

Variaciones en la Composición Isotópica ($\delta^{13}\text{C}$) de la Materia Orgánica en una Secuencia Cuaternaria en la parte Central de México*

*$\delta^{13}\text{C}$ Variations in the Organic Matter of the Quaternary sediments of
Central Mexico*

Javier Alejandro Alcalá-Herrera**, Carlos Córdova***, María Luisa Machain-Castillo****, Jaime Urrutia-Fucugauchi***** and F. Raúl Gío-Argaez****

RESUMEN

Se estudiaron 280 cm perteneciente a una secuencia sedimentaria limo-arcillosa y con menor cantidad de limo-arenas y estratos de cenizas volcánicas. La sección El Tepalcate se localiza al SE del Lago de Texcoco Estado de México, México; e incluye aproximadamente 17,000 años. La base de la secuencia tiene una edad de aproximadamente 27,300 años A.P. y la parte superior de aproximadamente 10,000. Se obtuvieron valores de $\delta^{13}\text{C}$ en materia orgánica preservada en sedimentos que varían de -20.9‰ a -23.8‰; estas variaciones se interpretan como el resultado de diferentes tipos de materia orgánica producidas por plantas C-3 y C-4 cuya abundancia y distribución varía en función de los cambios climáticos. Las variaciones en el $\delta^{13}\text{C}$ sugieren que hubo condiciones dulceacuicolas en la parte inferior de la sección, sucedidas por condiciones de mayor sequía que prevalecieron hasta hace aproximadamente 24,000 años. Posteriormente hay un aumento en condiciones dulceacuicolas que dura los siguientes 4,500 años. El estado más salino se presenta de 19,500 a 16,800 años A.P. donde se observan los resultados más positivos y que indican que más del 50% de la materia orgánica proviene de plantas C-4. Condiciones secas y salinas prevalecieron hasta hace 14,000 años. Un nuevo aumento en salinidad se tiene en los siguientes 1,500 años aunque no fue tan salino como el periodo de salinidad previo. Finalmente, condiciones dulceacuicolas dominaron en la parte superior de la sección, relacionadas a la extensión de glaciares en las montañas alrededor de la Cuenca de México. La composición isotópica de la materia orgánica en combinación con análisis de polen, diatomeas y metales traza es una herramienta muy útil en interpretaciones paleoambientales.

Palabras clave: Materia orgánica, Texcoco, isótopos estables, Cuaternario, México, paleoambientes.

ABSTRACT

Organic matter $\delta^{13}\text{C}$ from a sedimentary sequence in the Cuenca de México is reported and used in paleoenvironmental interpretation. We studied 280 cm of a silty-clay, sedimentary sequence with some sand and ash interbedded at El Tepalcate. The section is located at the SE end of Lake Texcoco and represents a time span of approximately 17,000 years. $\delta^{13}\text{C}$ values ranging from -20.9 to -23.8‰ were obtained along the sedimentary sequence. The isotopic values are interpreted as variations in percentage of organic matter source from C-3 and C-4 plants. Limnetic conditions may have occurred in the lower part of the section, however, more evidence is still needed to corroborate this idea. Dry and probably saline conditions prevailed until 24,000 years B.P. followed by a fresh-water environment for 4,500 years. A stage of high salinity prevailed from 19,500 to 16,800 years B.P. During this period of time a saltier environment and high percentage of C-4 plants (>50%) prevailed. Saline and dry conditions, but not as extreme as in the previous stages, continued until 14,000 years B.P. An increase

* Enviado para el Volumen No. 47 de la RSMHN, dedicado al Dr. Eucario López-Ochoterena.

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

Texas at Austin, TX 78712, USA; **** Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 70-305, México, D. F. 04510. ***** Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F. 04510.

in salinity is observed for the following 1,500 years. Finally, a fresher environment existed in the upper part of the section related to an increase in the size of glacials around the mountains surrounding the Cuenca de México. The $\delta^{13}\text{C}$ of the organic matter in addition to other micropaleontological and geochemical analyses such as pollen, diatoms, and trace metals, is a very useful tool for paleoenvironmental interpretations.

Key words: Organic matter, Texcoco, stable isotopes, Quaternary, Mexico, paleoenvironments.

Introducción

Los estudios paleontológicos realizados en sedimentos del Lago de Texcoco han identificado cambios ambientales ocurridos en la Cuenca de México durante los últimos 100,000 años. Entre estos estudios se tienen: diatomeas (Bradbury, 1971, 1989), polen (González-Quinter y Fuentes-Mata, 1980; Lozano-García y Carreño, 1987; Lozano-García, 1989) y ostrácodos (Carreño, 1990). El polen y las diatomeas son excelentes indicadores estratigráficos en la evolución de los lagos y han sido de particular importancia en estudios de la Cuenca de México. Los estudios geoquímicos de la materia orgánica en sedimentos Cuaternarios de la Cuenca de México son prácticamente inexistentes, en particular estudios en isótopos estables. Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ han sido reportados como factores de corrección en determinaciones de edades (e.g., Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1994) y sin uso en interpretaciones paleoambientales.

Análisis de $\delta^{13}\text{C}$ en la materia orgánica preservada en sedimentos ha sido utilizada en interpretaciones ambientales (e.g. Martinelli *et al.*, 1991; Giresse *et al.*, 1994). Las plantas, a través del ciclo fotosintético, discriminan selectivamente el isótopo más ligero del carbono (^{12}C) dando como resultado valores negativos con respecto al CO_2 de la atmósfera ($\delta^{13}\text{C}$ -8.0‰). Craig (1953) realizó las primeras determinaciones de isótopos del carbono en plantas y se encontró que sus valores fluctúan dentro de un rango uniforme que va entre -25‰ a -35‰. Desde entonces, se ha encontrado que las plantas pueden tener rangos más amplios, los cuales llegan a caracterizar grupos específicos.

Tres tipos de ciclos fotosintéticos han sido identificados, los cuales proporcionan a los tejidos de las plantas una composición isotópica definida (Lajtha y Marshal, 1994): El ciclo de Calvin que caracteriza a las plantas C-3 ($\delta^{13}\text{C}$ -28‰), el ciclo de Hatch-Slack que caracteriza a las plantas C-4 ($\delta^{13}\text{C}$ -12‰) y el ciclo fotosintético de las crassuláceas o plantas CAM ($\delta^{13}\text{C}$ -19‰). Las ciperáceas y las gramíneas son en su mayoría

plantas C-4 (Ueno y Tekada, 1992). Las ciperáceas C-4 viven en lugares donde existe altas tasas de evapotranspiración, existe una correlación positiva entre el aumento de plantas C-4 y de temperatura y una correlación negativa entre la abundancia de ciperáceas C-4 y latitud (Teeri *et al.*, 1980).

Estas características permiten el uso de las ciperáceas C-4 en particular, y plantas C-4 en general, en estudios de paleoambientes en lagos, ríos y zonas costeras. En forma semejante se ha identificado una correlación de las gramíneas C-4 con temperatura (Teeri and Stowe, 1978; Teeri *et al.*, 1980). Aunque la relación entre clima y plantas C-4 es semejante para ciperáceas y gramíneas no es totalmente correlacionable; sin embargo, en general, las plantas C-4 se correlacionan con climas áridos y secos (Nordt *et al.*, 1994).

Se han registrado las variaciones en la composición isotópica de la materia orgánica o particulada en las cuencas del Río Amazonas (Martelli *et al.*, 1991) y del Río Sanaga en Camerún (Bird *et al.*, 1994). Se observó que el $\delta^{13}\text{C}$ en la materia orgánica cambia en relación al tipo de comunidad vegetal existente. En comunidades donde predominan pastos (plantas C-4 primordialmente tipo gramíneas y *Cyperus* spp.) se observan valores isotópicos más altos que en lugares donde predominan plantas C-3. De igual manera, cambios en el $\delta^{13}\text{C}$ en sedimentos lacustres indican cambios de vegetación de selvas a sabanas o viceversa (Giresse *et al.*, 1994). France-Lanord y Darry (1994) demostraron que variaciones en el $\delta^{13}\text{C}$ de la materia orgánica del delta del Río Bengala son consecuencia de diferentes proporciones de plantas C-3 y C-4 en los sedimentos terrígenos depositados en el Océano Índico.

El objetivo del presente estudio es el de analizar el comportamiento isotópico ($\delta^{13}\text{C}$) de la materia orgánica en la localidad El Tepalcate al SE del Lago de Texcoco y correlacionarlo con variaciones ambientales obtenidas por otros parámetros en el Lago. El Tepalcate se encuentra en las inmediaciones de la ribera sur del Lago de Texcoco sin que halla tenido una gran influencia de ríos y consecuente de aporte alóctono de material orgánico y se encuentra

lo suficientemente cerca de la orilla como para preservar relativamente altas cantidades de materia orgánica que reflejen condiciones locales.

Marco geológico y climático

A continuación se da una breve descripción de la geología de la Cuenca de México. Una descripción geológica más amplia se puede obtener en Mooser (1975), López-Ramos (1979), Bradbury (1989) y Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989).

El Lago de Texcoco se encuentra localizado a una latitud de entre 19° 25' y 19° 37'N y longitud de 98° 55' y 99° 30'W y aproximadamente a 2 200 m sobre

el nivel del mar (Fig. 1). Se encuentra rodeado por montañas de 3 000 a 5 000 m de altura que aportan ríos y riachuelos a la cuenca. Cinco lagos formaban parte del sistema lacustre en la cuenca de México. Aunque estos lagos se encontraron separados durante la mayor parte de su historia geológica, hace aproximadamente 10 000 años, los lagos se conectaron formando un cuerpo continuo que ocupó la mayor parte del valle. Se reportan depósitos lacustres con espesores de hasta 400 m en las partes centrales de los Lagos de Texcoco y Chalco (Rodríguez-Castillo y González-Morán, 1989). La actividad volcánica ha dejado huella en forma de cenizas volcánicas interdigitadas producidas durante el Mioceno-Plioceno, Plioceno-Pleistoceno y el Cuaternario (Mooser, 1975).

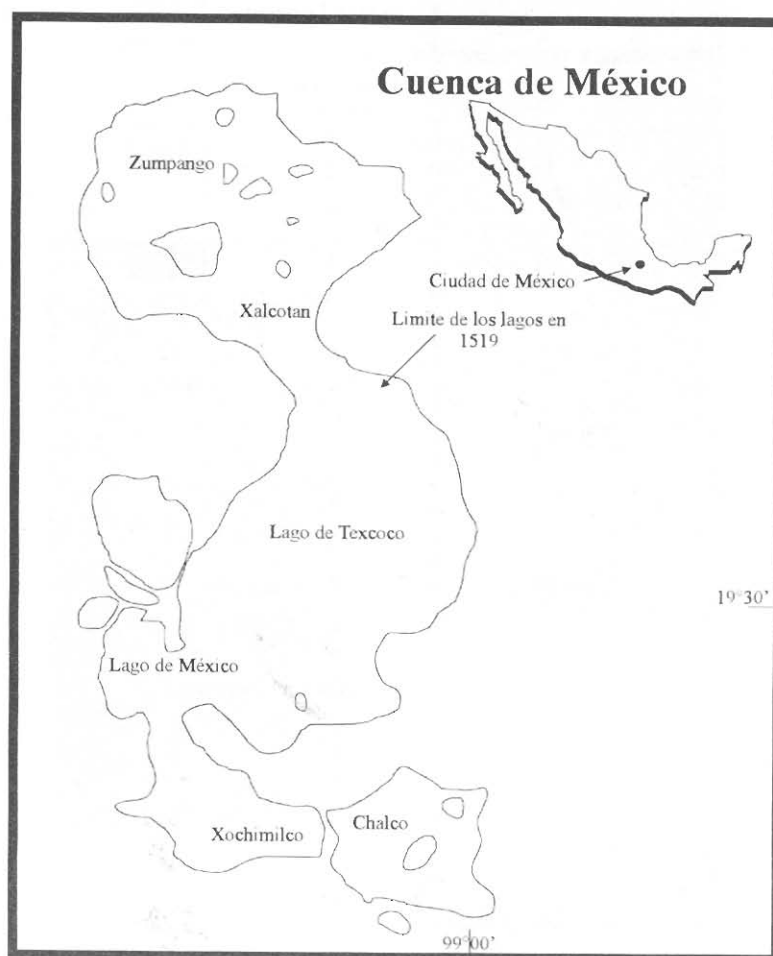


Figura 1. Localización del Lago de Texcoco en la Cuenca de México.

La parte N y NE presenta una menor precipitación que en el S y SW. Actualmente hay una precipitación promedio anual de 700 a 800 mm en la Sierra Nevada y Platachique comparado con 1 100 en la Sierras de las Cruces y Ajusco (Sanders *et al.*, 1979). Aunque diferentes regímenes pluviométricos existieron en el pasado, evidencias paleontológicas y geoquímicas (polen, diatomeas y $\delta^{13}C$) demuestran la presencia de un patrón semejante, con un gradiente de clima más cálido en el norte y más templado en el sur.

Localización y Descripción de la Columna Estratigráfica

El Lago de Texcoco es un sistema lacustre cerrado que ha preservado relativamente grandes proporciones de materia orgánica. Estudios palinológicos y de diatomeas han identificado drásticas variaciones climáticas durante el Cuaternario (González-Quintero y Fuentes-Mata, 1980; Bradbury, 1989; Lozano-García, 1989). Dichas variaciones probablemente se reflejan también en los cambios isotópicos de la materia orgánica.

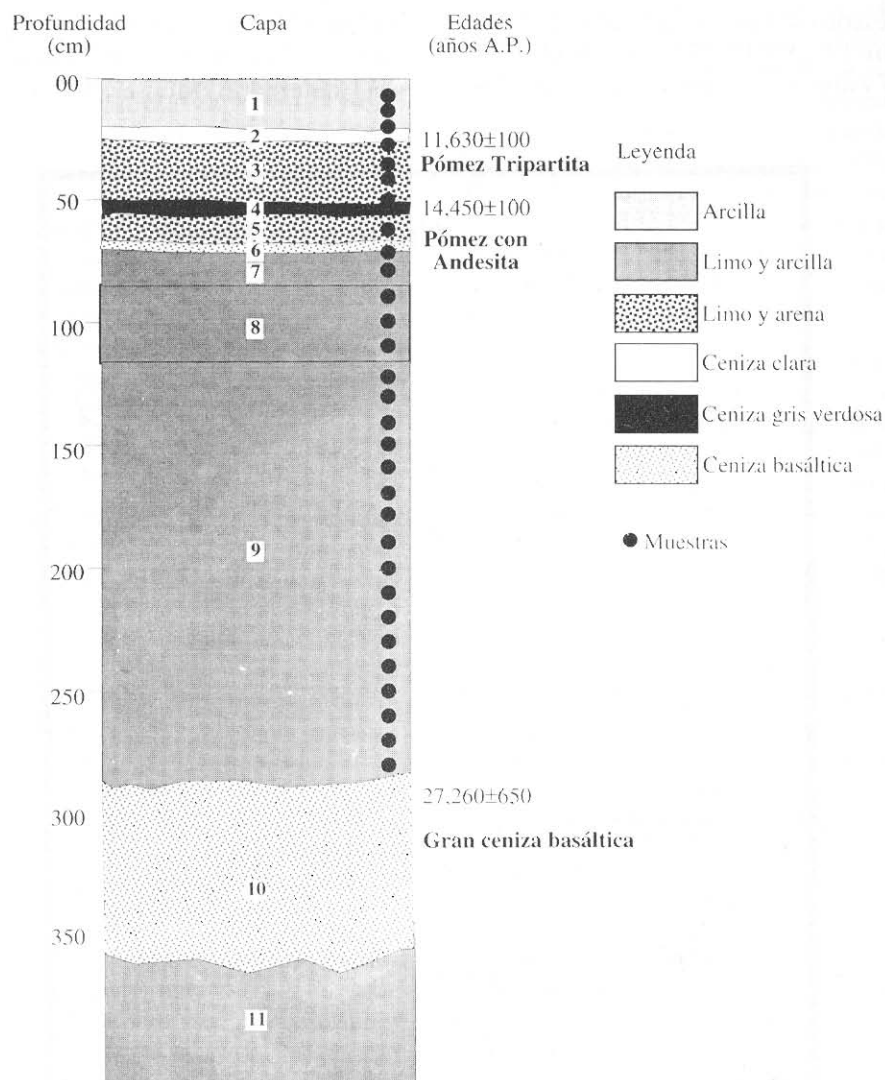


Figura 2. Sección estratigráfica mostrando las diferentes capas, profundidad, edad y nivel de colecta de las muestras.

El núcleo llamado El Tepalcate se localiza en el SW del vaso lacustre de Texcoco, aproximadamente 3 Km al norte del pueblo de Chimalhuacán (Fig 2). La zona es una superficie salina con conglomerados de pasto halófitos y pequeñas acumulaciones eólicas conocidas como dunas de obstáculo (copicce dunes). Debido a la extracción subterránea de acuíferos en la región, se han formado grietas que han producido hundimientos de las capas superficiales (Lugo, 1992). En las cercanías del núcleo se encuentra el sitio arqueológico El Tepalcate, del cual la sección toma su nombre. Este sitio arqueológico presenta diferentes periodos de ocupación siendo el más importante el Periodo del Formativo Terminal (CA. 250 A.P -100 D.P.; Parsons, 1971).

Dos secciones fueron colectadas (TPL-1 y TPL-2), la sección más completa (TPL-1) fué estudiada. Esta se localiza a 19° 27' N y 98° 56' 40" W, comprende una secuencia de 4 metros de espesor total en la que existe una alternancia de arcillas y cenizas volcánicas (Fig. 3), formada por 11 capas que se describen en la Tabla 1. Tres de las cenizas volcánicas han sido fechadas por correlación con otras secciones de la Cuenca de México (Bradbury, 1989). La ceniza más antigua es la Gran Ceniza Basáltica (capa 10) con una edad de 27 260 ± 650 años A.P. (Gx-1363), la segunda ceniza llamada Pomez con Andesita (capa 4) fechada 14 450 ± 100 años A.P (Tx 1914) y la tercera es la ceniza Pomez Tripartita de edad 11 680 ± 160 años A.P (QL 1483).

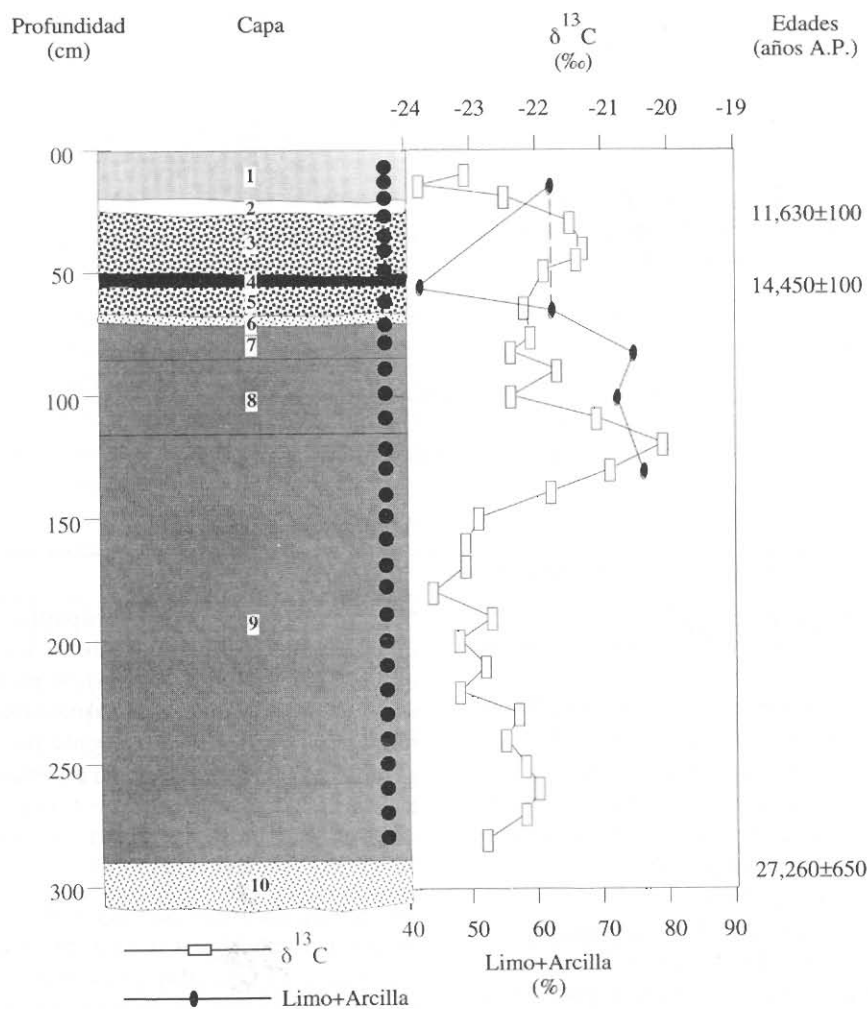


Figura 3. Composición isotópica de la materia orgánica y porcentaje de limos+arcillas. Se incluye la edad y la sección estratigráfica. La simbología es como en la Figura 2.

Tabla 1. Descripción de la sección estratigráfica El Tepalcate (TPL-1).

Capa	Descripción	Espesor	
		Por Capa	Acumulativo
1	Material arcillo-limoso de color gris oscuro (2.5y 6/1) con moderada reacción al HCl. Presenta concreciones de salitre. Depósito lacustre.	23	23
2	Ceniza de limo y arena fina de color blanco. Depósito ondulado debido a turbación, posiblemente por la plasticidad de las arcillas de los materiales de las capas superior e inferior.	4	27
3	Material limo-arenoso de color gris oscuro (10yr 6/1) con algunos fragmentos de pómez redondeada entre 2 y 3 mm. Presenta reacción débil al HCl. Depósito lacustre con incursión de material pumítico llegadas probablemente por flotación.	17	44
4	Ceniza, arena fina, color gris olivo (5Y 4/2). Granos vítreo y pómez.	17	61
5	Material limo-arenoso similar a la capa 3, color gris claro (2.5Y 6/1) y con fuerte reacción al HCl. Depósito lacustre gléyico.	9	70
6	Ceniza basáltica de arena media a fina, color gris muy oscuro. Granos vítreos y algunos líticos.	2	72
7	Material limo arcilloso claro (10Y 8/1) con fuerte reacción al HCl. Depositación lacustre probablemente somera y alcalina debido a un pH de 10.6, el más elevado de toda la secuencia.	14	86
8	Material limo-arcilloso de color gris claro (2.5Y 7/1) y con fuerte reacción al HCl. Depósito lacustre.	29	115
9	Material limo-arcilloso de color gris claro (5Y 7/1). Depósito lacustre.	173	288
10	Ceniza basáltica, arena media, color gris oscuro. Granos líticos y algunos vítreos.	67	355
11	Igual que la capa 9.	30	380

Nota: Los colores de los sedimentos fueron tomados en seco

Metodología

Para el análisis isotópicos de los primeros 280 cm de la secuencia sedimentaria, fueron utilizadas treinta muestras. Estas se obtuvieron cada 10 cm. Aproximadamente 7 g de la muestra fue secada completamente en un horno de inducción a temperatura de 50°C. Para 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, proceso que se repitió hasta no observar reacción. Las muestras fueron lavadas tres veces con 5 ml de agua destilada para remover el exceso de ácido. Posteriormente se secaron a

50°C y se transfirieron a cápsulas de vidrio de cuarzo a las que previamente se les agregó 2 g de óxido cúprico (CuO₂ grueso), se pusieron al vacío y sellaron. Las muestras se quemaron por 3 hrs. a 800°C y se enfriaron lentamente por 4 hrs. El CO₂ producido por la combustión del material orgánico fué purificado por medio de trampas criógenas y analizado en una espectómetro de masas Finnigan MAT 251 con tres colectores.

Se analizó un duplicado por cada 7 muestras y se analizaron muestras estandar por cada grupo de 7 muestras. El estandar pertenece a una hoja de *Cyperus articulatus* con composición de -13.3‰. Por duplicación de muestras y estándares analizados simultáneamente permite una precisión de ±0.05‰.

El análisis granulométrico se efectuó utilizando un hidrómetro de probetas por lo que se obtuvieron porcentajes de arenas, limos y arcillas. Los valores determinados se corrigieron para el efecto de defloculante utilizado y la temperatura. Las arenas de la capa de ceniza volcánica fué inicialmente tamizada para separar arenas gruesas de sedimentos más finos.

Finalmente, el porcentaje de materia orgánica proveniente de plantas C-4 fué estimada utilizando la siguiente fórmula:

$$\delta^{13}C_T = \delta^{13}C_{C-3} (F_{C-3}) + \delta^{13}C_{C-4} (F_{C-4})$$

donde: $\delta^{13}C_T$ es la composición isotópica obtenida; $\delta^{13}C_{C-3}$ y $\delta^{13}C_{C-4}$ son las composiciones isotópicas promedios de las plantas C-3 (-28.0‰) y C-4 (-13.0‰); F_{C-3} y F_{C-4} son las proporciones de las plantas C-3 y C-4.

Resultados y discusión

$\delta^{13}C$ de los Principales Productores de Materia Orgánica.

La composición isotópica de la materia orgánica está en función de las plantas que la originaron y depende de las condiciones climáticas existentes en el área. Para poder interpretar condiciones paleoambientales usando isótopos, es necesario conocer el $\delta^{13}C$ del material de origen, es decir la composición isotópica de plantas C-3 y C-4, sobre la que hay pocos estudios de la flora de México.

En este estudio se asumieron las siguientes consideraciones:

- La composición isotópica puede variar dependiendo del tipo de hábitat, e.g., se conoce que dentro del género *Cyperus* especies que puede ser C-3 y C-4 (Stanley Jones, 1995 comunicación personal).
- Las especies de un mismo género varían en composición isotópica dependiendo de la región. La misma especie presenta variaciones en $\delta^{13}C$ dependiendo del área geográfica como lo demuestran estudios realizados en el sur de Estados Unidos (Teeri *et al.*, 1980), Japón (Ueno y Takeda, 1992), Burundi (Aucour and Hillaire-Marcel, 1993) y Kenia (Hesla *et al.*, 1982).

- Las diferencias en la composición isotópica del CO_2 , (base del ciclo fotosintético), ha variado en el Cuaternario (Marino *et al.*, 1992), sin embargo poco efecto debe de tener en la composición isotópica de los tejidos de las plantas.

- Day, (1982) considera que los isótopos de la materia orgánica son afectados por la descomposición, sin embargo, estos productos de putrefacción tienen un mayor efecto en manglares y pantanos que en otros ambientes. La descomposición es mayor en los dos primeros años, después de los cuales se presentan pocos cambios. Consecuentemente por la falta de información sobre la composición isotópica de las plantas en México, se consideran los valores de -28.0‰ como tasa promedio para plantas C-3 y de -13.0‰ como tasa promedio para plantas C-4.

Entre las plantas identificadas del Lago de Texcoco se tienen tules (*Typha* spp.), arroz silvestre (sp) y una alga azul-verde (sp) llamada Tecuilatl (Orozco y Berra, 1864, *in* Sanders *et al.*, 1979). En las orillas del lago, pastos resistentes a suelos salinos tales como *Sporobolus plumbens*, *Distichlis prostrata* y *D. spicata* junto con diferentes especies de *Typha* y *Scirpus* son los que predominaban (Sanders *et al.*, 1979). Otras plantas identificadas en la Cuenca de México son *Carex* sp. (*Carex aztecica*) y plantas del género *Cyperus* (McClung, 1979). También ha sido identificados en muestras del Holoceno de la Cuenca de México polen de *Carex* sp. Depósitos de tules (*Typha* sp) existen cerca de la localidad en estudio rodeando antiguos asentamientos humanos lo que permite confirmar lo común de esa planta en el Lago de Texcoco. Entre estas especies se tiene plantas C-4 como son *Cyperus* spp., *Distichlis prostrata* y *D. spicata* y probablemente *Sporobolus plumbens*. Plantas C-3 son *Scirpus* con rango de -30.1‰ a -25.1‰, *Typha* spp. con un promedio de -28.0‰, *Carex* spp. con -30.6‰. El fitoplancton dulceacuícola tiene un $\delta^{13}C$ de -35.0‰, sin embargo, poca influencia tiene el fitoplancton en la materia orgánica preservada (Hamilton and Lewis, 1992). La mezcla de esos contribuyentes a la materia orgánica se reconocen por que muestran cambios en la composición isotópica.

Correlación Estratigráfica

De los núcleos reportados en la literatura para el Lago de Texcoco las secciones pertenecientes a las localidades de Cruz de Lago en la parte central y primordialmente la de Tepexpan al NW del lago

son las que más se asemejan al núcleo El Tépalcate. En las tres localidades se reconocen la ceniza volcánicas con andesita y pómez tripartita. En el caso de la sección Cruz del Lago el espesor total es de poco más de 7 m. Los núcleos El Tépalcate y Tépexpan presentan menos de 3.0 m de espesor. Esta diferencia en espesor es debida a que la sección Cruz del Lago proviene del centro del Lago de Texcoco, la sedimentación lacustre está solo interrumpida por la depositación de cenizas volcánicas. El Tépalcate y Tépexpan son depósitos lacustres marginales interrumpidos por recesiones del nivel lacustre. De hecho, en sitios cercanos a la localidad en estudio, la fauna pleistocénica se presenta en depósitos de aproximadamente un metro de profundidad (García-Cook, 1966). Por lo anterior consideramos que El Tépalcate es una secuencia condensada de Cruz del Lago.

El Tépalcate es una sección continua en la cual el material volcánico de rápida depositación interrumpe la continuidad de los sedimentos. La cercanía a la orilla del lago de esta localidad permitiría una mayor acumulación de cyperaceas y pastos con una relativamente mayor influencia de plantas C-4 que en una localidad más central en el Lago de Texcoco.

Cambios del $\delta^{13}\text{C}$ de la Materia Orgánica

La parte inferior de la secuencia (280-230 cm de profundidad) muestra valores relativamente constantes con promedio de -22.2‰ . De 220 a 160 cm aproximadamente se tienen valores ligeramente más negativos con un valor mínimo de -23.6‰ a 180 cm.

Una deflexión hacia valores más positivos se observa comenzando en la muestra 150 alcanzando un valor máximo de -20.1‰ a la profundidad 120 cm. A partir de ese nivel (150 cm) el $\delta^{13}\text{C}$ se hace más negativo para estabilizarse en valores de aproximadamente -22.1‰ . En la muestra tomada a 45 cm, el $\delta^{13}\text{C}$ aumenta nuevamente aunque el valor máximo alcanzado es de -21.3‰ en el centímetro 40. Finalmente se tiene una disminución en $\delta^{13}\text{C}$ obteniéndose un valor de -23.8‰ a los 15 cm.

Los análisis granulométricos de cuatro capas lacustres muestran una disminución en el porcentaje de los limos+arcillas hacia la parte superior. Se tiene una variación de aproximadamente 15% con la excepción del estrato de la ceniza volcánica en la que se tiene un porcentaje bajo de limos+arcillas. Un aumento de arenas es indicativo de un mayor

acarreo de material alóctono del área de estudio por medio de ríos que desembocaban a distancia relativamente cercana al sitio en estudio. Sin embargo, la predominancia de limos y arcillas sugiere material orgánico primordialmente autóctono, esto es que poco fué transportado.

Cambios Ambientales del Lago de Texcoco

La siguiente discusión se basa principalmente en los resultados de la Figura 3 y se ven resumidos en la Figura 4 en forma de salinidad relativa. La salinidad relativa se representa en tonos de claro a oscuros. Salinidades mayores tienen un tono más oscuro mientras que ambientes dulceacuícolas se designaron con los tonos más claros.

La región NE del Lago de Texcoco fué más caliente y seca que la parte sur de la Cuenca de México. Esto se ve apoyado por los datos publicados por Urrutia *et al.* (1994) en los que $\delta^{13}\text{C}$ de la materia orgánica presentan valores de -27.0‰ sugiriendo una mayor contribución de material orgánico de plantas C-3 que de C-4 en relación a la localidad en estudio. De igual manera la precipitación anual promedio en la Sierra del Ajusco es de 1100 mm comparado con 700 mm en la Sierra Nevada. Esto le da un carácter más húmedo y de tipo dulce a las aguas de los Lagos de Xochimilco y Chalco con respecto a las del Lago de Texcoco. La precipitación anual en el lado este del la Cuenca de México (Sierra de las Cruces) es también mayor que en la Sierra Nevada. Consecuentemente, los valores isotópicos de -23.8 a 20.9‰ , aunque ligeramente positivos, son de esperarse. Una tendencia hacia valores más positivos debe de esperarse en muestras de los Lagos de Zumpango.

La muestra analizada a los 280 cm sugiere que el Lago de Texcoco presentaba condiciones poco salinas con probablemente niveles de agua elevados. Plantas tales como *Scirpus* sp. y *Typha* spp. (C-3) fueron abundantes en el área y produjeron la mayor parte de la materia orgánica. Desafortunadamente no se tienen sedimentos de la capa 11 (fig. 2), la cual probablemente presentaría valores isotópicos semejantes. Las condiciones húmedas no se mantuvieron por mucho tiempo.

El primer registro de clima más seco se observa a los 270 cm, en la capa 9, con valores de -22.2‰ . La diferencia en composición isotópica en esos 10 cm (de la muestra 280 a la 270) no fué drástica como era de esperarse al aumentar una mayor

proporción de Cyperaceas. Sin embargo, el polen de *Typha* sp. (C-3; $\delta^{13}\text{C}$ -28‰) muestra que esa especie fué importante durante ese tiempo (González-Quintero y Fuentes-Mata, 1980) y pudo haber contrarrestado los valores positivos que hubieran producido la materia orgánica de las cyperaceas. Estas condiciones secas disminuyeron el nivel del lago como lo sugiere la gran abundancia de diatomeas tales como *Nitzschia frustulum* (Bradbury, 1989). El clima árido comenzó aproximadamente 26,700 A.P. y debió de haber durado por los siguientes 2,700 años de acuerdo con los resultados aquí obtenidos, semejantes a los de González-Quintero y Fuentes-Mata (1980); aunque Bradbury (1989) indica una duración de aproximadamente 1,500 años en base diatomeas.

Los valores más negativos ($\Delta^{13}\text{C}$ =0.9‰) a 220 cm. Indican el regreso a condiciones húmedas. El polen de las cyperaceas prácticamente desaparece al igual que el polen de *Typha* sp. Otras plantas C-3 seguramente fueron predominantes mientras que pastos (C-4) fueron los productores de materia orgánica que le dan el carácter más positivo a estas muestras. Estas condiciones duraron hasta aproximadamente 19,500 años A.P. Bradbury (1989) considera a este

un periodo transicional entre dos eventos salinos bien caracterizados en la sección de Tépexpan y la parte superior de la sección de Chapultepec.

Las condiciones salinas nuevamente comienzan a prevalecer a la profundidad de 140 cm durando hasta el centímetro 110, donde $\Delta^{13}\text{C}$ =1.0‰ y los valores isotópicos continúan aumentando hasta alcanzar valores de -20.1‰. Este periodo es el más árido reconocido en la sección estratigráfica y corresponde al periodo seco de González-Quintero y Fuentes-Mata (1980). Este periodo de aridez y alta evaporación ha sido también interpretado como resultado de la ausencia en avances glaciares en las altas montañas que rodean la Cuenca de México (White *et al.*, 1980; Heine, 1988; Vázquez-Selem, 1991). El análisis de polen indica una predominancia de polen de las cyperaceas lo que se ve reflejado en la composición isotópica en este nivel estratigráfico. Bradbury (1989) considera este un periodo de existencia de un pantano salino en las secciones de Chapultepec (A330-410 cm) y Tépexpan (165-130 cm), aunque no es notorio en la sección de Cruz del Lago. Estas condiciones de aridez causaron bajos niveles en el agua.

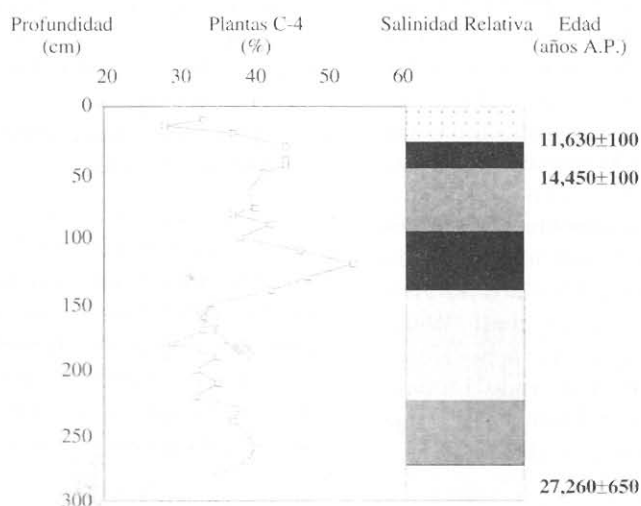


Figura 4. Porcentaje de plantas C-4 y su relación a los cambios de salinidad relativa. Los tonos indican variaciones de salinidad, el tono más oscuro una mayor salinidad y el tono más claro menor salinidad.

El regreso a condiciones semejantes a las presentes en la parte inferior de la columna estratigráfica se tienen en los siguientes 2 800 años (profundidad 100 a 50 cm). Durante este tiempo se deposita la ceniza volcánica llamada pómez con andesita. Los valores isotópicos se encuentran alrededor de -22.0‰ donde hay una dominancia de polen de cyperaceas y *Typha* sp. Este nivel corresponde a la parte superior de la zona considerada como pantano dulce por Bradbury (1989) en las localidades de Chapultepec y Tepexpan.

Un evento registrado a profundidades del centímetro 45 al 30 en el cual el $\delta^{13}\text{C}$ es de -21.4‰ sugieren un ligero aumento en la salinidad y seguramente en las condiciones de aridez. El polen de las cyperaceas viene a ser abundante, mientras que el polen de *Typha* spp. disminuye considerablemente. Bradbury (1989) observa la presencia de *Nitzschia* spp. en la sección de Tepexpan.

El evento salino es de poca duración y es seguido por condiciones de pantano dulce. Valores isotópicos de -23.8‰ son observados. Esta parte de la sección parece estar faltante en la sección Cruz del Lago estudiada por González-Quintero y Fuentes-Mata (1980) y Bradbury (1989). Sin embargo, la composición isotópica sugiere que plantas C-3 probablemente *Typha* spp. y *Carex* spp. predominaron en el Lago de Texcoco permitiendo condiciones dulceacuícolas. *Carex* spp. identificada por González-Quintero y Fuentes-Mata (1980) en la parte superior de la sección Cruz del Lago tiende a aumentar. Esta es la parte más dulce de la sección estudiada. Estas condiciones se correlacionan con ambientes más húmedos que los presentes; con una mayor precipitación para la Cuenca de México que comenzaron hace aproximadamente 12 300 años A.P. El reconocimiento de las condiciones húmedas fué debido a un aumento en los glaciales en el Ajusco (White *et al.*, 1990), Iztaccihuatl (White, 1986; Vázquez-Selem, 1992) y la Malinche (Heine, 1988). En nuestra sección el período húmedo comenzó poco después de 11 630 años A.P. la cual es correlacionable con los eventos glaciales.

En la Figura 4 se muestran el porcentaje de plantas C-4 en relación a profundidad y salinidad relativa. Se puede observar que únicamente en el momento de máxima salinidad las plantas C-4 llegaron a contribuir por más del 50% de la materia orgánica total. Teeri *et al.* (1980) indicaron que existe una alta correlación entre altos porcentajes de

cyperaceas C-4 y altas temperaturas y alta evapotranspiración, condiciones existentes en tiempos donde el porcentaje de plantas C-4 fué mayor de 40%; únicamente en el desierto de Sonora se han obtenido porcentajes mayores del 54% de cyperaceas C-4. Las gramíneas también son afectadas por condiciones climáticas semejantes a las que afectan las cyperaceas. Altos porcentajes de hasta 82% de gramíneas C-4 han sido encontradas en el desierto de Sonora. Porcentajes entre los 60% se han encontrado en lugares más húmedos y no tan áridos como es la Planicie Costera del Golfo de México (Teeri y Stowe, 1976). Por supuesto, estos porcentajes son exclusivamente entre los grupos de gramíneas y cyperaceas excluyendo otras plantas C-3. Sin embargo, las plantas C-4 pueden ser altos productores de materia orgánica si las condiciones climáticas son adecuadas. En los periodos, en que las condiciones fueron más húmedas el porcentaje de materia orgánica proveniente de plantas C-4 fué 30% menor.

Conclusiones

El presente estudio hace uso de la composición isotópica de la materia orgánica e integra los resultados obtenidos con el esquema paleoclimático interpretado utilizando diatomeas (Bradbury, 1989) y polen (González-Quintero y Fuentes-Mata, 1980). Los datos de $\delta^{13}\text{C}$ de la localidad El Tepalcate se correlacionan con previas interpretaciones paleoambientales obtenidas en las localidades de Tepexpan y Cruz del Lago.

Las zonas de lago salino, transición, y pantano salino descritas por Bradbury (1989) se correlacionan muy bien con la interpretación de salinidades relativas obtenidas en el presente estudio, excepto es en la parte inferior de la sección de El Tepalcate donde consideramos una zona más dulce. Se requerirá de más muestreos para poder confirmar esta aseveración.

La mayor diferencia entre la clasificación de Bradbury (1989) y las divisiones de salinidad discutidas en este artículo se ve en la parte considerada pantano alcalino dulceacuícola. Nosotros consideramos un evento salino, un aumento en salinidad y posteriormente el regreso a condiciones dulces. Bradbury también reconoció

un evento salino en la sección de Tépexpan, sin embargo, no diferenció dicho evento del pantano alcalino dulceacuícola.

La composición isotópica de la materia orgánica proveniente de plantas C-3 y C-4 ha sido ampliamente usada para hacer interpretaciones paleoclimáticas. La aplicación de esta línea de estudio en el área del Lago de Texcoco puede dar resultados muy confiables debido a que provee de información de cambios climáticos locales. Sin embargo, su aplicación en la reconstrucción ambiental, se ve apoyada cuando se utilizan en combinación con otras herramientas bioceonológicas (polen, diatomeas, ostrácodos, etc).

Agradecimientos

Al Dr. Bernardo García-Romero por sus múltiples comentarios acerca del Lago de Texcoco. Los análisis de laboratorio fueron auspiciados por un apoyo económico de investigación interno de Geochemical and Environmental Research Group, Texas A&M University.

Literatura citada

Aucor, A.M. y C. Hillaire-Marcel, 1993. *A 30,000 year record of ^{13}C and ^{18}O changes in organic matter from an equatorial peatbog*, In *Climate change in continental isotopic record*, Geophysical Monograph 78, AGU., 343-351.

Bird, M.I., P. Giresse y A.R. Chivas, 1994. Effect of forest and savanna vegetation on the carbon-isotope composition of sediments from the Sanaga River, Cameroon, *Limnol. Oceanogr.*, 39: 1845-1854.

Bradbury, J.P., 1971. Paleolimnology of the Lake Texcoco, Mexico. Evidence from Diatomeas. *Limnology and Oceanography*, 16:180-200.

Bradbury, J.P., 1989. Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca de México, *Quaternary Science Reviews*, 8:75-100.

Carreño, A.L., 1990. Ostrácodos Lacustres del Paleolago de Texcoco. *Rev. Soc. Mex. Paleont.*, 3:117-135.

Craill, H., 1953. The geochemistry of the stable isotopes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 3:53-92.

Day, F.P. Jr., 1982. Litter decomposition rates in the seasonally flooded Great Dismal Swamp. *Ecology*, 63: 670-678.

France-Lanord, CH. y L.A. Derry, 1994. $\delta^{13}\text{C}$ of organic carbon in the Bengal Fan: Source evolution and transport of C3 and C4 plant carbon to marine sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 4809-4814.

García-Cook, A., 1966. Excavación de un sitio pleistocénico en Chimalhuacán, Edo. de México. *Instituto Nacional de Antropología e Historia Boletín*. 25:22-27.

Giresse, P., J. Maley y P. Brenac, 1994. Late Quaternary palaeoenvironments in the Lake Barombi Mbo (West Cameroon) deduced from pollen and carbon isotopes of organic matter. *Palaeogeog. Palaeoclim. Palaeoecol.*, 107:65-78.

González-Quintero, L. y M. Fuentes-Mata (1980). El Holoceno de la porción central de la cuenca del Valle de México. *Memorias del III Coloquio sobre Paleobotánica y Paleinología*, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Colección Científica, No. 86, México, pp. 113-132

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 Cosmochimical Acta*, 56:4237-4246.

Heine, K., 1988. Late Quaternary glacial chronology of the mexican volcanoes, *Die Geowissenschaften*, 7:197-205.

Hesla, B.L., L.L. Tiezen, y S.K. Imbamba, 1982. A systematic survey $\delta^{13}\text{C}$ C4 and C3 photosynthesis in the Cyperaceae of Kenia, East Africa. *Photosynth.*, 16: 196-205.

Lajtha, K. y J.D. Marshall, 1994. *Sources of variation in the stable composition of plants*, In *Stable isotopes in ecology and environmental science*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, United Kingdom, pp. 1-21.

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

- Lozano-García, S., 1989.** Palinología y paleoambientes Pleistocénicos de la Cuenca de México. *Geof. Int.*, 28: 335-362.
- Lozano-García, S. y A.L. Carreño, 1987.** Indicadores micropaleontológicos de condiciones climáticas y lacustres de la Cuenca de México; ex-lago de Texcoco, *Rev. Soc. Mex. Paleont.*, 1:192-202.
- Lugo, J. H., A. Pérez-Vega, y M. Rojas-Salas, 1991.** Formación de grietas en la margen del antiguo lago al oriente de la Cuenca de México, *Geof. Int.*, 30: 87-95.
- Marino, B.D., M.B. McElroy, R.J. Salawitch, y W.G. Spaulding, 1992.** Glacial-to-interglacial variations in the carbon isotopic composition of atmospheric CO₂, *Nature*, 357:461-466.
- Martinelli, L.A., A.H. Devol, R.L. Victoria y J.E. Richey, 1991.** Stable carbon isotope variation in C3 and C4 plants along the Amazon River, *Nature*, 353: 57-59.
- McClung, E.S. 1979.** *Plants and subsistence in the Teotihuacan Valley A.D. 100-750.* Unpublished Dissertation, Brandeis University, 494 p.
- Mosser, F. 1975.** Mapa geológico de la Cuenca de México y zonas colindantes. In Memoria de las obras del sistema de drenaje profundo del Distrito Federal. Tomo IV, México, Secretaría de Obras y Servicios.
- Nordt, L.C., T.M. Boutton, C.T. Hallmark, y M.R. Waters, 1994.** Late Quaternary vegetation and climate changes in central Texas based on the isotopic composition of organic carbon. *Quat. Res.*, 41: 109-120.
- Parsons, J. R., 1971.** Prehispanic settlement patterns in the Texcoco region, Mexico. Ann Arbor: University of Michigan. *Memoirs of the Museum of Anthropology, University of Michigan*, 3, pp. 389.
- Rodríguez-Castillo, R. y T. González-Morán, 1989.** Comportamiento hidrodinámico del sistema acuífero de la subcuenca de Chalco, México, *Geof. Int.*, 28, 207-217.
- Sanders, T.W, Parson, J.R. y Santley, R.S. 1979.** *The Basin of México*, Academic Press, New York, 561 p.
- Smith, M. E., 1994.** Social complexity in the Aztec Countryside. In G.M. Schwartz y S.E. Falconer (Eds), *Archeological views from the Countryside*, Smithsonian Institution Press, Washington, D.C., pp 143-159.
- Teeri, J.A. y L.G. Stowe, 1976.** Climate patterns and the distribution of C4 grasses in North America. *Oecologia*, 23:1-12.
- Terri, J.A., L.G. Stowe y D.A. Livingstone, 1980.** The distribution of C4 species of the Cyperaceae in North America in relation to climate. *Oecologia*, 47: 307-310
- Ueno, O. y T. Takeda, 1992.** Photosynthetic pathways, ecological characteristics, and the geographical distribution of the Cyperaceae in Japan. *Oecologia*, 89:195-203.
- Urrutia-Fucugauchi, J., S. Lozano-García, B. Ortega-Guerrero, M. Caballero-Miranda, R. Hansen, H. Böhnell, and J.F.W. Negendank, 1994.** Palaeomagnetic and palaeoenvironmental studies in the southern basin of Mexico-I. Volcano-sedimentary sequence and basin structure of Chalco lake (sic). *Geof. Int.* 33: 421-430.
- Vázquez-Selem, L., 1991.** Glaciaciones del Cuaternario Tardío en el Volcán Teyotl, Sierra Nevada, Investigaciones Geográficas, *Boletín del Instituto de Geografía*, 22:25-45.
- Vázquez-Sánchez E. y R. Jaimes-Palomera, 1989.** Geología de la Cuenca de México, *Geof. Int.*, 28:133-190.
- White S.E., 1986.** Status of Pleistocene glaciation, neoglaciations, and glaciers in Mexico. *American Quaternary Association, Programs and Abstracts, 9th Biennial Meeting, 2-4 June, 1986, Champaign-Urbana, Illinois*, p. 168.
- White, S.E., E.M. Reyes-Cortés, J. Ortega-Ramírez, y S. Valastro, 1990.** El Ajusco, geomorfología volcánica y acontecimientos glaciales durante el Pleistoceno Superior y comparación con las series glaciales mexicanas y de las montañas Rocallosas, *Serie Arqueología Colección Científica* 212, Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, D.F.