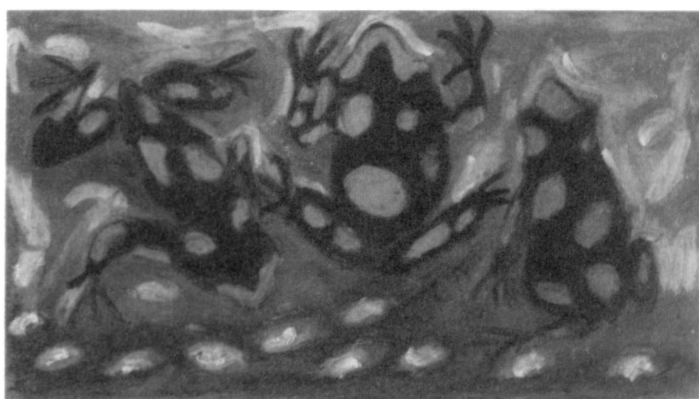


Artículos



Pintura *Dendrobates II*,
por Carlos Federico Álvarez II.

Investigación

La paleolimnología como herramienta para el estudio y manejo de embalses

Recibido para evaluación: 13 de Julio de 2005
Aceptación: 24 de Noviembre de 2005
Recibido versión final: 05 de Diciembre de 2005

Jaime Escobar ¹
Juan Camilo Restrepo ²
José Ignacio Martínez ³

RESUMEN

A nivel mundial, la paleolimnología ha sido empleada con éxito para reconstruir las condiciones ambientales y ecológicas en sistemas lacustres. En este contexto, ha sido utilizada como herramienta para determinar condiciones climáticas pasadas, evaluar cambios naturales como incendios forestales o erupciones volcánicas y cambios inducidos por el hombre como explotaciones mineras, eutroficación, deforestación y fenómenos de remoción en masa, entre otros. En la actualidad, la evaluación y manejo ambiental de embalses en zonas tropicales (i.e. sistemas lacustres artificiales) presenta una serie de interrogantes que pueden ser resueltos con ayuda de la paleolimnología. Hasta ahora los análisis en embalses colombianos se han concentrado en la evaluación físico-química y biológica de la calidad de las aguas, con limitado alcance temporal en evaluaciones ambientales y ecológicas de mediano y largo plazo. La paleolimnología involucra nuevos elementos de análisis y permite realizar una evaluación ambiental con gran alcance temporal, lo que a su vez hace posible diseñar medidas de manejo ambiental de mayor eficiencia.

PALABRAS CLAVE: Limnología, Paleolimnología, Embalses Tropicales, Sedimentos, Evaluación Ambiental.

ABSTRACT

Worldwide numerous paleolimnological techniques have been used to reconstruct past environmental and ecological conditions in lacustrine ecosystems. These techniques have been useful to determine past climate conditions, evaluate natural environmental changes such as fires or volcanic eruptions as well as human-induced changes in the landscape like mining and deforestation. Nowadays, a series of environmental related questions arise from the evaluation and management of tropical reservoirs. Research Colombian reservoirs has focused in water quality and ecological studies, overlooking the potential of sediments as archives of past environmental conditions. Paleolimnology involves a series of tools and methods that will allow researchers to perform better environmental evaluations in tropical reservoirs. Paleolimnological studies in Colombian reservoirs will offer researchers and planners new data to design more efficient environmental management policies for this ecosystem.

KEY WORDS: Limnology, Paleolimnology, Tropical Reservoirs, Sediments, Environmental Evaluation.

1. Ingeniero Ambiental, Escuela de Ingeniería de Antioquia. MS en Geología, Department of Geological Sciences, University of Florida. Estudiante de Doctorado, School of Natural Resources and the Environment, University of Florida. jaimee@ufl.edu

2. Ingeniero Ambiental de la Escuela de Ingeniería de Antioquia. MSc en Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT. Investigador Centro de Control de Contaminación del Pacífico (CCCP). jrest48@eafit.edu.co

3. Geólogo, Universidad Nacional de Colombia. MSc en Micropaleontología, Hull University. PhD en Paleoceanografía, The Australian National University. Profesor-investigador Universidad EAFIT. jmartin@eafit.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Los embalses artificiales constituyen una fuente importante de abastecimiento de agua y energía hidroeléctrica para las sociedades modernas. A nivel mundial existen más de 4500 presas y cada año se construyen entre 160 y 320 presas nuevas, principalmente en los países en vía de desarrollo. En Colombia existen 34 grandes embalses con una capacidad mayor de $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ y 29 de mediana capacidad (Roldán, 1992). El 82% de estos embalses tiene como fin la generación de energía hidroeléctrica, produciendo así más del 70% de la energía que se consume en el país. No obstante la importancia socioeconómica de los embalses y las discusiones generadas en torno a los impactos ambientales que ocasionan (e.g. Goldsmith y Hildyard, 1984; Revenga et al., 2000; Roldán, 2003), éstos han sido poco estudiados desde una perspectiva temporal en las regiones tropicales. Los impactos ambientales (i.e. eutroficación, generación de malezas acuáticas, mortalidad de peces, contaminación por basuras) que se presentan en los embalses tienen alcances imprevisibles en cuanto a duración, magnitud y extensión debido a su efecto acumulativo.

A nivel mundial, se ha probado en forma exitosa la utilidad de los estudios paleolimnológicos para determinar el efecto de actividades de degradación ambiental sobre cuerpos límnicos artificiales, así como para evaluar la eficiencia de medidas de prevención, mitigación y corrección de impactos ambientales (e.g. Fritz et al., 1991; Horn, 1992; Brenner et al., 2000; Cordeiro et al., 2002).

Este artículo discute la posibilidad de desarrollar en Colombia estudios paleoambientales en cuerpos de agua artificiales (i.e. embalses) y resume los métodos paleolimnológicos empleados en este tipo de estudios. En este contexto, los estudios paleolimnológicos en embalses artificiales en Colombia permitirían dar respuesta a preguntas tales como:

- ¿Cuáles impactos ambientales inciden en mayor grado sobre la calidad del agua y, en general, sobre el estado ambiental del embalse y su cuenca de drenaje?
- ¿Cuáles son las medidas de manejo ambiental apropiadas para la conservación de la cuenca de drenaje y la calidad del agua del embalse?
- ¿Cuál es el impacto neto que tienen las medidas de manejo ambiental aplicadas sobre el embalse y su cuenca?
- ¿Es posible diseñar planes de manejo, monitoreo y seguimiento sin conocer la dinámica de los sistemas límnicos frente a impactos ambientales específicos?
- ¿Una vez aplicadas determinadas medidas de manejo ambiental, cuánto tiempo tarda el sistema límnic en recuperar su estado inicial?



2. LA PALEOLIMNOLOGÍA COMO CIENCIA APLICADA

2.1. El desarrollo de la Paleolimnología

La paleolimnología es la ciencia que emplea los sedimentos lacustres para estudiar las condiciones ambientales pasadas de un cuerpo de agua y su cuenca de drenaje (Frey, 1988). Los sedimentos lacustres se acumulan en el fondo de los lagos de manera ordenada a una tasa que varía entre 0.5 y 2.0 mm a^{-1} y que depende del clima, de la geomorfología de la cuenca de drenaje y la batimetría del cuerpo de agua (e.g. Brenner et al., 2002). Las tasas de depositación de sedimentos en cuerpos límnicos artificiales en la mayoría de los casos es mucho más alta que en cuerpos lacustres naturales (Márquez y Guillot, 2001). Durante los procesos de decantación y depositación, los sedimentos que incluyen minerales, fragmentos de roca, microorganismos y materia orgánica, interactúan entre sí y con la columna de agua, de manera que pueden ser utilizados como registro de condiciones climáticas y ambientales pasadas (i.e. cadenas y estados tróficos, pH, contaminación por metales pesados). Por lo tanto, los estudios paleolimnológicos son útiles en la evaluación de la degradación ambiental en cuerpos límnicos artificiales, así como en el diseño y evaluación de la eficiencia de medidas de prevención, mitigación y corrección de impactos ambientales.

Los sedimentos de los lagos han sido ampliamente utilizados para reconstruir condiciones climáticas pasadas (e.g. Fritz et al., 1991; Brenner et al., 2000), evaluar cambios naturales como incendios forestales (e.g. Horn, 1992; Cordeiro et al., 2002) o erupciones volcánicas (e.g. Sandiford et al., 2001) y cambios inducidos por el hombre como explotaciones mineras (e.g. Patterson et al., 1996), eutroficación (e.g. Whitmore, 1991), deforestación (e.g. Page y Trustrum, 2000) y fenómenos de remoción en masa (e.g. Dapples et al., 2002). En el Lago James (Canadá), se determinaron cambios en la concentración de metales pesados y niveles de pH del lago utilizando sedimentos lacustres (Patterson y Kumar, 2000). El registro sedimentológico del Lago James sirvió para evaluar la tasa de recuperación natural de la cuenca, luego de que una explotación aurífera de mediana escala ubicada dentro del área de drenaje fuera clausurada. En los lagos Ilajanjarvi y Polvijarvi (Finlandia), se determinaron los efectos de la variación en la actividad forestal basados en cambios de la comunidad de Diatomeas (fitoplancton) recuperadas de la columna de sedimento (Simola, 1983; Simola et al., 1988). En el lago Arendsee (Alemania), se analizaron 40 cm de sedimento lacustre (i.e. 70 años de depositación) que sirvieron para reconstruir la historia de los niveles tróficos del sistema lacustre, la influencia de actividades antrópicas en estos cambios y la eficiencia en la aplicación de medidas de remediación frente a la eutroficación (Neumann et al., 2002). Estos estudios han servido para evaluar el impacto ambiental de actividades antrópicas específicas y para poner en práctica programas de recuperación ambiental altamente eficaces (Smeltzer y Swain, 1985).



La mayoría de estos estudios se han realizado en zonas templadas, mientras que los pocos estudios de las zonas tropicales son de baja escala temporal. Existen diversas razones para explicar la escasez de estudios paleolimnológicos en áreas tropicales, fundamentalmente: (i) la paleolimnología es una ciencia que apenas comienza a desarrollarse en los países tropicales, por lo que sus fuentes de financiación son muy reducidas; (ii) problemas logísticos en el transporte de equipos de laboratorio a campo y difícil acceso a los cuerpos de agua (e.g. estado de las carreteras, condiciones de orden público); y (iii) dificultad para obtener permisos ambientales en las zonas donde se quiere realizar la investigación (Brenner, 1995).

2.2. Estudios paleolimnológicos en embalses artificiales

Los embalses artificiales poseen dos sistemas hidrológicos, uno de carácter fluvial y otro lacustre; la cola de los embalses presenta condiciones fluviales, mientras que las condiciones lacustres ocurren cerca al sitio de presa. La existencia de perfiles verticales de velocidad, turbulencias y transporte de sedimentos, entre otras, caracterizan el componente fluvial, mientras que por condiciones lacustres se entiende el predominio de la organización vertical del agua y condiciones óptimas para la sedimentación, como profundidad en la columna de agua, batimetría plana y condiciones de anoxia en la interfase agua-sedimento. Por lo tanto, es en esta última zona donde se concentran los estudios paleolimnológicos.

La construcción de embalses alrededor del mundo ha facilitado la ejecución de estudios limnológicos y paleolimnológicos (e.g. Einsele y Hinderer, 1997; Yoshikawa et al., 2000). En comparación con los estudios paleolimnológicos en cuerpos de agua naturales, los estudios paleolimnológicos en embalses poseen ventajas tales como el conocimiento de la fecha de construcción del embalse, sus condiciones de operación y documentación sobre los ecosistemas ubicados en su cuenca de drenaje (e.g. características naturales y procesos de intervención antrópica). Además, los lagos artificiales poseen una tasa rápida de acumulación de sedimentos, lo que permite su estudio paleo-ambiental a una alta resolución temporal (i.e. a escalas decadales y anuales). De esta forma es posible relacionar la información extraída de la columna sedimentaria con cambios físicos, químicos y biológicos pasados, y de allí, con la ayuda de dataciones geocronológicas, reconstruir la historia de sedimentación e hidrológica del embalse (i.e. Patterson et al., 1996; Page y Trustrum, 2000; Yoshikawa et al., 2000).

3. ESTUDIOS LIMNOLÓGICOS EN EMBALSES COLOMBIANOS

En Colombia existe un alto número de embalses con problemas de degradación de calidad de aguas por eutroficación y problemas asociados como anoxia y corrosividad (Márquez y Guillot,

2001; Roldán, 2003). Estos impactos ambientales generan costos importantes, tanto económicos como sociales, además de afectar el tiempo de vida útil estipulado para el embalse, i.e. debido a las altas tasas de sedimentación. Por ejemplo, el embalse de Anchicayá, localizado en el Valle del Cauca, se colmató durante los primeros diez años de funcionamiento, aun cuando fue diseñado y construido con una vida útil estimada de 50 años. También, se estima que el embalse de Belmira (Antioquia) posee actualmente siete años menos de vida útil con respecto a su capacidad inicial, lo que ha generado pérdidas económicas cercanas a los \$280 millones (Roldán, 2003).

Hasta ahora, los estudios en embalses artificiales colombianos se han concentrado en el monitoreo fisicoquímico (e.g. Castaño y Palacio, 1999) y biológico (e.g. Roldán, 1976, 1982, 2000; Ramírez y Machado, 1982; Ramírez et al., 2000) de la calidad del agua. Por ejemplo, Roldán (2003) recopila el comportamiento del oxígeno a través de un perfil de profundidad en la columna de agua en varios embalses tropicales. En este inventario algunos embalses muestran valores bajos de oxígeno, incluso cerca de la interfase agua-sedimento, confirmando la severidad de los problemas ambientales producidos por estados de anoxia en sus aguas. En otra investigación, Ramírez et al (2000) estudiaron las comunidades de fitoplancton de la zona fótica de los embalses Punchiná, Las Playas, El Peñol y San Lorenzo con el fin de relacionar la diversidad de las comunidades de fitoplancton con variables como área, edad, altitud y tiempo de retención. Esta investigación no condujo a resultados concluyentes.

En contraste, los sedimentos de los embalses han sido escasamente estudiados (e.g. Mera, 1994; Vargas y Ramírez, 2002; Niño y Guillot, 2004). De otro lado, el manejo ambiental que se ha dado a los embalses en Colombia, y que se ha concentrado en programas de reforestación, control de erosión, entre otros (e.g. Ángel, 2000), podría ser optimizado por medio de estudios paleolimnológicos que permitan conocer la respuesta del embalse ante los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en la cuenca a diferentes escalas de tiempo. Es necesario, por lo tanto, evaluar, monitorear y analizar los impactos ambientales en embalses tropicales, así como las medidas técnicas aplicadas para manejarlos, en un contexto temporal.



4. ANÁLISIS PALEOLIMNOLÓGICOS Y SU APLICABILIDAD EN ESTUDIOS AMBIENTALES

Existen diversas técnicas de muestreo, recolección y análisis de núcleos de sedimento en estudios paleolimnológicos (e.g. Wright, 1991). La selección de un procedimiento o técnica depende del tipo de ecosistema a estudiar (i.e. lagos, pantanos, ciénagas, estuarios), del clima de la zona (i.e. zona tropical, templada o ártica), de las condiciones geográficas inmediatas al cuerpo de agua (i.e. facilidad de acceso de los equipos de muestreo) y de la morfometría del cuerpo de agua (i.e. profundidad, área). A continuación se presentan algunas de las técnicas de muestreo, recolección y análisis de núcleos de sedimento sugeridas para estudios paleolimnológicos en cuerpos lacustres artificiales colombianos, asumiendo que los cuerpos de agua no presentan temporada de congelamiento, tienen una profundidad máxima superior a los 20 m y poseen condiciones de accesibilidad favorables.

4.1. Recolección del núcleo de sedimento

La recolección del núcleo de sedimento es uno de los pasos más importantes, ya que los errores cometidos en esta etapa son difíciles de corregir en el laboratorio. Si el núcleo de sedimento no conserva sus propiedades físicas, químicas y biológicas durante la extracción, cualquier análisis sucesivo tiene un bajo rango de confiabilidad. Por esto, los objetivos principales de esta etapa consisten en: (1) evitar la alteración de la estructura física del núcleo de sedimento, (2) impedir cambios en el contenido de agua o espacios vacíos en la columna de sedimento y (3) evitar cambios en la composición química del núcleo de sedimento.

En la mayoría de los casos, el sitio ideal para la recolección debe ser: (1) una zona profunda donde los procesos de bioturbación causados por organismos bentónicos y plantas sean mínimos, (2) una zona plana donde los movimientos laterales y el re-trabajamiento de sedimentos sean

mínimos, de tal forma que el registro sedimentario obtenido sea el producto de decantación vertical, fundamentalmente. Los sedimentos lacustres son extraídos con la ayuda de nucleadores de gravedad, congelamiento y pistón manual. Los nucleadores de gravedad, manipulados desde un bote, descienden por la columna de agua y se sumergen en el sedimento gracias a su elevado peso. Este tipo de instrumento es ideal cuando se desea obtener un núcleo de sedimento de corta longitud o cuando la columna de agua posee más de 25-30 m de profundidad. Los nucleadores de congelamiento recolectan la muestra de sedimento en su parte exterior. La parte interior de este nucleador se llena con una solución de hielo seco y alcohol. Cuando este instrumento se sumerge en la columna de sedimento, éstos se adhieren y congelan en la parte externa del instrumento. El uso de este nucleador es ideal cuando se desea obtener un registro sedimentario perfecto o cuando éste posee altos contenidos de gases. El nucleador de pistón manual (Fisher et al. 1992) es ideal para cuerpos de agua con una profundidad máxima menor a los 30 m y para estudios donde se requiera más de un metro de columna sedimentaria. Este nucleador desciende en la columna de agua y se sumerge en el sedimento por medio de pistones que son adheridos a la parte superior del nucleador. El número de pistones requeridos depende de la profundidad de la columna de agua y de la cantidad de sedimento a extraer.



En el laboratorio los núcleos de sedimento son refrigerados a 4°C y seccionados en submuestras que varían entre 1 y 4 cm de espesor. Esta medida depende de la tasa de acumulación de los sedimentos, del nivel de resolución al que se quiere datar los sedimentos, de los objetivos del estudio y de los análisis físicos, químicos y biológicos que se realizarán.

4.2. Datación del sedimento

La datación del sedimento es necesaria para obtener la relación edad-profundidad en la columna sedimentaria. En sucesiones y/o muestras sedimentarias de corta duración temporal se usa el isótopo radioactivo de ²¹⁰Plomo (Pb) y el isótopo de ¹³⁷Cesio (Cs) producido por la industria nuclear en la década de 1950. Estos dos isótopos poseen una vida media ($T_{1/2}$) de 22.3 años y 30 años, respectivamente (El-Daoushy, 1988) lo que facilita el uso de estos dos elementos como geocronómetros para los últimos 150 años de deposición de sedimento en ambientes lacustres (e.g. Appleby et al., 1976; Cahill y Steele, 1986).

4.3. Análisis físicos

El primer análisis físico, en cualquier estudio paleolimnológico, consiste en la descripción litológica y estratigráfica de los núcleos. Estudios adicionales incluyen la determinación del contenido total de agua, materia orgánica, carbonatos y silicatos. Estos ensayos se realizan por el proceso de secado y combustión del sedimento a diferentes temperaturas (Dean, 1974). El contenido total de agua en el sedimento se obtiene mediante pesado y secado a 100°C. El contenido de materia orgánica se obtiene mediante quema a 550°C, y los carbonatos son convertidos a CO₂ a una temperatura de 950°C. La lectura de estos análisis es importante para inferir cambios ocurridos en la cuenca de drenaje. Sin embargo, los resultados obtenidos deben ser examinados con cuidado. Un cambio ambiental en la cuenca de drenaje (e.g. deforestación) puede generar un aumento tanto en el porcentaje de materia orgánica como inorgánica, creando una lectura disímil de un mismo cambio ambiental.

Los análisis del tamaño de las partículas sedimentarias (granulometría) se realizan, con la ayuda de un juego de tamices (de cobre o acero) sobre el sedimento seco. El sedimento se clasifica según su tamaño en arcilla (<0.002 mm), limo (0.002 mm a 0.06 mm), arena (0.06 mm a 2.0 mm) y grava (> 2.0 mm). Mediante los análisis granulométricos es posible inferir cambios ambientales tanto en el cuerpo de agua como en su cuenca de drenaje y con ésto inferir cambios en la dinámica de sedimentación. En general, altos contenidos de arcilla sugieren condiciones hidrodinámicas de baja energía, propias de ambientes lénticos, mientras que altos contenidos de arena sugieren condiciones hidrodinámicas de alta energía, propias de ambientes lóticos.

4.4. Análisis químicos

Diferentes análisis químicos se pueden realizar a los sedimentos de ecosistemas lacustres, los cuales dependen, a su vez, de los objetivos del estudio. Cuando el cuerpo de agua presenta problemas ambientales de eutroficación los análisis químicos a realizar incluyen la medición en el sedimento de nutrientes como fósforo, carbono y nitrógeno total. Otro tipo de análisis químicos incluye la medición del contenido de metales pesados (i.e. cadmio, arsénico, mercurio) cuando en la cuenca de drenaje existen procesos industriales o de minería que afectan el cuerpo de agua. En Colombia existen diferentes laboratorios que realizan tanto mediciones de nutrientes como de metales pesados en sedimentos. Sin embargo, dentro de las herramientas paleolimnológicas, la isotopía estable es una de las herramientas más útiles. Su uso en Colombia se ha visto limitado por los costos de los equipos. Los isótopos estables han sido ampliamente utilizados en estudios limnológicos y paleolimnológicos a nivel mundial. Los isótopos estables de oxígeno han sido empleados como indicadores paleo-hidrológicos y de temperatura en cuerpos lacustres (e.g. Abbott et al., 2003), los isótopos de azufre como indicadores de depositación ácida (e.g. Bindler et al., 2002), mientras que los isótopos de carbono y nitrógeno sirven para el estudio de cadenas tróficas en ecosistemas lacustres (e.g. Perga y Gerdeaux, 2003).

4.5. Análisis paleobiológicos

En el sedimento lacustre existen diversas formas de vida bentónicas. La diversidad de especies y el número de organismos por especie se encuentran estrechamente relacionados con la calidad de las aguas y con el sedimento donde habitan, por lo que algunas de ellas se denominan especies bioindicadoras (i.e. Gast y Ayala, 1992). La selección de organismos bioindicadores debe basarse en el estado del conocimiento actual del organismo a estudiar (a nivel fisiológico y ecológico). Además, un organismo bioindicador debe ser: (1) abundante y fácil de identificar taxonómicamente (Gast y Ayala, 1992), (2) sensible a cambios ambientales de corta escala temporal y espacial y (3) poseer la habilidad para señalar la recuperación de las zonas degradadas. (i.e. Haug et al., 1974; Phillips, 1980; Dixit y Smol, 2000).

Entre los organismos comúnmente utilizados como bioindicadores en estudios paleolimnológicos se encuentran las diatomeas (i.e. pH, nutrientes, salinidad), tecamebas (i.e. pH, metales pesados), y en el caso de lagos salinos, los foraminíferos (salinidad).

Cuando se usan organismos como bioindicadores ambientales es fundamental el conocimiento de sus preferencias ecológicas. De esta forma es posible desarrollar funciones de transferencia, con las que se relaciona la abundancia relativa (%) de las especies con variables ambientales del ecosistema (Birks et al., 1990). Las funciones de transferencia se usan en estudios paleolimnológicos para predecir valores ambientales basados en información biológica. Aunque existen diversos modelos matemáticos para estas funciones para organismos como las diatomeas (e.g. Battarbee et al., 1999) o crisófitas (e.g. Smol, 1995,) éstos fueron desarrollados para ecosistemas de zonas templadas. Por lo tanto, es importante desarrollar funciones de transferencia para diferentes grupos de micro-organismos en Colombia.



La información obtenida mediante el estudio de los indicadores (físicos, químicos y biológicos) en sucesiones sedimentarias lacustres, que han sido calibrados apropiadamente mediante un buen número de dataciones radiométricas, permite no solo reconstruir la historia paleoambiental (sedimentaria, paleohidrológica y paleoclimática) sino también conocer las tasas de sedimentación. La historia paleoambiental de la cuenca, así inferida, permite evaluar el impacto ambiental de las diferentes actividades antrópicas tanto en la cuenca de drenaje como en las aguas del embalse (i.e. Einsele y Hinderer, 1997; Yoshikawa et al., 2000).

5. CONCLUSIONES

Estudios paleolimnológicos en embalses artificiales colombianos ayudarían al diagnóstico ambiental de estos ecosistemas que son de gran importancia ambiental y socio-económica para

el país. El análisis de los sedimentos en la dimensión temporal permitiría reconstruir el estado ambiental actual, determinar el efecto de cambios naturales o intervenciones antrópicas sobre el estado ambiental del ecosistema y evaluar las medidas de manejo aplicadas en el pasado. En este contexto, se podría establecer el efecto y la dinámica de evoluciones ecosistémicas e intervenciones antrópicas sobre un embalse y su cuenca de drenaje. Los resultados constituirán un sustento para la toma de decisiones orientadas al manejo y conservación de embalses y los ecosistemas asociados a éstos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, M. B., et al, 2003. Holocene paleohydrology and glacial history of the central Andes using multiproxy lake sediment studies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1-3), pp. 123-138.
- Angel, E., 2000. Métodos cuantitativos para la toma de decisiones ambientales. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín. Todográficas Ltda. 152 p.
- Appleby, P. G., et al., 1976. ^{210}Pb dating of annually laminated lake sediments from Finland, *Nature*, 280, pp. 53-55.
- Battarbee, R. W., Charles, D. F., Dixit, S. S., Renberg, I., 1999. Diatoms as indicators of surface water acidity. En: Stoermer, E. F., Smol, J. P. (eds). *The Diatoms: Applications for the environment and Earth Sciences*. Cambridge University Press. pp. 85-127.
- Bindler, R., Korsman, T., Renberg, I., Hogberg, P., 2002. Pre-industrial atmospheric pollution: Was it important for the pH of acid-sensitive Swedish lakes? *Ambio*, 31(6), pp. 460-465.
- Birks, H. J. B., Line, J. M., Juggins, S., Stevenson, A. C., Ter Braak, C. J. F., 1990. Diatoms and pH reconstruction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 327, pp. 263-278.
- Brenner, M., et al, 2002. Limnología y Paleolimnología de Peten, Guatemala, En: *Revista Universidad del Valle de Guatemala*, 12, pp. 2-9.
- Brenner, M., 1995. A call for paleolimnology studies in the tropics, *Journal of Paleolimnology*, 13, pp. 89-92.
- Brenner, M., Leyden, B. W., Curtis, J. H., Medina-Gonzalez, R. M., Dahlin, B. H., 2000. Un registro de 8000 años del paleoclima del noroeste de Yucatan, México, En: *Revista de la Universidad de Yucatan*, 213, pp. 52-64.
- Cahill, R. A., Steele, J. D., 1986. ^{137}Cs as a tracer of recent sedimentary processes in Lake Michigan, *Hydrobiología*, 143, pp. 29-35.
- Castaño, E., Palacio, J. A., 1999. Análisis del nivel de oxígeno disuelto en el agua en varios sitios de una represa, En: *Revista Facultad de Ingeniería*, 11, pp. 156-164.
- Cordeiro, R. C., et al, 2002. Forest fire indicators and mercury deposition in an intense land use change region in the Brazilian Amazon (Alta Floresta, MT), *The Science of the Total Environment*, 293, pp. 247-256.
- Dapples, F., et al., 2002. Paleolimnological evidence for increased landslide activity due to forest clearing and land use since 3600 cal BP in the western Swiss Alps, *Journal of Paleolimnology*, 27, pp. 239-248.
- Dean, Jr. W., 1974. Determination of Carbonate and Organic Matter in Calcareous Sediments and Sedimentary Rocks by Loss on Ignition: Comparison with other Methods, *Journal of Sedimentary Petrology*, 44, pp. 242-248.
- Dixit, S. S., Smol, J. P., 2000. Sedimentary Diatoms and Chrysophytes as Indicators of Lakewater Quality in North America. En: Ronald E., Martin. (Eds). *Environmental Micropaleontology*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York. pp. 279 - 301.
- Einsele, G., Hinderer, M., 1997. Terrestrial sediment yield and the lifetimes of reservoirs, lakes and larger basins, *Geol Rundsch*, 86, pp. 288-310.
- El-Daoushy, F., 1988. A summary on the lead 210 cycle in nature and related applications in Scandinavia, *Environmental International*, 14, pp. 305-319.
- Fisher, M. M., Brenner, M., Reddy, K. R., 1992. A simple, inexpensive piston corer for collecting undisturbed sediment/water interface profiles, *Journal of Paleolimnology*, 7, pp. 157-161.



- Frey, D. G., 1988. What is paleolimnology? *Journal of Paleolimnology*, 1, pp. 5-8.
- Fritz, S. C., Juggins, S., Battarbee, R. W., Engstrom, D. R., 1991. Reconstruction of past changes in salinity and climate using a diatom-based transfer function, *Nature*, 352 p.
- Gast, F., Ayala, A. V., 1992. Bioindicadores para el control ambiental, *Contaminación ambiental*, 4(23), pp. 25 - 36.
- Goldsmith, E., Hildyard, N., 1984. The social and environmental effects of large dams. Vol 1. Waderbridge, Ecological Centre, U.K.
- Haug, A., Melson, S., Omang, S., 1974. Estimation of heavy metal pollution in two Norwegian fjord areas by analysis of the brown alga *Ascophyllum nodosum*, *Environmental Pollution*, 7, pp. 179 - 192.
- Horn, S. P., 1992. Holocene Fires in Costa Rica *Biotrópica*, 24(3), pp. 354 - 361.
- Márquez, G., Guillot, G., 2001. Ecología y efecto ambiental de embalses. Aproximación con casos colombianos. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. 218 p.
- Mera, E. M., 1994. Evaluación del potencial tóxico de los metales pesados y pesticidas ligados al sedimento del embalse El Peñol, Guatapé, en el departamento de Antioquia. Trabajo de Investigación de MSc. Instituto de Biología, Universidad de Antioquia, Medellín.
- Neumann, T., et al, 2002. Stable Isotopes in recent sediments of lake Arendsee, NE Germany: response to eutrophication and remediation measures, *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 178, pp. 75 - 90.
- Niño, J. P., Guillot, G., 2004. Variación espacio-temporal de las tasas de sedimentación del nitrógeno y fósforo en el seston del embalse del Neusa, Colombia, *Actualidades Biológicas*, 26(80). pp. 39-49.
- Page, M., Trustrum, N., 2000. High resolution lake sediments from New Zealand – a record of late Holocene storm history, vegetation change and landscape response, *Pages Newsletter*, 3, pp. 1- 18.
- Patterson, R. T., Kummar, A., 2000. Assessment of arcellacean (thecamoebian) assemblages, species, and strains as contaminant indicators in James lake, northeastern Ontario, Canada, *Journal of Foraminiferal Research*, 30, pp. 310 - 320.
- Patterson, R. T., Barker, T., Burdidge, S., 1996. Arcellaceans (thecamoebians) as proxies of arsenic and mercury contamination in northeastern Ontario lakes, *Journal of Foraminiferal Research*, 26, pp. 172 - 183.
- Perga, M. E., Gerdeaux, D., 2003. Using the delta C-13 and delta N-15 of whitefish scales for retrospective ecological studies: changes in isotope signatures during the restoration of Lake Geneva, 1980-2001, *Journal of Fish Biology*, 63(5), pp. 1197 - 1207.
- Phillips, D. J. H., 1980. Quantitative aquatic biological indicators. Ed. Applied Science Publishers, London. 487 p.
- Ramírez, J. J., Bicudo, C. E., Roldán, G., 2000 Temporal and vertical variations in phytoplankton community structure and its relation to some morphometric parameters of four Colombian reservoirs, *Caldasia*, 22, pp. 108 - 126.
- Ramírez, J. J., Machado, T., 1982. Influencia de la precipitación y los ortofosfatos en el fitoplancton de la represa de La Fe, *Actualidades Biológicas*, 11(39), pp. 3 - 21.
- Revenge, C., et al, 2000. Pilot Analysis of Global Ecosystems: Freshwater Systems. Available on line: <http://www.wri.org/wr2000>. World Resource Institute, Washington D.C. 65 p.
- Roldán, G., 2003. Implicaciones ecológicas en la construcción de embalses en Colombia, *Revista Universidad Católica de Oriente*, 16, pp. 71 - 83.
- Roldán, G., 1976. Estudio ecológico de eutroficación en lagos y embalses colombianos, En: *Contaminación Ambiental*, 2, pp. 51 - 56.
- Roldán, G., 1982. Algunas condiciones ecológicas acerca de los embalses, *Contaminación Ambiental*, 6, pp. 13 - 20.
- Roldán, G., 1992. Fundamentos de limnología neotropical. Editorial Universidad de Antioquia. 529 p.

- Roldán, G., 2000. Estudio limnológico del embalse del Guavio (Colombia), En: Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 24, pp.73 - 84.
- Sandiford, A., Alloway, B., Shane, P., 2001. A 28000 – 6600 cal yr record of local and distal volcanism preserved in a paleolake, Auckland, New Zealand, New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 44(2), pp. 323 - 336.
- Simola, H., 1983. Limnological Effects of Peatland Drainage and Fertilization as Reflected in the Varved Sediment of a Deep Lake, Hydrobiologia, 106(1), pp. 43 - 57.
- Simola, H., Huttunen, P., Uronen-Simola, P., Selin, P., Merilainen, J., 1988. Effects of peatland forestry management and fuel peat mining in lake Ilajanjärvi, East Finland: A paleolimnological study. Proceedings of the International Symposium on the Hydrology of Wetlands in Temperate and Cold Regions. The Academy of Finland, Helsinki, Finland. 285-290 p.
- Smeltzer, E., Swain, E. B., 1985. Answering lake management questions with paleolimnology. En: Lake and Reservoir management – Practical applications. Proceedings of the Fourth Annual Conference and International Symposium. pp. 268 - 274.
- Smol, J. P., 1995. Application of chrysophytes to problems in paleoecology. En: Sandgren, C., Smol, J. P., Kristiansen, J., (eds), Chrysophyte algae: Ecology, Phylogeny and Development. Cambridge University Press. pp. 303 - 329.
- Vargas, R. A., Ramírez, J. J., 2002. Variación espacio-temporal de las tasas de sedimentación del material sestónico en un embalse tropical de alta montaña: Represa la Fe, El Retiro, Antioquia, Colombia, Actualidades Biológicas, 24(77), pp. 163 - 170.
- Whitmore, T. J., 1991. Sedimentary diatom concentrations and accumulation rates as predictors of lake trophic state, Hydrobiologia, 214, pp. 163 - 169.
- Wright, Jr. H. E., 1991. Coring tips, Journal of Paleolimnology, 6, pp. 37 - 49.
- Yoshikawa, S., Yamaguchi, S., Hata, A., 2000. Paleolimnological investigation of recent acidity changes in Sawanoike Pond, Kyoto, Japan, Journal of Paleolimnology, 23, pp. 285 - 304.



