillas y otras partículas inorgánicas de mayor tamaño.

El ritmo de acumulación de ^{210}Pb en el lago Titicaca, $0.09 \text{ pCi cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, es muy bajo comparado con valores de menos de $0.6 \text{ pCi cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ registrados en varios sitios del hemisferio norte, los cuales parecen emitir mayores cantidades de ^{222}Rn (un predecesor del ^{210}Pb) hacia la atmósfera (EL-DAOUSHY, 1988). Bajas tasas de acumulación de ^{210}Pb en otros lagos tropicales (ejemplos: Lago de Miragoane, Haití = $0.09 \text{ pCi cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ [BRENNER y BINFORD, 1988]; Lagos Chilonche and Chimaj, Guatemala = $0.134 \text{ pCi cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ y $0.085 \text{ pCi cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectivamente [BRENNER *et al.*, en revisión]) se atribuyen a la poca emisión de ^{222}Rn por parte de las superficies marinas cercanas a las cuencas. En el sitio Lukurmata, la baja acumulación de ^{210}Pb puede ser consecuencia de varios factores. Entre ellos, la baja emisión de radón proveniente de la superficie del lago y sus tierras circunvecinas, pérdida de sedimentos (y del ^{210}Pb asociado de ellos) después de depositarse, o una interrupción en el proceso de sedimentación. Es posible que durante períodos recientes de bajo nivel de agua el sitio muestreado se haya secado. El desecamiento no sólo interrumpiría la acumulación de sedimentos y ^{210}Pb , sino que también resultaría en una pérdida de materiales previamente acumulados. Secamiento de la localidad muestreada pudo haber ocurrido cuando el lago sostuvo bajos niveles durante la década de 1910 a 1920, o quizá cuando el nivel

bajó nuevamente a mediados de 1940. Más recientemente, entre 1972 y 1974, el nivel del lago declinó casi 3 m y en estas condiciones el sitio Lukurmata apenas si quedaría cubierto de agua. Como a pesar de las posibilidades de desecamiento no hay discontinuidades aparentes en la sedimentación (Figuras 2 y 3), la poca acumulación de ^{210}Pb en los sedimentos se atribuye a un bajo ritmo de precipitación de ^{210}Pb atmosférico.

Tasas netas de acumulación de sedimentos son influenciadas por muchos factores, tales como la proporción del tamaño de vertiente con respecto al lago, geología del terreno, suelos, morfometría de la vertiente y del lago, vegetación, actividades humanas, productividad del lago, descomposición de los sedimentos, ubicación del área muestreada, etc. En la Tabla 1 se comparan los ritmos de sedimentación a largo plazo calculados para el lago Titicaca con valores obtenidos en otros seis lagos tropicales. Aunque el ritmo de sedimentación más bajo se midió en el Titicaca ($9.0 \text{ mg cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ en los pasados 143 años), el valor es similar a las medidas en los lagos Miragoane, Quexil y Chimaj ($11.0, 16.0$ y $15.0 \text{ mg cm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectivamente).

En la Tabla 2 se compara la tasa de sedimentación reciente (1984 a 1986) en el lago Titicaca con el promedio de sedimentación moderna (últimos 2 a 10 años) en varios lagos de Florida, E.U.A. Los datos indican que los sedimentos de Lukurmata se han acumulado a un ritmo mucho más lento. De la misma manera, la acumulación de materia orgánica, carbono, fósforo y nitrógeno ocurre más lentamente en Lukurmata que en los lagos de Florida (Tabla 2).

El ritmo de sedimentación en el sitio Lukurmata ha variado en los últimos 143 años (Figs. 3c y 4). La magnitud de estos cambios excede la magnitud de los cambios observados en las concentraciones de materia orgánica y nutrientes (C, N, P). Las concentraciones de material orgánico, C, N y P aumentan hacia la parte superior del cilindro (20-0 cm) donde el ritmo de sedimentación también aumenta. Por tal motivo, los perfiles que muestran los cambios en el ritmo de acumulación de materia orgánica y elementos (Fig. 4), así como el que muestra los cambios en sedimentación (Fig. 3c), son estratigráficamente similares.

Tasas de acumulación

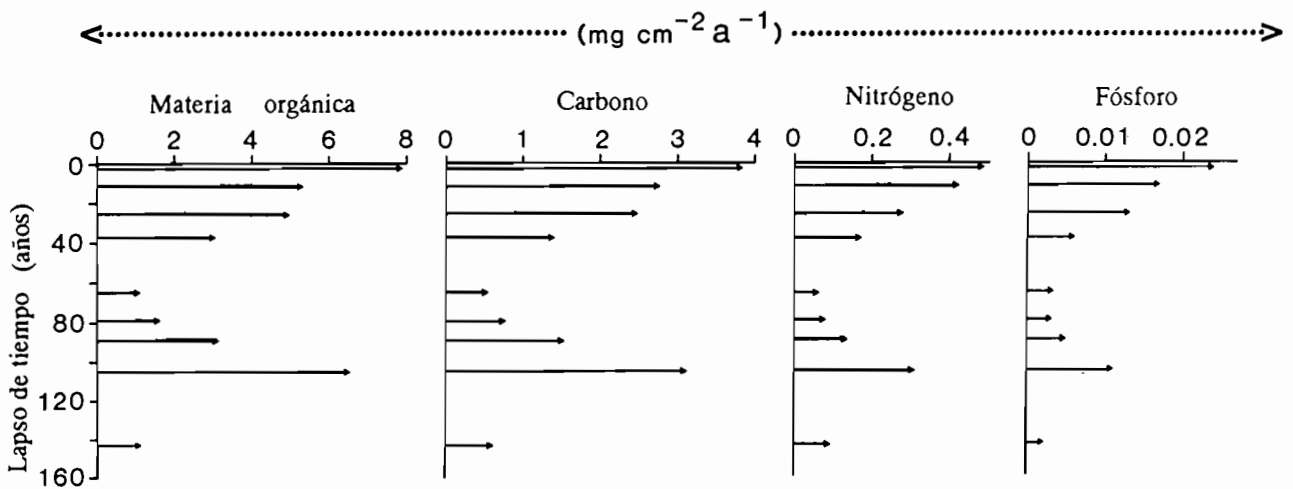


Figura 4. Ritmos de acumulación de materia orgánica, C, N y P. Los valores fueron trazados en la fecha en que cada intervalo fechado se inició. La siguiente fórmula fue utilizada: ritmo de acumulación = ritmo de acumulación de sedimento seco en cada intervalo x el porcentaje de cada compuesto dentro de ese intervalo. En aquellos intervalos fechados cuyas concentraciones de compuestos fueron desconocidas, se tomó como valor el promedio resultante de las concentraciones de dos intervalos contiguos.

	Sedimento seco	Materia orgánica	Carbono	Nitrógeno	Fósforo
Titicaca	15.2	7.8	3.8	0.48	0.024
Florida					
promedio	234	39.8	20.0	1.83	0.171
desviación standard (s)	407	19.3	10.3	1.07	0.134
min-máx	32-2080	15.3-88.9	6.9-46.7	0.56-4.42	0.024-0.586

Tabla 1. Ritmos promedio de acumulación de sedimento seco en el Lago Titicaca (Lukurmata Core 22-VIII-86-1) y otros lagos tropicales.

Fuentes de información : 1. Este reporte. 2. BINFORD y BRENNER (1989). 3. BRENNER y BINFORD (1988). 4-6. DEEVEY *et al.*, 1979. 7-8. BRENNER *et al.*, en revisión.

Lago	País	Ritmo de acumulación (mg cm ⁻² a ⁻¹)	Lapso de tiempo (años)	Método de fechamiento
1. Titicaca	Bolivia	9.0	143	210Pb
2. Titicaca	Bolivia	10.7	1950	14C
3. Miragoane	Haití	11.0	129	210Pb
4. Yaxha	Guatemala	38.0	420	polen
5. Sacnab	Guatemala	45.0	420	polen
6. Quexil	Guatemala	16.0	420	polen
7. Chimaj	Guatemala	15.0	146	210Pb
8. Chilonche	Guatemala	47.0	153	210Pb

Tabla 2. Ritmos recientes de acumulación de sedimento seco y nutrientes (mg cm⁻² a⁻¹) en el lago Titicaca (Lukurmata 22-86-VIII-1) y 34 lagos subtropicales de Florida, E.U.A. Los datos de Florida se basan en muestras superficiales de sedimento colectadas en la parte central más profunda de cada lago. En cada caso, el ritmo de sedimentación calculado para el área muestreada representa el promedio de sedimentación moderna (últimos 2 a 10 años) a través de la cuenca entera. La sedimentación media de cada lago se usó para estimar el promedio general reportado en la tabla. Los ritmos de acumulación reciente (1984-1986) reportados para el lago Titicaca corresponden a una área específica: la zona litoral del sitio Lukurmata.

Durante el siglo pasado los ritmos de sedimentación han fluctuado en dos direcciones. Comenzando con un alto valor hace 106 años, la tasa de sedimentación declinó durante las siguientes cuatro décadas. Más tarde, después de una baja registrada alrededor de 1920 la sedimentación comenzó a aumentar a partir de 1950. Las causas que aceleraron la sedimentación en la zona litoral del Titicaca no son muy claras, pero quizá se relacionan con varios factores. Dos eventos importantes, uno en el medio terrestre y otro en el lacustre, coinciden con los aumentos en sedimentación que han ocurrido desde mediados de 1940. Primeramente se considera que la reforma agraria introducida en la década de los cincuenta (PONCE SANGINES, 1989) pudo haber conducido a cambios en el uso de la tierra que rodea Lukurmata. Si las actividades de agroingeniería se intensificaron en la localidad, entonces habría de esperarse un aumento en la cantidad de materiales derivados de la vertiente perturbada. Un segundo factor que pudo haber incrementado la sedimentación litoral es la fluctuación en los niveles de agua. Después de un bajo nivel alcanzado a mediados de 1940, el nivel del lago permaneció alto hasta mediados de 1980, excepto en dos ocasiones (a fines de los años cincuenta y principios de los setenta) en que el nivel bajó ligeramente. El nivel más alto registrado en este siglo (3811.5 m.s.n.m.; PONCE SANGINES, 1989) se alcanzó entre 1985 y 1986. Las etapas de alto nivel de agua coinciden con episodios más lluviosos y con mayores descargas de agua provenientes del canal que rodea el Cerro Wilakollu. Es muy probable que al aumentar el descargue de este afluente (durante años lluviosos) también se acelere el transporte de materiales hacia la zona litoral donde este desemboca.

Resultados preliminares de la columna de sedimento Lukurmata 22-VIII-86-1 demuestran que sedimentos ricos en materia orgánica se han acumulado en la zona litoral de este sitio por casi dos mil años (BINFORD *et al.*, 1989). Los incrementos en tasas de sedimentación y acumulación de nutrientes en los últimos 40 años se relacionan con fluctuaciones en el nivel de agua y con cambios en el uso de las tierras adyacentes. Sin embargo, para hacer una evaluación cuantitativa del impacto que estos eventos pudieron haber tenido en la sedimentación litoral, es necesario contar con datos históricos sobre el manejo de la tierra y tener un mejor entendimiento de los efectos inducidos por cambios en los niveles de agua.

Los datos del sitio Lukurmata sugieren que las extensas poblaciones de macrofitas y algas de la zona litoral utilizan nutrientes disueltos e interceptan sedimentos. Mediante estos procesos, las comunidades litorales favorecen el almacenamiento de materiales en solución o suspensión en estas áreas marginales. Es posible que la retención de nutrientes en la zona litoral limite las cantidades destinadas a las partes centrales más profundas del lago y por eso éstas mantienen poco fitoplancton y son más transparentes. La transparencia del agua en el centro del lago se midió con el disco Secchi, y varía de 2 a 7 m en profundidad (LAZZARO, 1985). En este lago tropical las macrofitas crecen todo el año y por lo tanto no hay, como en las zonas templadas, una estación en que éstas mueren y liberan sus reservas de nutrientes (CARPENTER y LODGE, 1986). Cambios en el nivel del lago y cosecha de plantas por los habitantes locales probablemente estimulan el crecimiento continuo de la comunidad macrofítica (*sensu* BORMANN y LIKENS, 1979; VITOUSEK y REINERS, 1975; GORHAM *et al.*, 1979), es decir que porciones de la comunidad adulta son continuamente reemplazadas por nuevas plantas. Bajo estas condiciones, la vegetación acuática convierte la zona litoral en un sitio de almacenamiento neto de los nutrientes que arriban al lago infiltrados del suelo o transportados por corrientes.

Datos preliminares de cilindros de sedimento fechados, colectados en aguas profundas del lago Titicaca indican que los ritmos de sedimentación (en cm a^{-1}) en estos sitios son del mismo orden

de magnitud que los de la zona litoral. Una columna de sedimento colectada cerca de Huatajata bajo 8.5 m de agua, mide 8.36 m de largo y tiene un ritmo de sedimentación de 0.22 cm a^{-1} (edad a 7.55 m = 3430 años A.P.). Otra más corta colectada cerca de Guaqui a una profundidad de 8.3 m, mide 3.27 m de longitud y tiene un ritmo de sedimentación de 0.10 cm a^{-1} (edad a 3.20 m = 3160 años A.P.). En Lukurmata, 20 cm de sedimento se acumularon en 143 años (a un ritmo de 0.14 cm a^{-1}) mientras que 96 cm se han acumulado en 1950 años (a un ritmo de 0.05 cm a^{-1}).

Los datos del sitio Lukurmata revelan la importancia que la zona litoral del lago Titicaca tiene sobre el funcionamiento del sistema lacustre, ya que ésta contribuye a controlar la productividad y los procesos de sedimentación que acontecen en áreas alejadas del margen. En trabajos futuros intentaremos comparar los resultados del sitio Lukurmata con datos de otras columnas de sedimento colectadas en zonas litorales. También planeamos obtener varios cilindros de sedimento a través de la cuenca del Huiñaimarca con el propósito de investigar los patrones de sedimentación del sistema completo.

Agradecimientos

Agradecemos la ayuda de campo brindada por ALAN KOLATA y OSWALDO RIVERA. Este proyecto fue financiado por la NSF mediante dos becas (BNS 86-07541 y BNS 88-05490) otorgadas a ALAN KOLATA.

Agradecemos a la señora ANTONIA HIGUERA-GUNDY por la traducción del texto en castellano (original en inglés).

Referencias

- AGASSIZ (A.), GARMAN (S.W.), 1876. – Exploration of Lake Titicaca. *Bull. Mus. Comp. Zool.*, Harvard, 3 : 273–349.
- ANDERSEN (J.M.), 1976. – An ignition method for determination of total phosphorus in lake sediments. *Wat. Res.*, 10: 329–331.
- Anon., 1975. – Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA (American Public Health Association). 14th ed.
- Anon., 1978. – Lago Titicaca. Mapas al 1/100.000, PERU-BOLIVIA, HIDRONAV N° 3100 – 3200 – 3300 – 3400 – 3500. *Instituto Geográfico Militar*, Lima, Perú.
- APPLEBY (P.G.), OLDFIELD (F.), 1978. – The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena*, 5: 1–8.
- BINFORD (M.W.), BRENNER (M.), 1986. – Dilution of ^{210}Pb by organic sedimentation in lakes of different trophic states, and application to studies of sediment–water interactions. *Limnol. Oceanogr.*, 31 : 584–595.
- BINFORD (M.W.), BRENNER (M.), 1989. – Resultados de estudios de limnología en los ecosistemas de Tiwanaku. *In* : Arqueología de Lukurmata, Alan Kolata ed., Vol. 2. Instituto Nacional de Arqueología y Producciones Pumapunku, La Paz, Bolivia : 213–236.
- BINFORD (M.W.), BRENNER (M.), WHITMORE, (T.J.), HIGUERA–GUNDY (A.), DEEVEY (E.S.), LEYDEN (B.), 1987. – Ecosystems, paleoecology and human disturbance in subtropical and tropical America. *Quat. Sci. Rev.*, 6: 115–128.
- BINFORD (M.W.), BRENNER (M.), LEYDEN (B.), 1988. – Paleolimnology of Tiwanaku ecosystems: results of second-year studies. Unpubl. report, 47 p.
- BORMANN (F.H.), LIKENS (G.E.), 1979. – Pattern and Process in a Forested Ecosystem. Springer Verlag, New York, 253 p.
- BOULANGE (B.), VARGAS (C.), RODRIGO (L.A.), 1981. – La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 299–309.
- BOULANGE (B.), AQUIZE JAEN (E.), 1981. – Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 269–287.
- BRENNER (M.), BINFORD (M.W.), 1988. – A sedimentary record of human disturbance from Lake Miragoane, Haiti. *J. Paleolimnol.*, 1 : 85–97.
- BRENNER (M.), LEYDEN (B.), BINFORD (M.W.), 1990. – Recent sedimentary histories of shallow lakes in the Guatemalan savannas. *J. Paleolimnol.*, 4 : 239–252.
- CARMOUZE (J.P.), AQUIZE JAEN (E.), 1981. – La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 311–328.
- CARPENTER (S.R.), LODGE (D.M.), 1986. – Effects of submerged macrophytes on ecosystem processes. *Aquatic Botany*, 24: 341–370.
- COLLOT (D.), KORIYAMA (F.), GARCIA (E.), 1983. – Répartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 16 (3) : 211–318.
- DEEVEY (E.S.), RICE (D.S.), RICE (P.M.), VAUGHAN (H.H.), BRENNER (M.), FLANNERY (M.S.). – Mayan urbanism : impact on a tropical karst environment. *Science*, 206 : 298–306.

- D'ORBIGNY (A.), 1835–1847. – Voyage dans l'Amérique méridionale. Pitois–Levrault et Cie., Paris, 7 tomes, 11 vol.
- EAKINS (J.D.), MORRISON (R.T.), 1978. – A new procedure for the determination of lead-210 in lake and marine sediments. *Int. J. appl. Radiat. Isotopes*, 29 : 531–536.
- EL-DAOUSHY (F.), 1988. – A summary on the Lead-210 cycle in nature and related applications in Scandinavia. *Envir. Int.*, 14 : 305–319.
- GILSON (H.C.), 1939–1940–1955. – The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London*, 1 : 357 p.
- GORHAM (E.), VITOUSEK (P.), REINERS (W.), 1979. – Ecosystem succession and nutrient retention. *Annu. Rev. Ecol. and System.*, 10 : 53–84.
- HÅKANSON (L.), JANSSON (M.), 1983. – Principles of lake sedimentology. Springer Verlag, New York, 316 p.
- HOWARD-WILLIAMS (C.), 1985. – Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands: a theoretical and applied perspective. *Freshw. Biol.*, 15 : 391–431.
- HOWARD-WILLIAMS (C.), LENTON (G.M.), 1975. – The role of the littoral zone in the functioning of a shallow tropical lake system. *Freshw. Biol.*, 5 : 445–459.
- HUFFMAN (E.W.D., Jr.), 1977. – Performance of a new automatic carbon dioxide analyzer. *Microchemical Journal*, 22 : 567–573.
- LAZZARO (X.), 1985. – Poblaciones, biomazas y producciones fitoplanctónicas del Lago Titicaca. *Rev. Inst. Ecol., La Paz*, 7 : 23–64.
- NELSON (D.W.), SOMMERS (L.E.), 1972. – A simple digestion procedure for estimation of total nitrogen in soils and sediments. *J. Environ. Qual.*, 1 : 423–425.
- NEVEU-LEMAIRE (M.), 1906. – Les lacs des hauts-plateaux de l'Amérique du Sud. Imprimerie Nationale, Paris, 197 p.
- PENTLAND (J.B.), 1838. – The laguna of Titicaca and the valleys of Yukai, Collao and Desaguadero in Peru and Bolivia, from geodesic and astronomic observations made in the years of 1827 and 1828, 1837 and 1838. British Admiralty Chart, n° 1268. London.
- PONCE SANGINES (C.), 1989. – Lukurmata: investigaciones arqueológicas en un asentamiento urbano de la cultura Tiwanaku. Ensayo de historiación del avance científico (1895–1988). In: *Arqueología de Lukurmata*, Alan Kolata ed., Vol. 1. Instituto Nacional de Arqueología y Producciones Pumapunku, La Paz, Bolivia : 11–85.
- VITOUSEK (P.L.), REINERS (W.M.), 1975. – Ecosystem succession and nutrient retention: a hypothesis. *Bioscience*, 25 : 376–381.
- WETZEL (R.G.), 1983. – Limnology (2nd ed.). W.B. Saunders Company, Philadelphia, 767 p.
- WIRRMANN (D.), MOURGUIART (P.), de OLIVEIRA ALMEIDA (F.), 1988. – Holocene sedimentology and ostracodes repartition in Lake Titicaca. Paleohydrological interpretations. In : *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, Rabassa ed., A.A. Balkema, 6 : 89–127.