

Origen y características geológicas del paleo-Lago de Amajac, Hidalgo

**Javier Arellano-Gil^{1*}, Patricia Velasco-de León², Alicia Silva-Pineda³,
Rosalba Salvador-Flores¹ y Florencio Beltrán-Romero¹**

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F., México.

² Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México,
Colonia Ejército de Oriente, Iztapalapa, 09230 México, D.F., México.

³ Instituto de Geología, Departamento de Paleontología, Universidad Nacional Autónoma de México,
Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F.

*arellano@servidor.unam.mx

RESUMEN

*Las litofacies sedimentarias y los fósiles descritos en este trabajo pertenecen a la secuencia clástica continental de la Formación Atotonilco El Grande que aflora en Santa María Amajac, Hidalgo. La secuencia se acumuló en un ambiente lacustre de montaña que, en este trabajo, denominamos "paleo-Lago de Amajac", cuyo origen se explica por el cierre de un cañón de más de 1,000 m de profundidad de paredes verticales que fueron labradas por erosión en las rocas de plataforma de la Formación El Abra. Las paredes del cañón presentaban mayor inestabilidad al noroeste del poblado Doñana, Hidalgo, debido al intenso fracturamiento, a la fuerte pendiente del terreno, al efecto de la gravedad y a la presencia de agua infiltrada en las fracturas. Estas condiciones trajeron como consecuencia que de las paredes de la zona inestable se desprendiera abundante material rocoso de diversos tamaños, el cual formó un depósito de talud en la parte baja del cañón (avalancha de escombros). Este depósito, de más de 250 m de espesor, ocasionó el cierre temporal del Río Amajac y la formación de un lago de agua dulce que cubrió, en tiempos de máxima inundación, una superficie aproximada de 85 km². Después del cierre del cañón se inició el proceso de sedimentación lacustre con sus diferentes litofacies (conglomeráticas, arenosas, limo-arcillosas y arcillosas), acumulándose en la zona del depocentro más de 150 m de espesor de sedimentos detríticos y piroclásticos de diferente granulometría. Los sedimentos de grano grueso se ubican en la base de la secuencia o como rellenos de canal, mientras que los más finos tienen una mayor distribución y presentan abundante flora y fauna fósil de agua dulce. La flora pertenece a las familias Salicaceae, Platanaceae, Fagaceae, Rosaceae y Equisetaceae. En cuanto a la fauna, son numerosos los gasterópodos del género *Planorbis*, ostrácodos, peces pequeños, restos de vertebrados y algunos insectos del orden Coleóptera. Con base en el registro estratigráfico y paleontológico se considera que la Formación Atotonilco El Grande es de edad del Plioceno (Blancano). La sedimentación lacustre culminó cuando los procesos de erosión actuaron sobre la barrera que formó el lago.*

Palabras clave: paleo-lago, estratigrafía, sedimentología, paleontología, Plioceno, Hidalgo, México.

ABSTRACT

The sedimentary lithofacies and the fossils reported in this study belong to the continental clastic sequence of the Atotonilco El Grande Formation, which crops out in the Santa María Amajac town, in the Hidalgo state. This sequence, named in this study as the paleo-Lake of Amajac, was accumulated in a high-

altitude lacustrine environment. The origin of this paleolake was caused by the closing of a canyon over 1,000 m deep, with sub-vertical walls, carved into the carbonate platform rocks from El Abra Formation. The canyon walls were particularly unstable north of the Doñana town. This instability was caused by an intense fracturing, the steeply dipping walls and the presence of water within fractures. As a consequence of these conditions, large volumes of rocky material of varying sizes detached from the canyon, forming a talus-deposit at the base of the canyon. This deposit, which was over 250 m thick, caused the temporal damming of the Amajac River and the formation of a fresh-water lake covering approximately 85 km² at times of maximum flooding. Immediately after the closing of the canyon, lacustrine sedimentation began and conglomeratic, sandy, clayey-silt and clayey lithofacies accumulated in the basin, with more than 150 m of detrital sediments and pyroclastic material of varying granulometry.

*The coarse-grained sediments are found at the base of the sequence and in channels, while the fine-grained sediments have a broader distribution and have a great amount of fossil flora and fauna of freshwater environment. The flora belongs to the families Salicaceae, Platanaceae, Fagaceae, Rosaceae and Equisetaceae; whereas the fauna consists of gastropods from the genera *Planorbis*, ostracods, small fishes, vertebrae rests and some insects belonging to the order Coleoptera. On the basis of stratigraphic and paleontological records, it is considered that the Atotonilco El Grande Formation has a Pliocene age (Blancan). The lacustrine sedimentation ended when the river eroded the barrier that originated the lake.*

Key words: paleo-lake, stratigraphy, sedimentology, paleontology, Pliocene, Hidalgo, Mexico.

INTRODUCCIÓN

Con el propósito de conocer el origen, litofacies, ambiente sedimentario y paleoclima en que se acumularon las rocas sedimentarias clásticas de la Formación Atotonilco El Grande, expuestas en la región de Santa María Amajac, Hidalgo, fue estudiada su litología, su fauna, su flora, los procesos químicos y físicos de sedimentación, sus rasgos geomorfológicos y sus relaciones estratigráficas, ya que sobre estos tópicos y para esta unidad litoestratigráfica no se tienen estudios consistentes. Únicamente se han publicado dos estudios geológicos regionales (Geyne *et al.*, 1963; Cantagrel y Robin, 1979) y otros muy específicos sobre fechamientos o paleontológicos (McKee *et al.*, 1992; Aguilar-Arellano y Ortiz-Martínez y Velasco-de León, 2000; Aguilar-Arellano y Velasco-de León, 2002; Becerra Martínez *et al.*, 2002; Zaragoza-Caballero y Velasco-de León, 2003). El estudio de las secuencias sedimentarias jóvenes, como las que afloran en Santa María Amajac, Hidalgo, contribuyen a documentar los eventos ocurridos en el centro de México para el Plioceno Tardío–Pleistoceno, tiempo en el que se acumularon los sedimentos de la Formación Atotonilco El Grande (Segerstrom, 1961).

El área de estudio se ubica en la parte centro-oriental del Estado de Hidalgo, en el límite entre dos provincias fisiográficas que se caracterizan por presentar relieve de gran contraste. La porción norte pertenece a la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental y el sector sur al Cinturón Volcánico Transmexicano (Lugo-Hubp, 1990). En la parte centro-sur se observa una franja NW–SE de rocas volcánicas de mayor relieve profundamente disectado; en el sector noreste se observan cordones serranos de rocas sedimentarias marinas plegadas y, en Santa María Amajac, rocas clásticas en estratos horizontales que forman lomeríos

bajos cortados por numerosos arroyos. Esta localidad se encuentra 35 km al norte de la Ciudad de Pachuca, Hidalgo, y a 5 km al noroeste de Atotonilco El Grande, Hidalgo (Figura 1).

MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

La columna estratigráfica del área estudiada tiene un alcance del Mesozoico al Reciente, donde la unidad más antigua es la Formación El Abra del Albiano–Cenomaniano, la cual está cubierta de manera concordante por la Formación Soyatal del Turoniano–Santoniano (Geyne *et al.*, 1963). El Cenozoico, que cubre discordantemente al Mesozoico, está representado por el Conglomerado Amajac (Eoceno–Oligoceno), rocas volcánicas del Grupo Pachuca, rocas clásticas de la Formación Atotonilco El Grande (Blancano) y por depósitos recientes (talud, aluvión y caliche).

En el Cretácico, cuando los mares cubrieron totalmente las áreas positivas de la región en el Albiano, se instaura en el área de estudio un ambiente somero en la denominada Plataforma de Actopan (Carrasco-Velásquez, 1971), donde inició la sedimentación de la Formación El Abra en un ambiente de plataforma carbonatada, que, de acuerdo con las características litológicas y fosilíferas que presenta, corresponde a la parte post-arrecifal. Al mismo tiempo, en la zona de talud se depositó una gruesa secuencia de brechas intraformacionales de la Formación Tamabra. En el Turoniano hubo un cambio significativo en el régimen sedimentario con un gran aporte de terrígenos, iniciando la acumulación de sedimentos calcáreo-arcillosos, arenosos y arcillosos de la Formación Soyatal, en un ambiente de plataforma clástica, en condiciones inestables que cambiaron a aguas más profundas en el Santoniano.

El aporte de terrígenos provenía de las áreas positivas al occidente, creadas como producto de la orogenia Laramide que se originó como respuesta a un cambio rápido en el incremento de la convergencia entre las Placas Farallón y Norteamericana. Dicho evento ocasionó la deformación de las rocas sedimentarias marinas, dando origen a estructuras plegadas recostadas hacia el oriente y a fallamiento inverso (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000), como se muestra en el mapa y en las secciones geológicas (Figura 2), sobresaliendo los anticlinales Atotonilco, Tiltepec y Doñana, los sinclinales Sauz Sabino y Sauz Xathe, y las fallas inversas Doñana y Sauz Sabino. Al cesar el evento compresivo en el Eoceno (Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000) se desarrolló un sistema de fallas normales de rumbo noroeste-sureste que contribuyeron a la modificación del relieve (Salvador-Flores, 2001). A finales del Eoceno e inicios del Oligoceno, ya en un ambiente continental, se depositaron los clastos que constituyen al Conglomerado Amajac en los taludes y depresiones producidas localmente por el plegamiento y fallamiento. Posteriormente, en el Mioceno Tardío, se inicia la actividad ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana de este sector (Geyne *et al.*, 1963 y McKee *et al.*, 1992), como resultado de la subducción de la Placa de Cocos, debajo de la Placa Norteamericana, que ocasionó hasta el Plioceno un intenso vulcanismo calcialcalino que dio como resultado la gruesa secuencia de andesitas, dacitas y riolitas del Grupo Pachuca. Posteriormente, en las zonas de mayor fracturamiento y fallamiento en la secuencia sedimentaria se formaron valles de montaña y profundos cañones por efecto de la erosión, y en un sector restringido de éstos (Paso Amajac, Santa María Amajac y Santorum) se acumuló en

el Blancano, de forma discordante sobre todas las unidades anteriores, la secuencia lacustre de la Formación Atotonilco El Grande (Segerstrom, 1961). Sobre esta formación se depositaron, como último evento, rocas piroclásticas y basaltos con edades entre 2.5 y 2.3 Ma (Cantagrel y Robin, 1979), que constituyen mesetas morfológicamente bien preservadas. La distribución de todas las unidades y el estilo de deformación se muestran en el mapa y secciones geológicas (Figura 2), cuya interpretación fue elaborada con base en el trabajo de Beltrán-Romero y Luna-Gómez (1994).

METODOLOGÍA

Para conocer las características litológicas, la distribución y el contenido fosilífero de la Formación Atotonilco El Grande, así como las variaciones verticales y horizontales, en una primera etapa se elaboró el mapa geológico (Figura 2). Posteriormente fueron elegidas, medidas y muestreadas de forma sistemática cuatro columnas estratigráficas cuya ubicación se indica en la Figura 2 (Sanctorum, Santa María Amajac, El Paso Amajac y Los Baños); las características distintivas y los espesores de las columnas se indican en la Figura 3. Estas columnas fueron seleccionadas por ser las más representativas y porque en ellas se encuentran los mejores afloramientos. Posteriormente fue realizada la correlación para verificar la equivalencia y las relaciones mutuas entre unidades. Las características litológicas y paleontológicas obtenidas al medir las columnas estratigráficas son una parte fundamental de los trabajos sobre sedimentología, análisis de litofacies y para su ubicación en el espacio y tiempo. El muestreo fue realizado en donde se observó un cambio litológico y/o paleontológico significativo, colectando numerosos fósiles y 56 muestras para estudios petrográficos.

El material fósil fue colectado únicamente en dos localidades, ya que en las otras es escaso o está mal preservado. En la localidad Los Baños fueron medidos 96.9 m de espesor (columna Los Baños), los fósiles fueron colectados en el intervalo de 8 a 20 m a partir de la base, en estratos de lutita limosa y arenisca de grano fino; en la segunda localidad, en el poblado de Sanctorum, se midieron 70 m de espesor (columna Sanctorum). El muestreo fue realizado en la parte inferior (intervalo 10–25 m a partir de la base) y media de la columna (intervalo 33–40 m a partir de la base), en estratos de lutita, limolita y arenisca de grano fino. Se registraron con detalle los estratos de colecta, debido a que los fósiles no necesariamente se localizan en un plano. Para el registro consideramos la unidad de sedimentación (SU) propuesta por Otto (1938); la SU es definida como el grosor del sedimento depositado bajo condiciones físicas constantes. Esta unidad definió las asociaciones comparadas. Una vez seleccionadas las asociaciones registramos el número de ejemplares por volumen (Tabla 1) y estado. Con respecto a lo último, las hojas fueron divididas en completas e incompletas (si faltaba, por ejemplo, el ápice, la base o



Figura 1. Mapa de localización de la región de Santa María Amajac, Hidalgo.

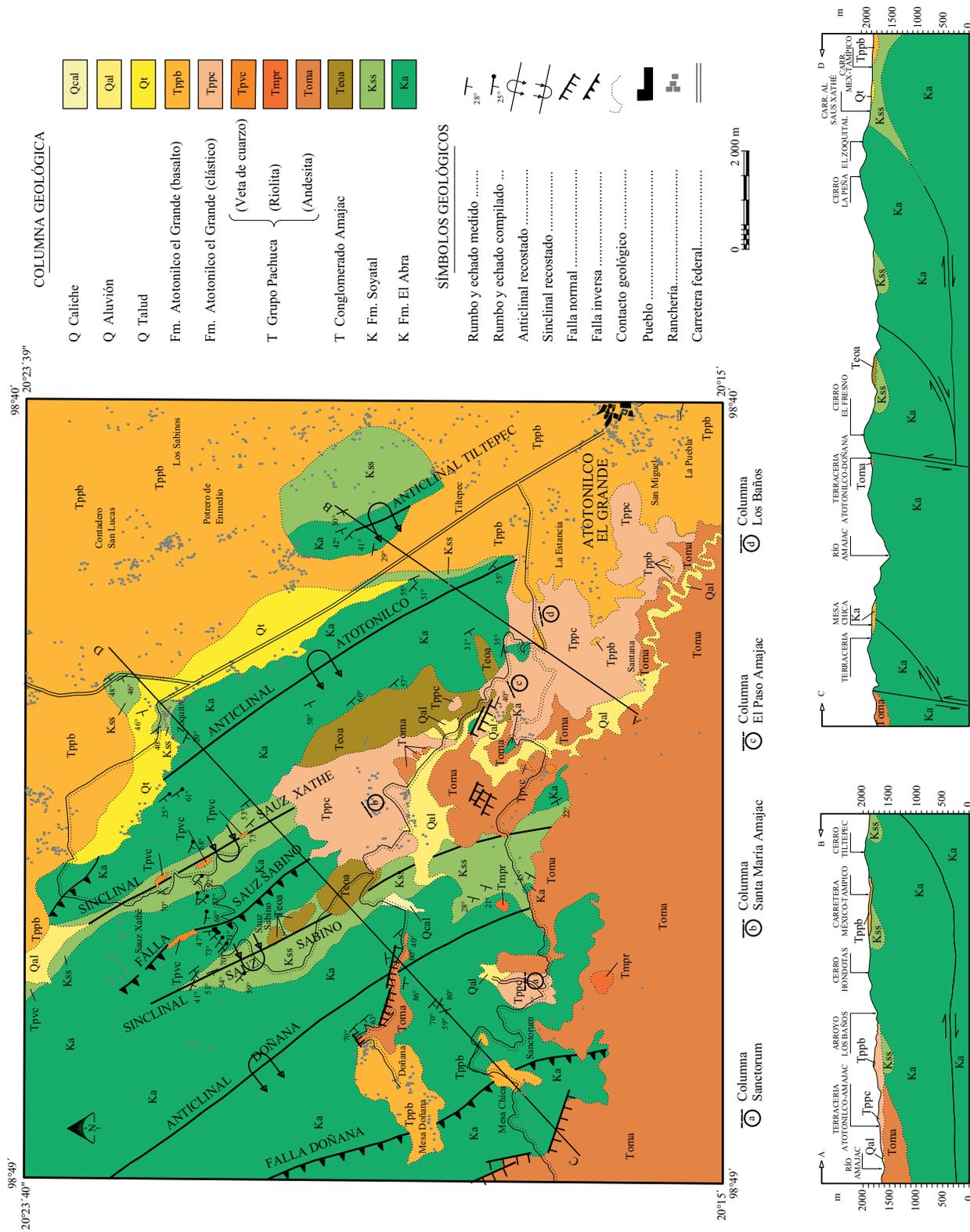


Figura 2. Mapa y secciones geológicas donde se indica la ubicación de las columnas estratigráficas medidas en la región de Santa María Amajac, Hidalgo.

un porcentaje de margen) con la finalidad de establecer su origen, grado de autoctonía y condiciones de energía en el momento del depósito. Fue utilizada la arquitectura foliar basada en la clasificación propuesta por Hickey (1973) y Wolfe (1993) para reconocer las diferentes familias de angiospermas, así como la revisión bibliográfica y consulta en los herbarios MEXU (Herbario Nacional de México) y FETZA (Herbario de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza).

SEDIMENTOLOGÍA

La Formación Atotonilco El Grande tiene un espesor de 165 m, calculados por la composición de las columnas El Paso Amajac y Santa María Amajac, y posee una composición litológica muy variada compuesta por rocas clásticas (conglomerado, arenisca, limonita y lutita), con intercalaciones de cenizas volcánicas *in situ* y piroclastos re trabajados. Cubre mediante una discordancia angular a las formaciones El Abra, Soyatal, Conglomerado Amajac y a la secuencia volcánica del Grupo Pachuca. Está coronada por derrames basálticos y cenizas volcánicas.

De las cuatro columnas medidas de la Formación Atotonilco El Grande, la columna estratigráfica El Paso Amajac con un espesor de 151.4 m, es la más representativa con 9 unidades litológicas fácilmente correlacionables con las otras tres columnas. Por ello la describimos a continua-

ción con detalle, desde la base hasta la cima:

Unidad 1 (0.0–30.0 m). Está compuesta por un conglomerado polimictico basal con abundante matriz, con clastos redondeados y subredondeados de andesita, riolitas y tobas. Estos elementos varían en tamaño de cantos pequeños a bloques y se presentan en estratos tabulares de más de 1 m de espesor; otros estratos presentan estratificación cruzada o lenticular.

Unidad 2 (30.0–43.2 m). Está compuesta por grauwascas líticas de grano medio a grueso de baja esfericidad y subredondeados, de color gris, con clastos de rocas volcánicas, cuarzo, feldespato, plagioclasa y vidrio esferulítico; hacia la parte media se presentan cuerpos lenticulares de conglomerado como rellenos de canal; en la parte superior disminuye el tamaño de grano, presentándose estratos delgados de limonitas. En este nivel se encuentran hojas fósiles y troncos.

Unidad 3 (43.2–53.2 m). Está compuesta por litarenitas cementadas por carbonato de calcio, con fragmentos de plagioclasa, andesita, cuarzo y piroxeno; la fábrica es isotrópica con empaque suelto y textura epiclástica psamítica de grano fino; los clastos son subangulosos con baja esfericidad. En la parte superior se presentan algunos cuerpos lenticulares de conglomerado y un horizonte de 4 m de lutita de color gris oscuro con alto contenido de materia orgánica diseminada y hojas medianamente preservadas.

Unidad 4 (53.2–60.2 m). Está compuesta por grauwaca feldespática de color gris, con clastos de tamaño de

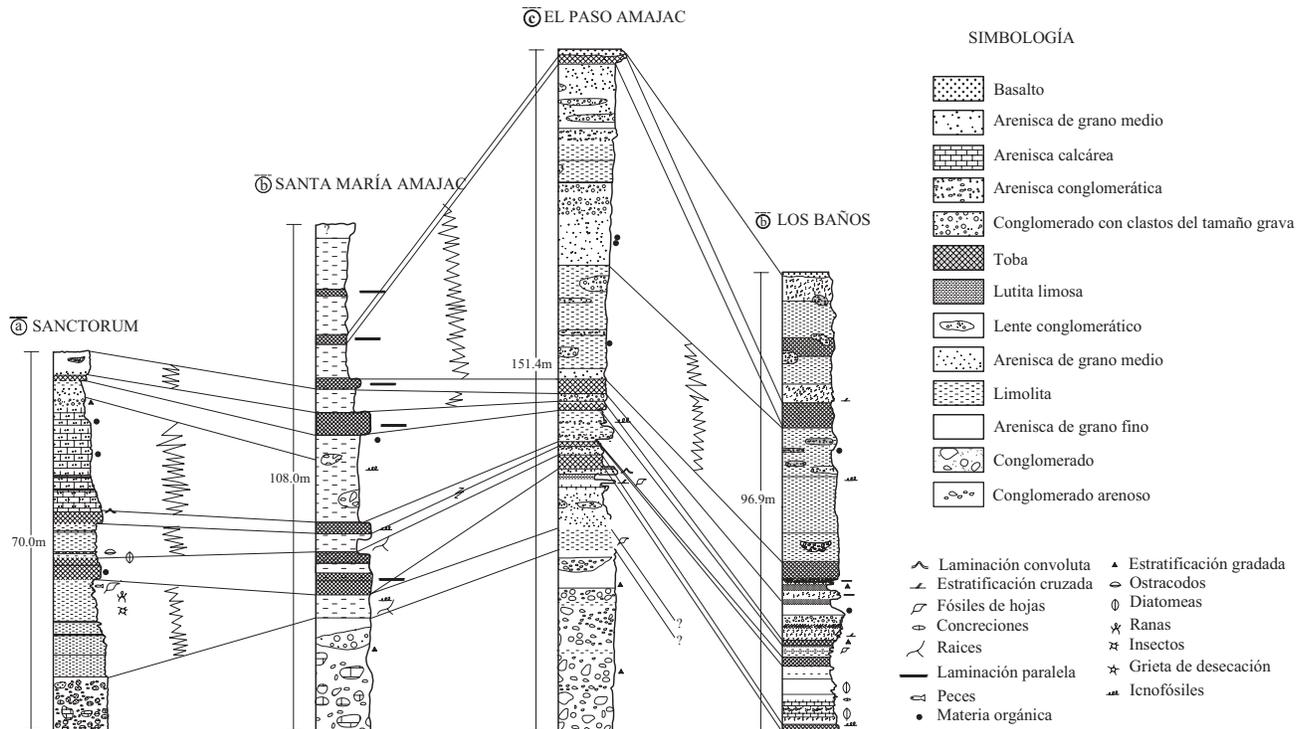


Figura 3. Columnas estratigráficas medidas en la secuencia lacustre de la Formación Atotonilco El Grande.

arena fina, en estratos que varían en espesor de 20 a 30 cm, algunos con estratificación convoluta; en su parte media tiene un horizonte de 3 m de ceniza volcánica de composición silícica, el cual está cubierto por litarenita de grano medio en la que predominan fragmentos subredondeados de andesita, cuarzo y feldespato; es notable la presencia de pequeños cuerpos lenticulares de arenisca conglomerática compuesta por clastos de andesita y piroclastos retrabajados. En las limolitas se observa un horizonte con diatomeas y fragmentos de hojas.

Unidad 5 (60.2–97.4 m). Está compuesta por limolitas laminadas de color gris oscuro en estratos de 1.0 a 2.5 m de espesor, en las que se presentan escasos ejemplares de ostrácodos, diatomeas y hojas; en la parte inferior de esta unidad aparecen intercalados dos horizontes de tobas líticas de color blanco con abundantes fragmentos de pómez, de 2.0 y 4.0 m de espesor; también se presentan intercalados cuerpos lenticulares de conglomerado y arenisca conglomerática, los cuales son más abundantes hacia la parte superior de la unidad, donde los horizontes lenticulares son más grandes y de granulometría más gruesa.

Unidad 6 (97.4–114.4 m). Está compuesta por areniscas de grano fino de color gris claro, con clastos de origen volcánico (fragmentos de andesita, plagioclasa, mica y cuarzo) de baja esfericidad y subangulosos; las areniscas cambian en la parte superior de la unidad a areniscas conglomeráticas con clastos volcánicos subredondeados. En este intervalo se presentan lentes conglomeráticos aislados.

Unidad 7 (114.4–121.4 m). Está compuesta por limolitas y grauwacas líticas de grano fino, poco compactas, formadas por fragmentos subangulosos de rocas volcánicas andesíticas y en menor proporción feldespatos, en estratos de 10 a 30 cm de espesor. Aparecen de manera aislada cuerpos lenticulares de conglomerado polimíctico poco compacto.

Unidad 8 (121.4–133.4 m). Está compuesta por limolitas calcáreas de color gris, en estratos de 30 a 60 cm de espesor, en las cuales, hacia la parte superior, disminuye el contenido de carbonato de calcio y aumenta el tamaño de grano, primero a limolitas arenosas y después a areniscas conglomeráticas.

Unidad 9 (133.4–151.4 m). Está compuesta por litarenitas de grano medio de color gris claro, con partículas subredondeadas de andesita y feldespato, en estratos de 30 a 70 cm de espesor; en la parte inferior aparecen abundantes lentes de arenisca conglomerática que disminuyen hacia la parte alta, donde la secuencia termina con un horizonte de 1.5 m de espesor de tobas líticas de color blanco.

Las características litológicas descritas en la columna anterior o en las unidades equivalentes de las otras tres columnas medidas, muestran que la secuencia sedimentaria estudiada presenta gran variación en tamaño de grano y madurez, ya que la granulometría incluye desde bloques hasta arcillas. Los cambios granulométricos y de madurez son resultado de las variaciones en la capacidad de transporte, de la distancia de transporte, de las diferentes litologías de

Tabla 1. Medición de bloques para cuantificar abundancia de hojas. Se especifica la unidad de volumen cúbico de donde se extrajo material (unidad SU).

	Columna	
	Los Baños	Sanctorum
<i>Bloque 1</i>		
Volumen	0.41 mt ³	0.20 mt ³
Número de ejemplares	20	13
<i>Bloque 2</i>		
Volumen	0.26 mt ³	0.20 mt ³
Número de ejemplares	16	8
<i>Bloque 3</i>		
Volumen	0.60 mt ³	0.20 mt ³
Número de ejemplares	24	13

las rocas fuente, y dependen del lugar en donde ocurrió el depósito dentro de la cuenca. Los clastos fueron transportados por los siguientes medios: por corrientes fluviales, erosión de la costa y, en menor proporción, por acción eólica sobre la playa. El tamaño del material introducido por corrientes fluviales depende de la capacidad de transporte. Así se originaron depósitos de extensión limitada, en los que predominan las gravas en zonas muy someras formando playas pedregosas y rellenos de canal. En general, el tamaño de las partículas disminuye hacia el centro del lago donde se depositaron areniscas, limolitas y/o lutitas. Los sedimentos resultantes de la erosión de la costa se distribuyeron de manera restringida en la proximidad de la zona de aporte, caracterizándose por facies de conglomerado de clastos pequeños, areniscas conglomeráticas y areniscas de grano grueso, con partículas subangulosas (Columna Sanctorum, Santa María Amajac y El Paso Amajac). Las cenizas retrabajadas fueron arrastradas a la cuenca por corrientes fluviales después de haber sido depositadas en las zonas montañosas próximas y en las costas del lago, como lo indican la mezcla con limos y la presencia de clastos angulosos o cristales rotos que evidencian poco transporte. En el caso del material transportado por el viento, su tamaño y textura son uniformes; por lo general las partículas son de arenas medias como las que se observan en la parte media de la columna el Paso Amajac.

Los sedimentos no presentan una distribución uniforme en toda la cuenca, aunque, de manera general, las partículas tienden a disminuir en tamaño de gruesos en la base y parte externa de la cuenca, a finos en el centro de la misma y en la parte superior de la columna, ya que los procesos sedimentarios en lagos son fuertemente influenciados por factores tanto físicos como climáticos (Reineck y Sing, 1980; Reading, 1986). En la secuencia lacustre se encuentran bien diferenciadas las zonas marginales del paleolago, de manera que muestran la existencia de una planicie de inundación que, debido a las fluctuaciones en el nivel del agua, era periódicamente inundada como lo indican las secuencias limosas de la parte superior de la secuencia;

asimismo, las litofacies de conglomerado y conglomerados arenosos formaron en principio un delta principal que, conforme avanzaba la sedimentación, originaron otros de menores dimensiones. Por otra parte, las estructuras sedimentarias como la estratificación lenticular, presente en la parte media y superior de la secuencia (columna El Paso Amajac) indica la presencia de alta energía y variaciones constantes en la dirección de flujo en varios periodos de la vida del lago; además, la exposición subaérea a la que eran sometidos los sedimentos queda de manifiesto en la columna Los Baños, en cuya parte inferior observamos horizontes con marcas de desecación y marcas de gotas de lluvia. Las condiciones de alta energía en la zona marginal del paleolago no permitieron la preservación de fauna y sólo se preservó flora en pequeña cantidad, en comparación con las zonas distales del lago

En la zona más profunda de la cuenca, la sedimentación detrítica se efectuó principalmente por decantación, lo que queda de manifiesto por la distribución y acumulación de arenisca de grano fino, limolita y lutita poco consolidadas que están particularmente influenciadas por la morfología del fondo y por la estratificación de las masas de agua. La sedimentación de materiales gruesos en zonas profundas y relativamente alejadas de la zona marginal del paleolago pueden atribuirse a la existencia de flujos de fondo, corrientes de turbidez y deslizamientos subacuáticos (slumps), como los que se tienen en la parte media de la columna El Paso Amajac. Las diferencias de densidad son responsables de algunos flujos de fondo asociados a excesos de turbidez (o de materiales en suspensión), pero difieren de las corrientes de turbidez en que son de más larga efectividad. Los sedimentos limosos y limolitas calcáreas son los depósitos más abundantes de la parte profunda de la cuenca, donde se encuentran también depósitos orgánicos (diatomeas).

Las condiciones oxidantes atestiguadas por la presencia de hematita en algunos estratos, propiciaron la baja preservación de fauna bentónica en esos horizontes; lo mismo ocurrió por la acción de organismos que causaron bioturbación. Ésta se reconoce en las areniscas de grano fino y en las limolitas de la localidad de Santa María Amajac, donde se observan horadaciones e icnofósiles.

PALEONTOLOGÍA

Como resultado de las diferentes litologías que se presentan en las localidades Sanctorum y Los Baños, con mayor número de ejemplares fósiles, grado de conservación y de abundancia, observamos las siguientes características: en la localidad de Los Baños el material que fosilizó en las areniscas de grano fino es más abundante (Tabla 1), aunque la calidad de la impresión no es buena en general, salvo en aquellos estratos donde se presenta hematita, la cual favorece el proceso de fosilización. La mayor cantidad de material en esta área corresponde a hojas de encino (*Quercus*), de textura coriácea que, por su naturaleza y

tamaño, fosilizaron mejor en comparación con las hojas que se encuentran presentes en la lutita limosa donde el número es menor, pero el detalle morfológico es más fino. En esta zona, el número de hojas por unidad de volumen es casi igual (Tabla 1) para los bloques 1 y 3 de Sanctorum, y mayor para el bloque 2 de Los Baños en comparación con Sanctorum.

Con relación a los géneros, en Sanctorum es más abundante el género *Platanus*, seguido por *Populus*, mientras que *Quercus* es más escaso.

En la Figura 4 se muestra el estado de fragmentación de las hojas. Se observa que en los bloques medidos en la localidad de Sanctorum, el número de hojas incompletas en la base de la columna duplica el número de hojas completas; en la parte media de la columna la relación es casi la misma entre ejemplares completos e incompletos. Esto es contrario a lo que se esperaría teóricamente ya que representa la parte profunda del lago, donde la energía es menor y deberían presentarse hojas enteras. Es probable que el tamaño y forma del ápice afecten estos resultados, ya que la mayoría de las hojas corresponden al tamaño micrófilo 2 y 3, según la clasificación de Wolfe (1993), y poseen ápices agudos y acuminados que son muy susceptibles a la ruptura; en la mayoría de las hojas incompletas son estas partes las que faltan.

En contraste, en Los Baños (zona proximal y planicie de inundación) el número de hojas incompletas casi triplica a las otras. Este hecho se fundamenta en una energía mayor del agente de transporte ya que las hojas se encuentran en diferentes direcciones, en sedimentos más gruesos y con estratificación gradada y cruzada.

Con respecto a la diversidad, los resultados indican diferencia para las dos zonas. Esto tiene su explicación en el tamaño (85 km²) y forma del lago (Figura 5), ya que las localidades quedan precisamente en los extremos. En la Figura 6, donde se muestra el porcentaje de géneros, podemos observar la diversidad para la localidad de Los Baños. En un total de 500 hojas recolectadas se identifican 39 morfotipos (Velasco-de León y Arellano-Gil, 2001)

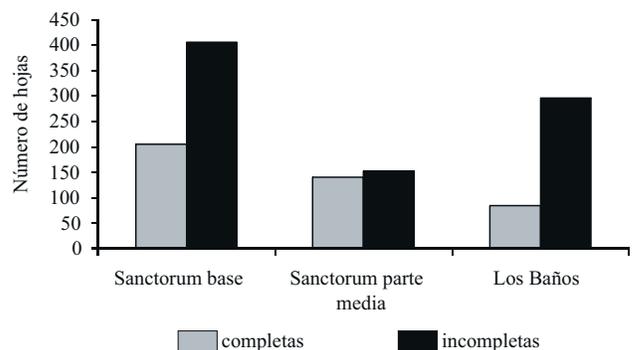


Figura 4. Estado de fragmentación de las hojas en las localidades fosilíferas que muestra la relación de hojas completas e incompletas.

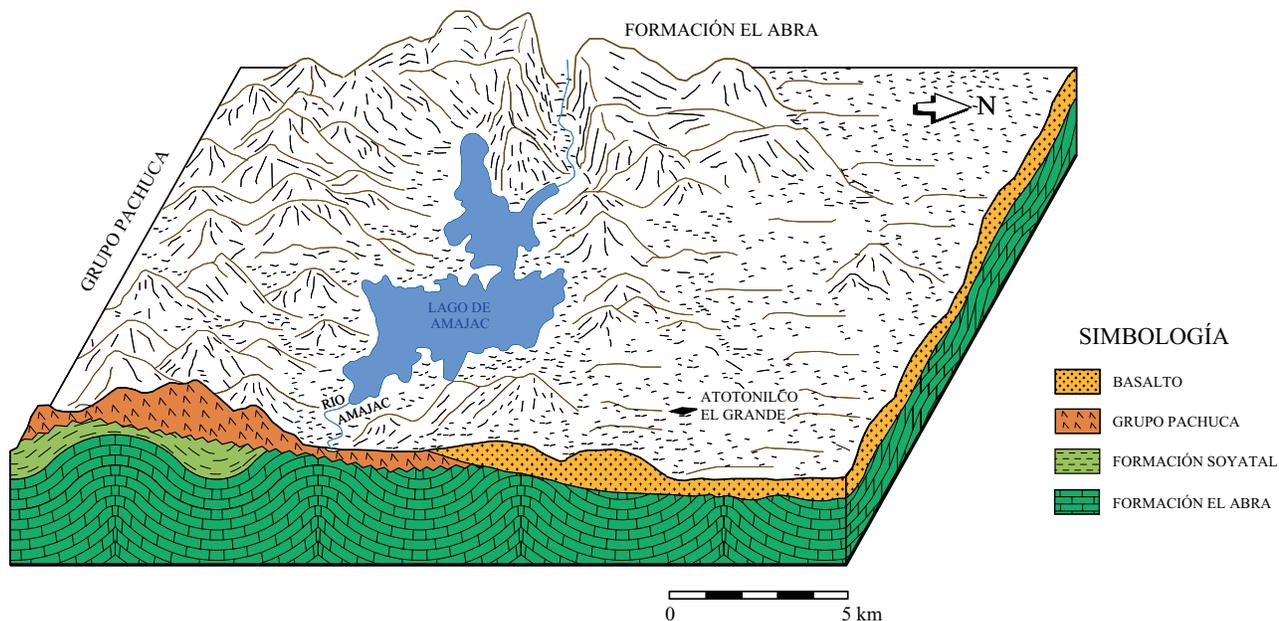


Figura 5. Esquema que muestra la distribución del paleo-Lago de Amajac en tiempos de máxima inundación.

entre los cuales la familia Fagaceae (*Quercus*, Figura 7e) es la más abundante. Se ha registrado la presencia de un estrato que contiene únicamente tallos de *Equisetum* (Aguilar-Arellano et al., 2002). Para Sanctorum base y parte media, se han registrado 27 morfotipos de hojas, así como pocas equisetales, además de otros órganos como frutos (*Cercidiphyllum?*), inflorescencias y hojas de escuamiformes (*Juniperus*). La Figura 6 muestra que la familia mejor representada en Los Baños es la Fagaceae con el género *Quercus* (Ortiz-Martínez y Velasco-de León, 2000). Velasco-de León y Romero-Rangel (2001) reportan la probable presencia de *Q. crassifolia*, *Q. laeta*, *Q. greggii* y existe la posibilidad de dos especies nuevas ya que dos ejemplares fósiles no se asemejan a ninguna de las diez especies actuales revisadas. Esto apoya el estudio realizado

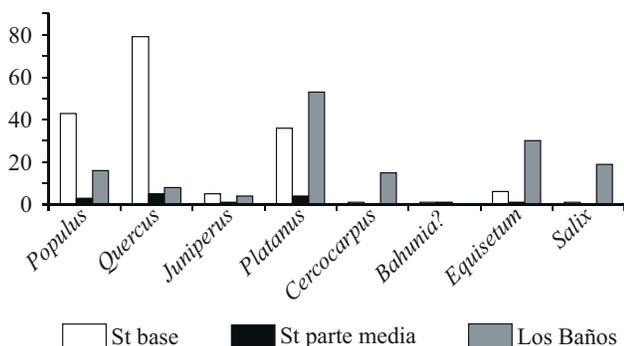


Figura 6. Porcentaje de géneros encontrados en las localidades Los Baños y en la base y parte media de la columna Sanctorum (St).

por Aguilar-Arellano y Ortiz-Martínez y Velasco-de León (2000) cuyos resultados permiten proponer la presencia de un bosque de encino para esta época y un clima templado subhúmedo (Aguilar-Arellano y Ortiz-Martínez y Velasco-de León, 2000; Velasco-de León y Aguilar-Arellano, 2002).

La fauna es abundante: se colectaron peces de la familia Goodeidae (Becerra-Martínez et al., 2002), (Figura 7b); insectos (Figura 7a) (Velasco-de León et al., 2000; Zaragoza-Caballero y Velasco-de León, 2003), reptiles y anuros (Figura 7c) (Fuentes-Guerra y Velasco-de León, 2002); además de la presencia de tres géneros de ostrácodos: *Candona*, *Darwinula* y *Limnocythere* (Reyes-Torres et al., 2002).

LITOFACIES

A continuación describimos las principales características de las seis litofacies que se identificaron en las columnas estratigráficas medidas (Figura 3) y que proporcionan los elementos estratigráficos y sedimentológicos en la interpretación y propuesta para el modelo del paleo-Lago de Amajac.

a) Litofacies de conglomerado. Está representada por rocas conglomeráticas, con variaciones en la composición, tamaño y forma de sus clastos. En algunas se observa estratificación paralela o cruzada, o bien estratos irregulares y masivos. Proporcionalmente dominan los clastos de andesita, aunque también se presentan cantidades subordinadas de riolita, toba y caliza. El tamaño de grano es de grava gruesa, cantos y hasta bloques, presentándose estos elementos medianamente compactados. La matriz es are-

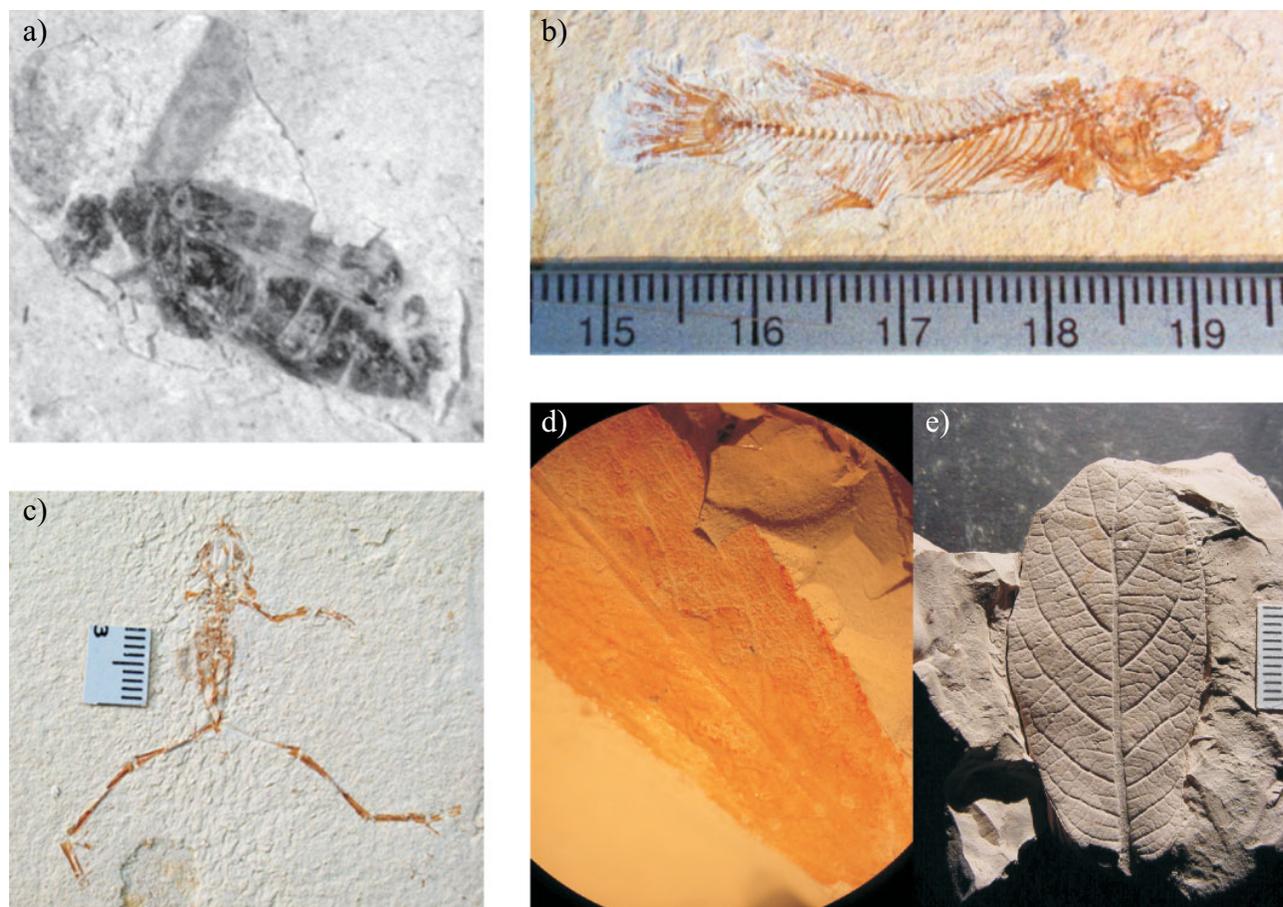


Figura 7. Ejemplares fósiles colectados en la Formación Atotonilco El Grande: a) Vista lateral de *Epicauta sanctoruensis* (CFZ-ST28); b) Impresión de pez completo, este tipo es abundante (CFZ-ST430); c) Anfibio que muestra extremidad anterior *Hyla* sp.? (CFZ-ST-10097); d) Fragmento de hoja con similitud a las hojas actuales de *Salix* sp. (CFZ 93); e) Hoja de angiosperma del género *Quercus* sp. (CFZ-SMA72), uno de los morfotipos más abundantes.

nosa y en ocasiones presenta cementación por carbonatos. Las litofacies de conglomerado se encuentran en la base de tres de las columnas medidas (Figura 3) y en algunos casos se observa como relleno de paleocanales dentro de secuencias más finas. Los conglomerados, conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas se caracterizaron en la columna medida en El Paso Amajac (Figura 3). Los conglomerados y conglomerados arenosos están en la base de esta columna y, en conjunto, muestran gradación normal y estratificación cruzada. La arenisca conglomerática se encuentra intercalada en horizontes más finos a lo largo de la secuencia, principalmente hacia la cima. También se reconoció la presencia de canales tributarios a lo largo de la secuencia, principalmente hacia la cima, donde se observa una cantidad considerable de lentes conglomeráticos de tamaño variable, con estratificación cruzada, lo cual indica los cambios en la dirección de las pequeñas corrientes del lago. Los clastos de dicho conglomerado corresponden con la litología propia de las secuencias expuestas en las proximidades, por lo que la fuente de aporte se encontraba cerca del lago.

b) Litofacies de arenisca. Es una secuencia de color verde o gris, con tamaño de partículas que varían de arenas gruesas a finas; presenta laminación paralela, laminación cruzada, laminación convoluta, gradación normal, grietas de desecación y marcas de gotas de lluvia. Los mejores afloramientos de esta litofacies se encuentran en las columnas de Los Baños y El Paso Amajac (Figura 3). Los clastos presentan mala clasificación textural y mineralógica y los estratos son tabulares, con varios niveles con abundantes fósiles de hojas. Esta litofacies contiene grauwacas líticas, litarenitas (algunas calcáreas), arcosas y, en menor proporción, areniscas conglomeráticas. Las grauwacas contienen matriz arcillosa y cementante silíceo o calcáreo. Su mineralogía está constituida por feldespato, plagioclasa, cuarzo, biotita, clorita, hornblenda, piroxeno, hematita y calcedonia; de forma subordinada se presentan líticos constituidos por fragmentos de rocas volcánicas (andesita y riolita), y se encuentran también fragmentos de caliza y caliza arcillosa. En algunas muestras observamos vidrio esferulítico, pómez y materia carbonosa. La amplia distribución de las arenas refleja condiciones de flujo uniforme y aporte continuo en

las distintas partes del lago. Las litofacies de arenisca que corresponden con la margen del lago se ubican en donde hay areniscas con estratificación cruzada en estratos de espesor uniforme, por lo que se infiere la existencia de una margen más o menos amplia sobre la que se depositaron sedimentos en una superficie con un relieve ligeramente uniforme.

Las litofacies de arenisca conglomerática corresponden a paleocanales que se desarrollaban en las zonas de hondonadas o superficies de erosión, las cuales fueron rellenadas por estos depósitos para nuevamente ser cubiertos por la sedimentación de capas de material detrítico del tamaño de arenas medias y finas. La zona de llanura de inundación (Los Baños, Amajac) está representada por la facies de arenisca de grano fino, en donde aparecen estructuras de grietas de desecación y gotas de lluvia por la exposición subaérea en algunos períodos de la vida del lago o cambios en el nivel del agua.

c) Litofacies de limolita. Está representada por una potente secuencia mal consolidada de limos que presenta intercalaciones esporádicas de horizontes de material volcánico; los estratos son tabulares y varían en espesor de 0.5 a 5 m. La columna en la que se encuentran mejor expuestos estos depósitos (El Paso Amajac) contiene varios lentes de arenisca conglomerática y de conglomerados polimícticos. Las limolitas se componen principalmente de fragmentos de rocas volcánicas de composición andesítica, pómez, vidrio de composición ácida y algunos cristales de sanidino, plagioclasa y cuarzo. Su acumulación ocurrió en la parte central del lago y en la planicie de inundación bajo condiciones de relativa tranquilidad y baja energía. Ahí mismo se depositaron algunos horizontes de yeso y de cenizas volcánicas. Los lentes de conglomerados y de arenisca conglomerática observados indican que existieron varios pequeños y medianos afluentes fluviales que aportaban sedimentos gruesos a la cuenca. Por sus características de depósito, esta litofacies corresponde a uno de los últimos eventos en el periodo de vida del lago.

d) Litofacies de lutita limosa. Se compone de rocas de color gris, de aspecto lodoso, con abundantes fósiles (impresiones de hojas); los estratos son delgados (20 a 40 cm de espesor), con laminación paralela. Se encuentra mal consolidada y contiene algunos horizontes de carbón y otros con concreciones de caliza arenosa. Su distribución está restringida a la parte media de la cuenca.

e) Litofacies de textura pelítica. Consiste en una secuencia de lutita de tonos crema a amarillo ocre sin limos. De forma aislada contiene intercalaciones de estratos delgados de margas, limonitas y areniscas de grano fino compuestas por cristales de feldespato, plagioclasa y hornblenda; igualmente observamos fragmentos microscópicos de rocas volcánicas, pómez y esquirlas de vidrio. Es una secuencia que se presenta finamente laminada, con espesores de estratos que varían de 1 a 3 cm. Las estructuras comunes típicas de esta facies son laminación paralela y laminación convoluta; presenta un alto contenido fósil de hojas, peces, ostrácodos, gasterópodos, gran cantidad de diatomeas

penadas y algunos horizontes carbonosos. Los sedimentos de esta facies se acumularon en condiciones de agua muy tranquilas y con un aporte importante de sedimentos.

f) Litofacies de flujos de rocas piroclásticas. En las secciones medidas se presentan dos facies de rocas volcánicas que se distinguen por haberse acumulado (1) en un cuerpo de agua directamente sobre los sedimentos lacustres y (2) en condiciones subaéreas para posteriormente ser transportadas a la cuenca. Las primeras son rocas de color gris al fresco y blanco al intemperismo; los estratos son tabulares y tienen espesores que van de 3 a 10 cm, aunque pueden llegar hasta los 2 m; en algunos estratos se presentan impresiones carbonizadas de hojas. Son más abundantes los flujos de ceniza volcánica de color gris, compuesta por fragmentos de cristales de feldespato, vidrio de composición ácida y fragmentos de andesita. Las segundas corresponden a piroclastos retrabajados, mal clasificados, angulosos, de color gris claro, y con abundantes cristales de cuarzo y materia orgánica entre las capas; se presentan en estratos tabulares que varían de 3 a 10 cm y hasta un metro de espesor. Contiene líticos de pómez, andesita y riolita con tamaño de arena y grava.

Los piroclastos que no fueron retrabajados se presentan angulosos y son de mayor espesor, en tanto que los retrabajados son subangulosos a subredondeados, en horizontes más delgados y con composición más heterogénea. El transporte ocurrió desde áreas próximas en las laderas cercanas a la cuenca en donde fueron originalmente depositados y después removidos al centro y periferia del lago.

ORIGEN DEL PALEOLAGO

El paleo-Lago de Amajac corresponde a la categoría de lago pequeño intermontano (Walker y James, 1994) que recibió gran cantidad de sedimentos por transporte fluvial que lo colmataron rápidamente.

Con base en análisis morfológicos del paleorelieve se interpreta que, durante el Plioceno Temprano, el Río Amajac labró por erosión un gran cañón de más de 1,000 m de profundidad en la secuencia de carbonatos de plataforma interna de la Formación el Abra, similar al actual cañón que existe aguas abajo del área estudiada, y con características parecidas al cañón que formó el Río Venados, donde se originó el lago de Meztitlán, Hidalgo (García-Arizaga *et al.*, 1996; Alarcón-Parra, 1998). El paleocañón presentaba pendientes próximas a la vertical, con taludes inestables debido al fracturamiento que presentan las calizas *wackestone* como resultado de una fase de deformación compresiva (Orogenia Laramide) sobre secuencias mecánicamente muy competentes (Suter, 1987; Eguiluz-de Antuñano *et al.*, 2000).

Durante el Blancano temprano, el intenso fracturamiento, la fuerte pendiente, la presencia de agua y la acción de la gravedad dieron lugar al desprendimiento de materiales de las zonas inestables. La avalancha de escombros

causó un rápido cierre temporal del Río Amajac, dando origen al paleo-Lago de Amajac. Posteriormente comenzó la acumulación de sedimentos lacustres cuya distribución estuvo condicionada principalmente por el aporte fluvial. En tiempos de máxima inundación el lago alcanzó una profundidad cercana a los 250 m y una superficie aproximada de 85 km² (Figura 5). La sedimentación terminó cuando el mismo río empezó a remover los materiales de la avalancha que cerró el cañón al colmatarse de sedimentos la zona del embalse. Este evento probablemente se asocia a una mayor carga hidráulica causada por una gran precipitación pluvial y a que la barrera producida por la avalancha no estaba compactada y permitía un importante flujo subterráneo como ocurre actualmente en el Lago de Mezquitlán, Hidalgo (García-Arizaga *et al.*, 1996). Posteriormente siguió una fase de intensa erosión de los sedimentos lacustres que se presentaban medianamente compactados, quedando en la actualidad únicamente lomeríos discontinuos de sedimentos lacustre profundamente disectados.

INTERPRETACIÓN

Las características geomorfológicas donde se formó y desarrolló el paleo-Lago de Amajac son contrastantes: en primer lugar destaca su morfología que corresponde a un valle circundado por topografía de sierras de calizas de la Formación El Abra, de andesitas y riolitas del Grupo Pachuca, de cerros constituidos por lutitas de la Formación Soyatal y lomeríos formados por el Conglomerado Amajac, por lo que los sedimentos provienen de fuentes muy cercanas a la cuenca o por retrabajo de cenizas volcánicas de composición silícica acumuladas de manera contemporánea a la sedimentación en el lago.

Las características y distribución de los sedimentos indican que su depósito fue controlado por los procesos físicos, químicos y biológicos típicos de un lago templado al que llegaban sedimentos de un río principal perenne y numerosos arroyos intermitentes de montaña. El lago persistió porque el agua que llegaba a él procedente de fuentes diversas (lluvias, aportes del drenaje superficial o subterráneo), excedía a las pérdidas (evaporación e infiltración). Sin embargo, las variaciones climáticas produjeron fluctuaciones en el nivel del agua del lago y, como consecuencia, en el tipo y cantidad de sedimentos acumulados, lo cual se manifiesta en los contrastes litológicos verticales y horizontales de la secuencia en las cuatro columnas medidas (Figura 3).

Al analizar las litofacies se interpreta un primer evento de sedimentación, representado por conglomerados acumulados cuando aún no se cerraba la cuenca y en las etapas iniciales después del cierre (conglomerado basal). Su depósito ocurrió por transporte fluvial del principal afluente del paleolago; las condiciones de depósito variaban de grandes avenidas con mucha carga de sedimentos gruesos en temporadas de lluvia a períodos más tranquilos en temporada

de estiaje, lo que se evidencia por la distribución en varias áreas periféricas, afectadas por algunas desembocaduras de pequeños paleocauces. Las litofacies gruesas corresponden a la parte más profunda y marginal del paleolago y fueron acumuladas en la etapa inicial de sedimentación. Esto se interpreta por el tamaño de los clastos, los cuales se depositaron en el fondo de la cuenca sobre las secuencias preexistentes, además de que difícilmente pudieron ser arrastrados hacia el centro de la misma cuando el cuerpo de agua tenía gran extensión. Son excepción los rellenos de canal que indican la formación de surcos erosivos y posterior relleno, sobre todo cuando bajaba el nivel del agua de forma significativa o cuando ocurrió una mayor carga hidráulica.

Al producirse el cierre de la cuenca fluvial fue creciendo el cuerpo de agua por lo que sobre el conglomerado basal comenzó la acumulación de las litofacies de arenisca, cuya procedencia se asocia principalmente con el intemperismo y erosión de las rocas volcánicas del Grupo Pachuca. La acumulación de las arenas ocurrió en canales, playas y sobre todo en condiciones acuosas alejadas de la desembocadura del río y de los arroyos. Algunos horizontes muestran una clara influencia volcánica, ya que presentan cristales de mica y feldespato bien preservados. Estos materiales nos permiten interpretar que hubo eventos volcánicos próximos simultáneos a la sedimentación del paleolago. Cuando la facies de arenisca se presenta con intercalaciones de sedimentos más finos como los que se tienen a lo largo de la columna de Sanctorum (Figura 3), se infiere que la sedimentación ocurrió en la parte más profunda del lago o en temporadas de estiaje con poco aporte de sedimentos. Inclusive, se tiene la presencia de cementante de carbonato en algunos horizontes arenosos, el cual probablemente provino de la disolución de carbonatos de la Formación El Abra situados en las proximidades.

Las facies de limolita se acumularon en cuerpos de agua completamente estancada, a partir de sedimentos que se encontraban en suspensión; su tamaño fino, la abundancia de materia orgánica y la ausencia de evidencia de corrientes de arrastre y oscilantes soportan esta interpretación. También se acumularon en las zonas de la planicie de inundación, lo que se interpreta por la asociación de abundantes raíces e icnofósiles (columnas Santa María Amajac y El Paso Amajac) y delgados horizontes de yeso (columna Santorum). La acumulación de las lutitas limosas ocurrió en la zona litoral del paleolago en donde se formaron pequeños estanques de aguas muy tranquilas, propiciando la acumulación de sedimentos finos que recibieron aporte importante de materia orgánica consistente en tallos de equisetales; estos depósitos se caracterizan por estratificación tabular y algos horizontes bioturbados.

En la facies de textura pelítica abundan los restos de plantas y materia orgánica diseminada lo que indica que las condiciones físicas y químicas en el paleolago eran adecuadas para la proliferación y preservación de diferentes organismos; igualmente se interpreta una alta concentración de iones disueltos en el agua que permitió la proliferación

y supervivencia de organismos como las diatomeas. La acumulación ocurrió sobre superficies regulares y sólo en ciertos lugares en pendientes pronunciadas, lo que ocasionó que al depositarse los sedimentos se acomodaran por gravedad desarrollando laminación convoluta.

La presencia de material piroclástico y epiclástico indica los diferentes eventos volcánicos que se suscitaban al sur y suroeste del paleolago. Algunos ocurrieron en zonas muy próximas teniendo influencia directa en la sedimentación de la cuenca. La intercalación de material piroclástico con las limolitas, que se observa en la columna de Santa María Amajac, es la evidencia de los diferentes periodos de vulcanismo que existió en el tiempo de la vida del lago.

Cada una de estas litofacies, junto con las estructuras sedimentarias y contenido fósil, muestran la dinámica que se produjo en el lago, la cual era regida principalmente por una corriente principal y numerosos arroyos que aportaban un gran volumen de sedimentos. En ocasiones, la precipitación pluvial fue muy abundante dando lugar a alta carga hidráulica, por lo que en temporada de lluvias se llegaba a cubrir la planicie de inundación, tal como ocurre en el actual Lago de Meztitlán, Hidalgo (Beltrán-Romero y Luna-Gómez, 1994; Salvador-Flores, 2001); esto se comprueba por los distintos niveles estratigráficos donde se presentan grietas de desecación con marcas de gotas de lluvia (columna Los Baños).

Los fósiles encontrados son variados y proporcionan información paleoecológica sobre el clima y salinidad del área. Los peces de la familia Goodeidae sólo se desarrollan en cuerpos de agua dulce y temperaturas de 18–24°C (Becerra-Martínez et al., 2002) al igual que los anfibios. Las márgenes fueron habitadas por *planorbis*, otros gasterópodos no determinados y los ostrácodos *Candona patzcuaro*, *C. caudata*, *Darwinula stevensoni*, *Limnocythere itasca* y *L. bradbury* e indican una salinidad de 1,150 a 3,150 ppm y una temperatura de 20–26.6°C (Reyes-Torres et al., 2002). Además de la presencia de diatomeas penadas que indican un pH básico (Salvador-Flores, 2001).

En la etapa final de la vida del lago tuvo lugar un periodo de mayor carga hidráulica causada por una gran precipitación pluvial, durante el cual ocurrieron deslizamientos por gravedad en los materiales poco cohesivos que formaban la barrera natural del lago (avalancha). Como resultado, los materiales de la barrera comenzaron a ser removidos, situación que llegó a su punto crítico cuando, al colmatarse de sedimentos la zona del embalse, el agua comenzó a desbordarse y a erosionar a mayor velocidad los depósitos de avalancha y los sedimentos del lago. Como consecuencia, el nivel del agua fue descendiendo hasta que el lago desapareció y se originó nuevamente la actual cuenca fluvial del Río Amajac.

Si consideramos la composición de los granos, la variación de tamaños, la dirección de flujo, la energía de las corrientes fluviales que entraban en el lago, la acción eólica sobre el cuerpo de agua dulce, la flora y fauna, podemos

interpretar que en la región del paleolago existía un clima templado con precipitación pluvial alta, que aportaba gran cantidad de sedimentos con sus correspondientes cambios estacionales típicos, cambios que se acentúan al final de la vida del lago cuando las condiciones se hicieron más áridas (horizontes de yeso), en gran medida por la mayor actividad ígnea.

CONCLUSIONES

Las características sedimentológicas y estratigráficas que presenta la secuencia lacustre de la Formación Atotonilco El Grande son típicas de una secuencia lacustre de agua dulce de clima templado. Las variaciones litológicas incluyen conglomerados, grauwacas líticas, litarenitas, limolitas, lutitas limosas, margas y cenizas volcánicas, en los que se aprecian diferencias en su textura, forma de los estratos y tonos de color. Estas variaciones indican condiciones de flujo diferentes en el transporte y depósito de los sedimentos, en la profundidad del paleolago, en el clima y en la composición de la roca fuente. Asimismo, se observan estructuras sedimentarias comunes de ambiente lacustre con contenido fósil típico, el cual es abundante en algunas zonas de dicha secuencia, predominantemente donde aparecen sedimentos de grano fino.

El lago se originó en el Plioceno (Blancano) por el cierre temporal del Río Amajac, ocasionado por una avalancha de escombros en un profundo cañón labrado en la Formación El Abra. La sedimentación lacustre terminó cuando los escombros de la avalancha fueron erosionados al subir el nivel del agua por una mayor precipitación pluvial y por encontrarse colmatada de sedimentos la zona del embalse. Posteriormente siguió una fase de intensa erosión, sobre todo de los sedimentos lacustres poco compactos, dando como resultado afloramientos aislados que forman lomeríos profundamente disectados, los cuales tienen una vegetación muy diferente a la que evidencia el registro fósil.

De acuerdo a la fisonomía foliar, el paleoclima del Blancano fue templado subhúmedo e influyó en el ciclo dinámico y en la circulación de las aguas del lago, estableciendo así las condiciones geoquímicas y patrones de circulación dominantes, los cuales fueron importantes para la concentración de iones disueltos en el agua, que favorecieron la abundancia y desarrollo de organismos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo recibido del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT 24854T) y de la Dirección General de Personal Académico (DGAPA) proyecto PAPIIT IN100102; a Aline Concha Dimas por la revisión del manuscrito, a Luis A. Aguilar Pérez por la traducción del resumen, y a Perfecto Arellano Gil por la corrección de estilo.

REFERENCIAS

- Aguilar-Arellano, F. J., Ortiz-Martínez, E. L., 2000, Estudio paleoecológico de la flora pliocénica de Santa María Amajac, Estado de Hidalgo; Inferencias del paleoclima y la paleocomunidad: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, tesis profesional, inédita, 63 p.
- Aguilar-Arellano, F.J., Velasco-de León, M.P., 2002, El clima durante el Plioceno en la región de Santa María Amajac, Hidalgo, México: Boletín de la Sociedad Botánica de México, 71, 71-81.
- Aguilar-Arellano, F.J., Silva-Pineda, A., Velasco-de León, M.P., 2002, Registro de *Equisetum hyemale* en el Plioceno de la región de Santa María Amajac, Hidalgo, México (resumen), en VII Congreso Latinoamericano de Botánica y II Congreso Colombiano de Botánica: Cartagena de Indias, Colombia, Asociación Latinoamericana de Botánica, p. 83.
- Alarcón-Parra, S., 1998, Estudio geológico efectuado para determinar las causas que provocan la inestabilidad de las laderas del cerro donde asienta la población de Metztlán, Estado de Hidalgo: México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, inédita, 85 p.
- Becerra-Martínez, C.A., Guzmán, A.F., Velasco-de León, M.P., 2002, First fossil record of Goodeidae from Hidalgo State (abstract) in Grier, H., Uribe, M.C., (eds.), Proceedings of the II International Symposium on Livebearing Fishes, March 19-23: Querétaro, México, 20-21.
- Beltrán-Romero, F., Luna-Gómez, P., 1994, Estudio geológico de la región de Santa María Amajac, municipio de Atotonilco El Grande, Estado de Hidalgo: México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, inédita, 131 p.
- Cantagrel, J.M., Robin, C., 1979, K-Ar dating on eastern Mexican volcanic rocks—Relations between the andesitic and the alkaline provinces. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, 99-114.
- Carrasco-Velásquez, B. 1971, Litofacies de la Formación El Abra en la Plataforma de Actopan, Hidalgo: *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 3(1), 2-58.
- Eguiluz-de Antuñano, S., Aranda-García, M., Marte, R., 2000, Tectónica de La Sierra Madre Oriental, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, LIII, 1-26.
- Fuentes-Guerra, E.P., Velasco-de León, M.P., 2002, Anuros de la Formación Atotonilco El Grande, México (resumen), en VIII Congreso Nacional de Paleontología, Guadalajara, Jalisco: Sociedad Mexicana de Paleontología y Museo de Paleontología de Guadalajara, 99.
- García-Arizaga, M.T., Lugo-Hubp, J., Palacios, D., 1996, La obturación de valles por procesos de ladera; el origen de la Vega de Metztlán (México) (resumen), en IV Reunión Nacional de Geomorfología, O Castro, A Coruña, España: Sociedad Española de Geomorfología, 61.
- Geyne, A.R., Fries, C.Jr., Segerstrom, K., Black, R.F., Wilson, I.F., 1963, Geology and mineral deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, México: México, D.F., Consejo de Recursos Naturales no Renovables, Pub. 5E, 203 p.
- Hickey, L. J., 1973, Classification of the architecture of dycotiledoneous leaves: *American Journal of Botany* 60, 17-33.
- Lugo-Hubp, J., 1990, El relieve de la República Mexicana: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, *Revista*, 9(1), 82-111.
- Mckee, E.H., Dreier, J.E., Noble, D.C., 1992, Early Miocene hydrothermal activity at Pachuca-Real del Monte, Mexico; an example of space-time association of volcanism and epithermal Ag-Au vein mineralization: *Economic Geology*, 87, 1635-1637.
- Ortiz-Martínez, E.L., Velasco-de León, M.P., 2000, Estudio de taxonomía numérica de hojas fósiles de Santa María Amajac del Plioceno del Estado de Hidalgo (resumen), en VII Congreso Nacional de Paleontología y I Simposio Geológico en el Noroeste de México: Linares N.L., Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, 54-55.
- Otto, G.H., 1938, The sedimentation unit and its use in field sampling: *Journal of Geology*, 46, 569-582.
- Reading, H.G., 1986, *Sedimentary Environments and Facies*: U.K., Blackwell Scientific Publications, 615 p.
- Reineck, H.E., Singh, I.B., 1980, *Depositional Sedimentary Environments*: Springer-Verlag, 549 p.
- Reyes-Torres, A., Vázquez-Rodríguez, S.D., Carreño, A.L., Velasco-de León, M.P., 2002, Ostrácodos lacustres del Plioceno–Pleistoceno inferior de la Formación Atotonilco El Grande, Hidalgo, México: (resumen) en VIII Congreso Nacional de Paleontología, Guadalajara, Jalisco: Sociedad Mexicana de Paleontología y Museo de Paleontología de Guadajara, p. 128.
- Salvador-Flores R., 2001, Origen sedimentológico y estratigrafía del Paleolago de Amajac, Hidalgo: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, tesis profesional, inédita, 87 p.
- Segerstrom, K., 1961, Geología del suroeste del estado de Hidalgo y del noreste del estado de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 13, 147-168.
- Suter, M., 1987, Structural transverse across the Sierra Madre oriental fold-thrust belt in east-central Mexico: *Geological Society America Bulletin*, 98, 249-264.
- Velasco-de León, M. P., Romero-Rangel, S., 2001, Arquitectura foliar de diez especies de *Quercus* (Fagaceae) como fuente de información para la identificación de ejemplares fósiles (resumen) en XV Congreso Mexicano de la Sociedad Botánica: Querétaro, Qro. Sociedad Botánica de México, 704.
- Velasco-de León, M.P., Arellano-Gil, J., Silva-Pineda A., 2000, La secuencia lacustre y su biota de la Formación Atotonilco El Grande de Santa María Amajac, en el Estado de Hidalgo (resumen), en II Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, Puerto Vallarta, Jalisco: GEOS, 20(3), p. 302.
- Velasco-de León, M.P., Arellano-Gil, J., 2001, Paleontology and geology of the Atotonilco El Grande, Hidalgo, Mexico (resumen), en 2001 North American Paleontological Convention, Berkeley, California: *Paleobios*, 121(2), 129.
- Velasco-de León, M.P., Aguilar-Arellano, F.J., 2002, La fisonomía foliar y el paleoclima de Santa María Amajac, Hidalgo (resumen), en VIII Congreso Latinoamericano de Botánica y II Congreso Colombiano de Botánica: Asociación Latinoamericana de Botánica, p. 83.
- Walker, G.R., James, P.N., 1994, *Facies Models; Response to Sea Level Change*: Geological Association of Canada, 454 p.
- Wolfe, J.A., 1993, A method obtaining climatic parameters from leaf assemblages: *United States Geological Survey Bulletin*, 2040, 1-171.
- Zaragoza-Caballero, S., Velasco-de León, M.P., 2003, Una especie nueva de *Epicauta* (Coleoptera: Meloidae) del Plioceno del Estado de Hidalgo, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 20(2), 154-159.

Manuscrito recibido: Julio 6, 2004

Manuscrito corregido recibido: Febrero 17, 2005

Manuscrito aceptado: Febrero 26, 2005