

# Isótopos Estables de Oxígeno y Carbón en Carbonatos, y de Carbón en la Materia Orgánica de una Secuencia Sedimentaria del Lago de Texcoco, México

*$\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  in carbonates, and  $\delta^{13}\text{C}$  in organic matter in a sedimentary sequence of the Lake Texcoco, Mexico*

Javier A. Alcalá-Herrera\*, Bernardo García-Romero\*, María Luisa Machain-Castillo‡, Terry L. Wade\* y F. Raúl Gío-Argáez‡

## RESUMEN

Sedimentos depositados en el Lago de Texcoco, Estado de México preservaron la evolución natural y el impacto antropogénico en dicho sistema. Además de la edad de las muestras seleccionadas, se presentan resultados biogeoquímicos realizadas en un núcleo sedimentario de 80 cm de largo (~110 años). Se reportan contenido de materia orgánica y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ , contenido de carbonatos y oxígeno  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  y granulometría. Los parámetros muestran variaciones con profundidad y cambios en sus tendencias antes y después de la sección 26-28 centímetros. La materia orgánica varía de 2.96% a 0.52%.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  indica procesos cíclicos en la proporción del material aportado por varias fuentes atribuidas a materia orgánica producida por plantas C4, (pastos ~-13‰), plantas C3 (tules ~-28‰), y fitoplancton (~-35‰). La sección 26-28 ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = -24.1‰$ ) representa el momento en que el Lago de Texcoco fue secado. Porcentajes de carbonatos varían de 1.7% a 0.5%. La correlación entre  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  indica que en el Lago de Texcoco la evaporación fue mayor que el aporte de agua dulce. La granulometría muestra que en la parte más profunda hasta la sección 26-28 cm los sedimentos están compuestos primordialmente de arcillas+limos (>95%), y posteriormente existe un incremento en las arenas. Con los resultados obtenidos se determinan cambios relativos de salinidad y/o temperatura en los últimos 150 años. Este trabajo es base para posteriores estudios históricos de contaminación en el Valle de México.

**Palabras clave:** isótopos del carbón, isótopos del oxígeno, Lago de Texcoco, cambios climáticos.

## ABSTRACT

Sediments deposited in Lake Texcoco, State of México, record the evolution and the anthropogenic impact of Mexico City on the surrounding region. Biogeochemical analysis of an 80 cm long sediment core is reported in this paper. The sediments were dated and analyzed for: organic matter percentage and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ , carbonate percentage,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ , and grain size. The organic matter percentages range from 2.96% to 0.52%, with a minimum at 26-28 cm. The  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  shows five cycles associated with different sources of organic matter. These variations are due to the different proportions of organic matter produced by C4 plants (grasses ~-13‰), C3 plants (typha ~-28‰), and phytoplankton (~-35‰). The  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  values vary from a maximum of -20.3‰ to a minimum of -24.1‰ at 26-28 cm. The carbonate percentages range from 1.74% to 0.52%.  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  vs  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  values indicate that the rate of evaporation was greater than fresh-water inputs. Grain size results indicate a composition of primarily clays and silts (>95%) between 26 and 80 cm, with an increase in sand percentage nearer the surface. The biogeochemical analyses performed determined the relative changes of the environment, such as salinity and temperature, which prevailed in Lake Texcoco during the last 150 years.

**Key word:**  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , Lake Texcoco, changes environment.

\*Geochemical and Environmental Research Group, Texas A&M University, 833 Graham Road, College Station, TX 77845, USA

‡Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Apartado Postal 70-305, Universidad Nacional Autónoma de México, México 04510, D.F.

## Introducción

Secuencias sedimentarias depositadas en lagos han preservado registros de eventos regionales que ocurrieron en el pasado. Ejemplos de dichos registros se tienen en la cantidad y el origen de la materia orgánica depositada, evaporación y precipitación, e impactos antropogénicos (Talbot, 1990; Alcalá-Herrera *et al.*, 1994). Análisis geoquímicos, como son isótopos estables de carbono y oxígeno y metales traza, han proporcionado con información pertinente para la reconstrucción de las condiciones ambientales y la evolución del ecosistema (Giresse *et al.*, 1994). En los últimos años ha existido un aumento en el interés por estudiar ambientes lacustres para reconocer cambios ecológicos. El Lago de Texcoco en el Valle de México, presenta una oportunidad para llevar a cabo análisis de secuencias sedimentarias en las cuales se registran los cambios naturales que ocurrieron en el pasado.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar los cambios ambientales que ocurrieron en el Lago de Texcoco durante aproximadamente los últimos 110 años. Estos cambios ambientales fueron el resultado de ciclos naturales que propiciaron cambios en el nivel del lago y a la vez fueron influenciados por asentamientos humanos. La influencia antropogénica en el Lago de Texcoco ha aumentando exponencialmente desde la década de los cuarenta debido a la rápida industrialización de la Ciudad de México. Para poder cumplir con ese objetivo se estudió un núcleo de 80 cm de largo colectado en el Lago de Texcoco, Ecatepec de Morelos, Estado de México, representando aproximadamente 110 años. Fueron estudiados los isótopos estables de la materia orgánica ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) y de los carbonatos ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$ ), el porcentaje de materia orgánica y carbonatos y la granulometría. Estos resultados fueron correlacionados con los cambios de temperatura y lluvia registrados en la estación de Tacubaya desde el siglo pasado. Las edades fueron determinadas y publicadas por García-Romero (1996) mediante el análisis de  $\text{Pb}_{210}$ .

## Área de Estudio

El Lago de Texcoco está localizado a una latitud de  $19^{\circ} 30' \text{ N}$  y una longitud de  $99^{\circ} 00' \text{ W}$ , con una elevación aproximada de 2,236 m sobre el nivel del mar (Fig. 1; Bradbury, 1971). Está rodeado por

montañas de aproximadamente 3,000 a 6,000 m de altura y se formó como depósito de los ríos que drenan este sistema montañoso (López-Ramos, 1979). Hace unos 500 años el Lago de Texcoco formaba parte de un lago continuo durante la época de lluvias, y en la época de sequía se dividía en varios pequeños lagos que se conocían como Lago de Zumpango, Xaltocan, San Cristobal, Texcoco, Xochimilco y Chalco y posteriormente, al construir los aztecas un dique, se formó el Lago de México. Una pequeña parte del Lago de Texcoco y partes de los lagos de Xochimilco y Chalco todavía existen. Sin embargo los lagos de México, Zumpango, Xaltocan y San Cristobal han sido secados. El Lago de Texcoco fué el más salino debido al reducido aporte de agua dulce, una alta tasa de evaporación y al aporte de material de manantiales termales (Bradbury, 1971). Los lagos de México, Chalco y Xochimilco tenían salinidades más bajas debido a un continuo aporte de agua de montaña. Los continuos derrames del Lago de Texcoco sobre el Lago de México, Tenochtitlan y posteriormente la Ciudad de México, propiciaron a que el Lago de



Figura 1. Distribución geográfica del Lago de Texcoco. Se muestra la extensión máxima y el tamaño actual, al igual que la extensión de la Ciudad de México en 1974.

Texcoco fuera continuamente drenado comenzando en el siglo XVII y terminando en 1947 (Bradbury, 1971).

La temperatura en la Ciudad de México ha sido relativamente constante durante los últimos 150 años. Datos obtenidos del Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos de 1940 indican que la temperatura anual promedio de 14.7°C prácticamente no varió de 1925 a 1940. Datos obtenidos de 1975-1976 muestran poco cambio en la temperatura anual promedio (15.1°C en 1975 y 14.8°C en 1976). Sin embargo, durante los años de 1973 y 1974 la temperatura promedio anual fue más alta que la de otros años (19.3°C y 19.8°C respectivamente). Consecuentemente, a pesar de las pocas fluctuaciones de temperatura promedio en el Valle de México, en general, se puede considerar que ha habido una tendencia hacia un ligero aumento en temperatura, las cuales se han acentuado durante la década de los noventa debido a la alta contaminación ambiental que existe en la Ciudad de México.

### Métodos

Tres núcleos de aproximadamente 80 cm fueron colectados en Ecatepec de Morelos, Estado de México (Figura 1). El núcleo más largo fue seleccionado para el presente estudio, este se cortó en 40 muestras de 2 cm de grosor. Cada sección fue transferida a frascos de vidrio previamente esterilizados a 400°C para prevenir contaminación de las muestras. Las muestras fueron congeladas y transportadas al laboratorio. Los análisis de isótopos, porcentaje de materia orgánica y carbonatos fueron realizados en el Geochemical and Environmental Research Group (GERG) de la Universidad de Texas A&M. Las edades basadas en  $Pb_{210}$  fueron determinadas en las instalaciones de la Universidad de Texas A&M en Galveston.

Las edades de cuatro muestras fueron determinadas utilizando el exceso de  $Pb_{210}$  y  $Cs_{137}$  y un modelo de acumulación constante (CRS). La técnica, los materiales y los químicos utilizados para hacer las determinaciones de las edades se encuentran descritos en García-Romero (1996). Otros factores, como el primer registro de DDT, son marcadores históricos que fueron utilizados para confirmar las edades. Basados en edades obtenidas y extrapolaciones, se obtuvo un núcleo de edad de 1890

con edades intermedias de 1970 en el centímetro 14-16 y de 1953 en el centímetro 24-26.

En el análisis de la composición isotópica de carbono de la materia orgánica se utilizaron 5 g de muestra. Los sedimentos se acidificaron con ácido clorhídrico al 5% para remover los carbonatos. La acidificación fue repetida hasta no observar reacción. Las muestras fueron lavadas tres veces con aproximadamente 5 ml de agua destilada para remover el exceso de ácido. Posteriormente las muestras se secaron a 50°C y se colocaron en cápsulas de vidrio de cuarzo con aproximadamente 2 g de óxido cúprico ( $CuO_2$  grueso). Se pusieron al vacío por un minuto y se sellaron, las muestras fueron quemadas por 3 hrs. a 800°C y se enfriaron lentamente por 4 hrs. El  $CO_2$  producido por la combustión del material orgánico fue purificado por medio de trampas criogénicas y analizado en una espectrómetro de masas Finnigan MAT 251 con tres colectores.

Para los isótopos de oxígeno y carbón de la parte inorgánica, aproximadamente 0.5 g de muestra fue quemada a 360°C por una hora para destruir la materia orgánica. La muestra se hizo reaccionar con ácido fosfórico al 100% a una temperatura de 50°C por aproximadamente dos horas para asegurar una completa digestión de los carbonatos. El  $CO_2$  producido fue criogénicamente separado y analizado en el espectrómetro de masas Finnigan MAT 251. Fueron analizados tanto en el análisis de isótopos de la materia orgánica como de carbonatos estándares (Ostrech II y NBS-19 respectivamente) y se analizaron muestras en duplicados para asegurar la precisión de los resultados. Basados en esos análisis se considera que la precisión es de 0.1‰ para  $\delta^{18}O$  y de 0.05‰ para  $\delta^{13}C$ . La conotación convencional delta ( $\delta$ ) es utilizada en el presente artículo.

El carbono total (TC) y el carbono orgánico total (TOC) fueron obtenidos utilizando métodos convencionales. Se utilizó un horno de inducción LECO y la cantidad de  $CO_2$  fue medida por un detector infrarojo Horiba PIR-2000. Para el TOC se utilizó la misma técnica pero acidificando los sedimentos para remover los carbonatos. Para determinar la precisión de la técnica se corrieron 12 estándares; la precisión de la técnica es  $\pm 0.29\%$  para TC y  $\pm 1.54\%$  para TOC. El carbonato de calcio se obtuvo por la diferencia del TC y el TOC (Friedman y Sanders, 1978).

## Resultados y discusión

La variabilidad y fluctuaciones observados en los resultados obtenidos sugieren que no hubo contaminación entre los sedimentos superficiales y los profundos después de su depositación. Igualmente las muestras registraron cambios en los procesos que afectaron el Lago de Texcoco, como es la reducción en tamaño del lago.

Resultados preliminares de  $Pb_{210}$  indica que la muestra 24-26 fué depositada en el año  $1953 \pm 5$  (García-Romero, 1996). Los resultados de  $\delta^{13}C_{inorg}$  y  $\delta^{18}O_{inorg}$  indican que hubo cambios drásticos en la muestra 26. Esto puede estar relacionado con el secado del Lago de Texcoco en 1945 que lo redujo a su tamaño actual, cambios en la cantidad de lluvias y a variaciones en la productividad del lago. Si se considera una sedimentación constante, se puede pensar que los 80 cm que tiene este núcleo representan aproximadamente 110 años. Determinaciones de edades utilizando  $Cs_{137}$  no fueron muy útiles.  $Cs_{137}$  fue derminado en muestras arriba del centímetro 14 con ausencia total por debajo del centímetro 26, lo que sugiere edades anteriores a 1954. Finalmente, la estimación de las edades es de 1970 para el centímetro 14-16 y de 1953 para el centímetro 24-26.

## Descripción de los resultados de TOC y $\delta^{13}C_{org}$ del Carbón Orgánico

Los sedimentos estudiados son bajos en el porcentaje de la materia orgánica debido al carácter salobre del Lago de Texcoco. El Lago de Texcoco tuvo poca diversidad, poca abundancia de organismos y muy probablemente poca productividad durante los últimos 110 años. Resultados de muestras del Lago de Xochimilco, por otro lado, tienen una mayor cantidad de materia orgánica ( $\sim 10\%$  o mayor) consecuencia de alta productividad y mediana diversidad de especies acuáticas (García-Romero, 1996). El porcentaje de TOC varía de un máximo de 2.96% a un mínimo de 0.52% con un promedio de 1.15%. El TOC tiende a ser más alto en la parte mas profunda y en la muestra más somera del núcleo (Fig. 2). La disminución del porcentaje de la materia orgánica alcanza un punto mínimo en las profundidades de 32-34 cm y 24-26 cm. Hay un aumento en la cantidad de materia orgánica observada en la cima del núcleo, sin embargo es difícil explicar el aumento del porcentaje de materia orgánica de esta muestra.

Los resultados del carbón orgánico  $\delta^{13}C_{org}$  son presentados en la Figura 2. Los valores isotópicos varían entre  $-20.3\%$  a  $-21.8\%$ . Sin embargo, existen

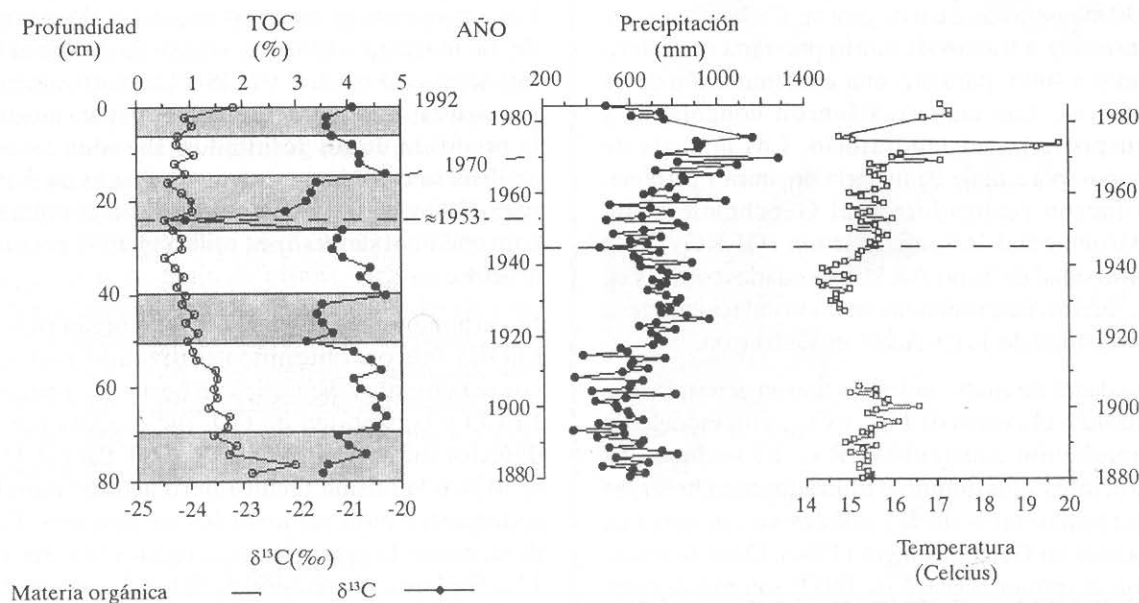


Figura 2. Variaciones del porcentaje de materia orgánica (TOC), su correspondiente composición isotópica y los resultados de lluvia y temperatura de la estación Meteorológica de Tacubaya. Las zonas oscuras representan tiempos de valores isotópicos bajos de la materia orgánica y las zonas claras zonas de valores altos. Las zonas claras tienen una mejor correlación con temperaturas.

dos valores isotópicos (-24.1‰ y -22.1‰) fuera de este rango identificado en las profundidades de 24 y 26 cm, respectivamente.

Los resultados muestran una repetición cíclica de aproximadamente cada 25 cm. Tres ciclos están muy bien definidos, dos ciclos adicionales pueden ser identificados en la parte inferior de la sección.

El primer ciclo, en la parte inferior del núcleo, incluye 8 centímetros. Los valores del  $\delta^{13}\text{C}$  varían de -21.5‰ a -20.7‰ disminuyendo nuevamente a -21.2‰. El segundo ciclo incluye los siguientes 10 cm de la muestra 70 a 60 cm. La composición isotópica de -21.2‰ a la profundidad de 72 cm, rápidamente aumenta a -20.5‰, alcanzando su valor máximo en la muestra 68 cm de -20.3‰ y disminuyendo a -20.9‰. Estos dos ciclos no son muy evidentes, sin embargo, los procesos de compactación muy probablemente son la causa de que esos ciclos sean poco conspicuos.

Tres ciclos bien diferenciados corresponden a los 50 cm de la parte superior de la sección estudiada. El tercer ciclo es observado de la muestra del cm 58 con un  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  de -20.4‰. Los valores se hacen más negativos hasta alcanzar -21.6‰ y -21.5‰ en la muestra a una profundidad de 44 cm.

El cuarto ciclo se observa de la muestra 40 cm a la muestra 15 cm. Las muestras con valores más negativos en el núcleo se encontraron en este intervalo (muestra a 26 cm de profundidad). El evento que produjo estos resultados negativos impactó el ambiente de tal manera, que los valores isotópicos no se recuperaron a valores normales hasta la muestra en el centímetro 18. Estos ciclos son ilustrados en la Figura 2 para su mejor entendimiento.

#### Cambios Ambientales del Lago de Texcoco

Los cambios en la geoquímica del agua y sedimentos ocurridos en el Lago de Texcoco durante los últimos 110 años han sido poco estudiados. El impacto humano en los últimos 3000 años hace difícil el reconocer la flora y fauna naturales y su evolución. Sin embargo, el impacto más fuerte del Lago de Texcoco y áreas adyacentes ha sido en los dos últimos siglos. El Lago de Texcoco disminuyó aproximadamente de su tamaño máximo durante la época de los aztecas (Fig 1), a una tercera parte para el año de 1848 (Lira, 1983). En 1945 el Lago de Texcoco se redujo a su tamaño actual con una extensión máxima en época de lluvias de aproximadamente 200 km<sup>2</sup> (Bradbury, 1971).

Los resultados de la composición isotópica de la materia orgánica se ilustran en la Figura 2 y se comparan con los resultados de lluvia y temperaturas publicados por el Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos (1940, 1959 y 1979). El origen de la materia orgánica está relacionada con el tipo de vegetación que existe en el área, la cual a la vez está en función de las condiciones. El porcentaje de materia orgánica en los sedimentos colectados no es muy alta, consecuentemente se puede decir que la productividad, transporte y preservación de materia orgánica fue baja. El alto porcentaje de limos y arcillas (Fig. 4) sugiere que hubo poca perturbación de los sedimentos y que cualquier proceso que pudo haber perturbado los sedimentos, ya sea en transporte horizontal o de manera vertical, fueron de poca duración. El aumento en la proporción de arenas en la parte superior del núcleo debió ser resultado de la disminución del tamaño del lago, lo cual alteró los procesos de sedimentación y transporte.

Cambios climáticos pueden ser interpretados usando la composición isotópica de la materia orgánica, en conjunción con las plantas que originaron esa materia orgánica. Para poder hacer este tipo de interpretaciones se deben conocer las plantas que originaron la materia orgánica y su composición isotópica. Hasta el momento no se han reportado datos de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  de plantas del Lago de Texcoco. Sin embargo, se tienen estudios de Estados Unidos, Belice y del Estado de Guerrero, México, en los cuales se reportan la  $\delta^{13}\text{C}$  de plantas que existen en Texcoco y que pueden ayudar en la interpretación de los cambios ambientales ocurridos en el área de estudio (Chmura, 1990; Alcalá-Herrera *et al.*, 1994).

Entre las plantas que se conocen del Lago de Texcoco se tienen diferentes especies de *Typhas* (tule), arroz silvestre y una alga azul-verde llamada Tecuilatl (Orozco y Berra, 1864, en Sanders *et al.*, 1979). En el área costera del lago se reportaron pastos resistentes a suelos salinos tales como *Sporobolus plumbens*, *Distichlis prostrata* y *D. Spicata*, junto con diferentes especies de *Typha* predominantes en la región (Sanders *et al.*, 1979). Otras plantas identificadas en el Valle de México son *Carex* sp. (*Carex aztecica*) y *Cyperus* (McClung, 1979). Estas plantas muy seguramente fueron las que aportaron la mayor cantidad de materia orgánica en el Lago de Texcoco. Depósitos de tules o tulares han sido reconocidos en varias localidades en el Lago de Texcoco cerca de antiguos asentamientos humanos.

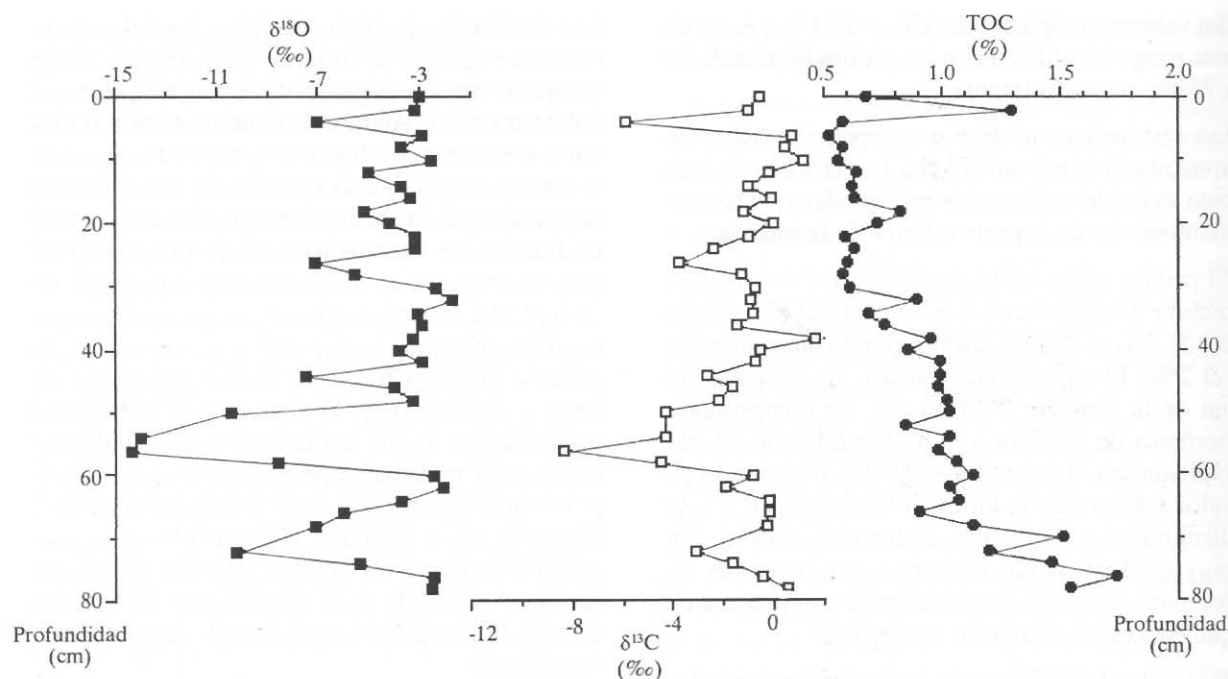


Figura 3. Variaciones de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  y carbono inorgánico total (TIC).

La composición isotópica obtenida para sedimentos del Lago de Texcoco (rango promedio de  $-21.8\text{‰}$  a  $-20.3\text{‰}$ ) sugiere que hubo una contribución relativamente constante de materia orgánica de plantas C3 y C4. Por los género de plantas reportadas para el Lago de Texcoco y zonas aledañas, plantas de tipo C4 ( $-13.0\text{‰}$ ) como son *Cyperus*, *Distichlis prostrata* y *D. spicata*, y probablemente *Sporobolus plumbens*, pudieron haber aportado hasta el 40% de la materia orgánica. Plantas C3 (*Typha* spp.,  $-28.0\text{‰}$ ; *Carex* spp.,  $-30.6\text{‰}$ ) con composición isotópica aproximada de  $-29.0\text{‰}$  y el fitoplancton de composición de  $-35.0\text{‰}$  (Hamilton and Lewis, 1992), pudieron haber aportado el resto de la materia orgánica. Variaciones en la mezcla de las diferentes contribuciones a la materia orgánica se verán reflejados en diferentes ciclos observados en la composición isotópica. Estos ciclos deben estar relacionados primordialmente con épocas de sequías, aunque otros factores deben haber influenciado la composición isotópica de la materia orgánica, como pueden ser procesos de transporte y productividad. Las variaciones que se observan en los isótopos estables del carbón, además de temporadas se pueden interpretar como variaciones en la productividad del Lago de Texcoco. En general un aumento en lluvia tendría como consecuencia un mayor acarreo de materia orgánica, lo que produciría una mayor

productividad del Lago de Texcoco. El aumento en lluvia y productividad se reflejaría en valores isotópicos más negativos debido a que la materia orgánica acarreada procedería de plantas C3, y la materia orgánica producida por una alza en productividad sería el resultado de una mayor concentración de fitoplancton dulceacuícola. Hamilton y Lewis (1992) indicaron que en estuarios el fitoplancton aporta cantidades menores en la materia orgánica. Sin embargo, las condiciones en el Lago de Texcoco son diferentes a otros lagos y condiciones de estuarios, en que la producción total de materia orgánica es muy baja, debido a las condiciones salobres del lago, por lo que un ligero aumento en productividad pudo haber producido un cambio relativamente significativo en la composición isotópica de la materia orgánica. La productividad del Lago de Texcoco debió haber sido menor que la de los lagos de Xochimilco y Chalco, que eran lagos dulces, en los cuales la cantidad de materia orgánica preservada en sedimentos es muchos mayor (García-Romero, 1996).

Como era de esperarse, no existe una correlación exacta de los eventos de sequías y lluvias, con respecto a los cambios isotópicos de la materia orgánica. Sin embargo, la anomalía en el centímetro 26 que corresponde a 1953, es un año en que la Ciudad de México sufrió una de las inundaciones que

comunmente ocurrieron durante la década de los 50 (Espinosa-López, 1991). Estas inundaciones, además de corresponder a una cantidad de lluvia mayor que lo que normalmente se tiene en la Ciudad de México, también se relacionan a la falta de buen drenaje de la ciudad. La mayor inundación registrada en la Ciudad de México ocurrió en 1958 (Espinosa-López, 1991), la  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  obtenida fue por debajo del promedio (-21.5) lo que refleja condiciones relativamente húmedas. En general los valores menos negativos se pueden interpretar en condiciones mas secas, mientras que los resultados mas negativos se tendrían condiciones menos secas. Sin embargo las condiciones menos secas debieron haber tenido una influencia antropogénica la cual es complicada de poder interpretar.

Durante el periodo de 1973-1974 ocurrieron una gran cantidad de precipitaciones en la Ciudad de México. Esto concuerda con un aumento en la composición isotópica del carbono en la materia orgánica. Un análisis mas detallado de los datos de lluvia durante ese periodo de tiempo, indica que el más alto nivel de precipitación se concentró primordialmente en el mes de septiembre y altas temperaturas se dieron durante el resto del año, lo cual explica la alza en el aumento del  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ . De igual manera, las variaciones en la productividad del Lago de Texcoco debieron haber afectado la composición isotópica de la materia orgánica. Una mayor productividad se reflejaría en resultados más negativos.

#### $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$ y $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ en carbonatos y porcentaje de carbonato

Se determinaron el porcentaje de carbonatos (TIC; Total Inorganic Carbon) y su composición isotópica del carbón y oxígeno (Fig. 3). El porcentaje de TIC es bajo con un valor máximo de 1.74% (76-78 cm) y mínimo de 0.52% (6-8 cm). El promedio de todos los valores de porcentaje de carbonatos es 0.92%. La curva de TIC muestra que en la sección de 6 a 40 cm la mayoría de los resultados se encuentran por debajo del promedio. En el centímetro 40 la mayoría de los valores son más altos que el promedio. La continua disminución de carbonato de calcio en los sedimentos puede estar relacionada con la acidez del Lago de Texcoco, que aumenta concordante al aumento de contaminantes en el agua.

La curva de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  presenta valores negativos que pueden representar ciclos ambientales. El primer ciclo se encuentra representado en la profundidad

del centímetro 74, con valores negativos de aproximadamente -10.0‰. En el centímetro 64 el  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  tiene un resultado de -2.1‰. Nuevamente hay una disminución en el intervalo de 50 a 60 centímetros, alcanzando valores de -14.4‰. Alrededor del centímetro 50 el  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  ha regresado a valores mas positivos (aproximadamente -3.0‰) donde se mantiene por los siguientes 10 centímetros. Valores negativos vuelven a aparecer alrededor del centímetro 28, sin embargo, estos resultados no son tan negativos como en los valores previos negativos (aproximadamente -7.1‰). El  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  se vuelve mas positivo y se mantiene alrededor de -3.5‰ hasta la parte superior de la columna estratigráfica.

La curva del carbono-13 es en general muy semejante a la curva del oxígeno-18. Valores negativos se observan aproximadamente a las mismas profundidades. Como se mencionó anteriormente, una diferencia significativa se da en el centímetro 40, en el que se obtuvieron valores positivos en la curva de  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ , mientras que en la del  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  los resultados se mantuvieron prácticamente constantes. El porqué de este enriquecimiento únicamente en una muestra, es difícil de explicar. Asimismo, es difícil reconocer ciclicidad en  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  de los carbonatos.

No existe una aparente relación entre el contenido de carbonatos y los valores de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ . El coeficiente de correlación entre  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  y TIC es de únicamente 0.23, y entre  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  y TIC es 0.17. Esto indica que los valores isotópicos son dependientes de procesos intrínsecos del lago, e.g., tiempo de residencia y productividad.

#### Cambios Relativos de Salinidad y Temperatura

La correlación entre los isótopos de carbono y oxígeno y su uso en interpretaciones del tipo de lagos, ya sea abierto o cerrado, ha sido estudiado por Talbot (1990) y Talbot y Kelts (1990). Existen dos tipos de lagos, los abiertos y los cerrados (Talbot, 1990). Lagos de tipo abierto son aquellos que tienen comunicación con otras cuencas, primordialmente por medio de ríos, por lo tanto el tiempo de residencia es relativamente corto. Este tiempo de residencia depende del tamaño del lago y la cantidad de aporte y transporte de agua por ríos. Lagos de tipo cerrado, por otro lado, son aquellos en el que el tiempo de residencia es largo y el aporte y transporte de agua son pequeños, con un largo tiempo de residencia. Esto trae como consecuencia que la composición isotópica tanto del carbono y oxígeno

varíen conjuntamente y por lo tanto el coeficiente de varianza ( $r^2$ ) tiende a ser mayor de 0.5. El coeficiente de correlación entre  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  y  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  (Fig 4) es de  $r=0.77$  ( $n=38$ ) lo que concuerda con el carácter cerrado que históricamente el Lago de Texcoco ha tenido. Similares interpretaciones se tienen para otros lagos con historia semejante (Talbot, 1990; Palacios-Fest *et al.*, 1993). Los cambios isotópicos son debidos a que existe una pérdida del contenido de agua por medio de evaporación primordialmente. Los cambios en la composición química de las condiciones del lago se reflejan en ambos isótopos de oxígeno y carbono. La historia del Lago de Texcoco también apoya el carácter cerrado de la cuenca en los últimos 110 años, en la cual la salida del agua era primordialmente por evaporación o filtración, lo que produjo variaciones en salinidad. Los resultados obtenidos y que se muestran en la Figura 4, indican condiciones presentes en un lago de relativamente gran área en relación a su profundidad (Talbot, 1990). El determinar el tipo de lago es importante, porque los procesos de precipitación y evaporación tienen un gran efecto en las características geoquímicas de la cuenca. El Lago de Texcoco ha estado sujeto a altas tasas de

precipitaciones y evaporación, que han sido registradas en la estación de Tacubaya desde 1880 (Fig.5) y que eventualmente secaron el lago en prácticamente su totalidad. Esos cambios en la precipitación- evaporación están relacionados con variaciones en salinidad y temperatura, que eventualmente afectaron a los organismos que vivieron en el Lago de Texcoco.

En resumen, los cambios de salinidad identificados en el Lago de Texcoco están relacionados con cambios en los niveles del lago y las tasas de precipitación y evaporación, que a la vez se relacionan con cambios climáticos. Las variaciones de temperatura y precipitación (Fig.5) registradas por el observatorio de Tacubaya, Ciudad de México, desde 1880 (Anuario Estadístico de los Estados Unidos Mexicanos, 1979), pueden servir como base para discernir entre efectos naturales y antropogénicos que afectaron el área del Lago de Texcoco. Nueva información disponible en un corto plazo, como son metales traza (e.g., calcio, estroncio, magnesio, plomo, manganeso y azufre) podrán analizarse con respecto a cambios ambientales, de industrialización y desarrollo que ha sufrido el Valle de México.

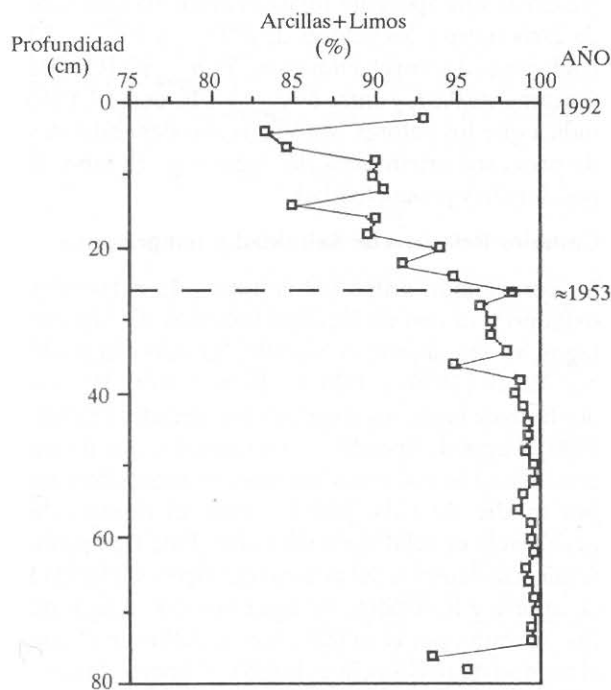


Figura 4. Variaciones en el porcentaje de Arcillas+Limos en el núcleo estudiado. La disminución en sus porcentajes se relacionan a la disminución del tamaño del Lago de Texcoco.

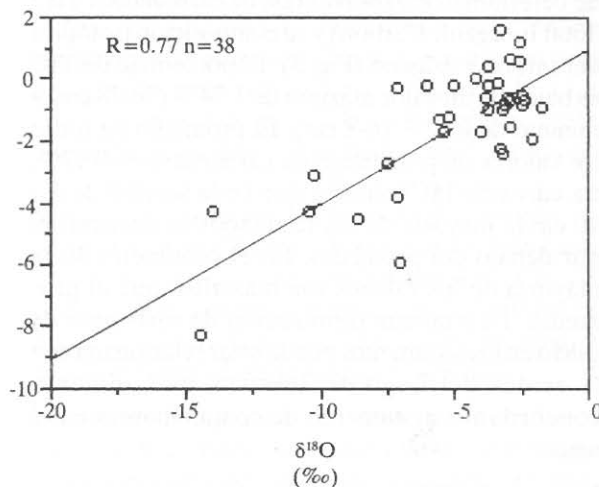


Figura 5. Correlación isotópica del oxígeno y carbono. La alta correlación de la gráfica indica el carácter cerrado, la pendiente el carácter somero del lago.



### Conclusiones

Los análisis geoquímicos realizados en el núcleo del Lago de Texcoco muestran cambios en la dinámica del propio lago, al igual que han registrado los cambios climáticos ocurridos en el Valle de México.

Los limos y arcillas (limos+arcillas) registraron la paulatina reducción del Lago de Texcoco. La parte más profunda presenta un periodo de estabilidad (del centímetro 78 al 40) seguido por un periodo de transición (centímetro 40 al 30) con un periodo de fluctuación (centímetro 28 a la superficie). El periodo de fluctuación corresponde aproximadamente al año de 1953, que fue posterior al tiempo en el cual, el Lago de Texcoco se redujo a su tamaño actual. La reducción en tamaño produjo un aumento en el acarreo de arenas a la localidad en estudio.

Los isótopos de la materia orgánica muestran las plantas que aportaron la mayor cantidad de detritos al lago como son pastos C4 (*Cyperus*, *Distichlis prostrata* y *D. spicata*;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = -13\text{‰}$ ), arbustos C3 (*Typha* spp y *Carex* spp;  $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = -29\text{‰}$ ) y fitoplancton, dulceacuícola ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}} = -35\text{‰}$ ). Los ciclos observados están relacionados a variaciones en periodos secos y de altas temperaturas, periodos de lluvias y a la productividad de fitoplancton muy probablemente en ese rango de importancia. Sedimentos a la profundidad de 26 centímetros se consideran pertenecientes al periodo de post-1945 y la disminución en los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  en este momento sugieren una disminución en el aporte de material procedentes de las plantas C-4 muy probablemente relacionados con la rápida disminución del tamaño del Lago de Texcoco.

La correlación de los isótopos  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  y  $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$  sugieren que el Lago de Texcoco corresponde a un lago cerrado con una gran área en relación a la profundidad, como lo indica el coeficiente de correlación lineal ( $r=0.77$ ). Esto sugiere que procesos de evaporación fueron muy importantes en la historia del Lago de Texcoco.

Los procesos que afectaron el Lago de Texcoco son las épocas de sequías y altas temperaturas, las lluvias y la productividad del lago. Una vez identificados los mayores procesos que afectaron el Lago de Texcoco durante los últimos 110 años, el siguiente paso es el complementar los datos de los elementos traza de Ca, Mg y Sr, lo que ayuda a la interpretación ambiental en la evolución de lagos (Chivas *et al*, 1983; Chivas *et al*, 1986; Curtis and Hodell, 1993).

Los metales traza darán mayor información con respecto a cambios de salinidad y temperatura que, en combinación con los datos de  $\delta^{18}\text{O}_{\text{inorg}}$  podrán proporcionar mejor información, en cuanto a cambios de precipitación y temperatura. La parte final corresponderá a los contaminantes acumulados (PCB, hidrocarburos, DDT, entre otros) en los mismos sedimentos y los cambios que ocurrieron durante la industrialización de México y su reducción posterior a la prohibición de algunos de estos contaminantes (e.g., DDT).

### Agradecimientos

El presente estudio fué posible al apoyo de Geochemical and Environmental Research Group (GERG). Los autores expresan su agradecimiento al M. en C. Andrew J. Marshall de GERG por su apoyo durante el desarrollo de la presente contribución.

### Literatura citada

- Alcalá-Herrera, J. A., J.S. Jacob, M.L. Machain-Castillo y R.W. Neck, 1994. Holocene palaeosalinity in a Maya wetland, Belize, as inferred from the microfaunal assemblage. *Quaternary Research*, 41: 121-130.
- ANUARIO ESTADISTICO DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS. 1940, 1959, 1979. Secretaría de Programación y Presupuesto, Coordinación General del Sistema Nacional de Información, México, D.F.
- Bradbury, J.P. 1971. Paleolimnology of the Lake Texcoco, Mexico. Evidence from Diatoms. *Limnology and Oceanography*, 16:180-200.
- Chivas, A.R. P. De Deckker y J.M.G. Shelley 1983. Magnesium, strontium, and barium partitioning in nonmarine ostracodes shells and their use in paleoenvironmental reconstruction: A preliminary study. In: R.F. Maddocks, ed. *Applications of Ostracoda*. Depto of Geosc, University of Houston, Houston, 1983.
- Chivas, A.R. P. De Deckker y J.M.G. Shelley 1986. Magnesium and strontium in non-marine ostracod shells as indicators of paleosalinity and paleotemperature, *Hydrobiologia*, 143: 135-142.
- Chmura, G.L., P. Aharon, R.A. Socki, Y R. Abernethy, 1987. An inventory of  $^{13}\text{C}$  abundance in

coastal wetlands of Louisiana, USA: *Vegetation and sediments*, *Oecologia*, 74: 264-271.

**Curtis, J.H y D.A. Hodell 1993.** *An isotopic and trace element study of ostracods from Lake Miragoane, Haiti: A 10,500 year record of paleosalinity and paleotemperature changes in the Caribbean.* In: Swart, P.K., K.C. Lohman, J. McKnezie, y S. Savin, *Climate change in continental isotopic records*, AGU, Geophysical monograph 78, pp. 135-152.

**Espinosa-López, 1991.** *Ciudad de México.* Compendio cronológico de su desarrollo urbano, 1521-1980. Dr. Barragán 808, Narvarte, Mexico, D.F. 266 p.

**Friedman G.M. y Sanders, J.E., 1978.** *Principles of Sedimentology*, Wiley & Sons, Inc., New York, 792 pp.

**García-Romero, B. 1996.** *Historical Records of Trace Organic Contaminants in Continental Shelf, Estuarine and Lacustrine Sediment Cores.* Dissertation, Texas A&M University, 239 p.

**Hamilton, S.K. and Lewis, W. M. 1992.** Stable carbon and nitrogen isotopes in algae and detritus from the Orinoco River floodplain, Venezuela. *Geochemical and Cosmochemical Acta*, 56:4237-4246.

**Lira, A. 1983.** *Comunidades Indígenas frente a la Ciudad de México, Tenochtitlan y Tlatelolco, sus*

*pueblos y barrios, 1812-1919*, Colegio de México, Colegio de Michoacán, CONACYT, 426 P.

**López-Ramos, E., 1979.** *Geología de México*, Tomo III. Segunda Edición, Edición Escolar, 446 pp.

**McClung, E.S. 1979.** *Plants and subsistence in the Teotihuacan Valley A.D. 100-750.* Unpublished Dissertation, Brandeis University, 494 p.

**Palacios-Fest, M. R., A.S. Cohen, J. Ruiz y B. Blank 1993.** *Comparative paleoclimatic interpretations from nonmarine ostracods using faunal assemblages, trace elements shell chemistry and stable isotope data.* In: Swart, P.K., K.C. Lohman, J. McKnezie, y S. Savin, *Climate change in continental isotopic records*, AGU, Geophysical monograph 78, pp. 179-190.

**Sanders, T.W, Parson, J.R. y Santley R.S. 1979.** *The Basin of México*, Academic Press, Ney York, 561 p.

**Talbot, M.R. 1990.** A review of the palaehydrological interpretation of carbon and oxygen isotopic ratios in primary lacustrine carbonates. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 80:261-279.

**Talbot, M.R. y K. Kelts 1990.** Paleolimnological signatures from carbon and oxygen isotopic ratios in carbonates from organic carbon-rich lacustrine sediments. In: *Lacustrine Basin Exploration*, AAPG., *Memoir* 50:99-112.