LA VEGETACIÓN DEL CUATERNARIO TARDÍO EN EL CENTRO DE MÉXICO: REGISTROS PALINOLÓGICOS E IMPLICACIONES PALEOCLIMÁTICAS

MARÍA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA

Departamento de Paleontología, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.
Cd. Universitaria, UNAM. 04510 México D.F., México.

Resumen. La formación durante el Plio-Cuaternario de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT) dio lugar al desarrollo de varias cuencas endorréicas. Una de estas cuencas cerradas, la más ampliamente estudiada, es la Cuenca de México. Por los extensos lagos que se desarrollaron y por su localización geográfica en una latitud media, resulta atractiva para realizar estudios palinológicos y paleoclimáticos. Se presenta un resumen de las investigaciones palinológicas realizadas en la Cuenca de México, de manera particular en las secuencias lacustres de los lagos de Chalco y Texcoco, señalando los cambios generales en los componentes de la vegetación de los últimos 28,000 años AP; se discuten los cambios en las condiciones paleoambientales comparándolas con otros datos existentes para los lagos de la FVT. Se analizan los datos palinológicos a la luz de la secuencia glacial existente para la Cuenca. Se examinan los resultados de los estudios palinológicos con los datos de los modelos generales de circulación de la atmósfera para las edades del máximo glacial y Holoceno temprano, propuestos para zonas tropicales y para el sudoeste de EUA.

Palabras clave: Cuenca de México, Holoceno, paleoambientes, Pleistoceno, polen.

Summary. Several closed basins were formed during the Plio-Quaternary volcanic activity of the Transmexican Volcanic Belt (TVB). One of this is the basin of Mexico, the most studied one. Due to the extensive lake system formed during the Pleistocene and to its latitudinal position, it is very attractive to carry on palynological and paleoclimatic studies. Palynological research particularly lacustrine sequences of Chalco and Texcoco lakes are presented, indicating the changes in vegetation during the last 28,000 years BP. Changes in the paleoenvironmental conditions are discussed and comparison with other records from the TVB are presented. Results of the palynological research are compared with data from the general atmospheric circulation models, especially for the glacial maximum and early Holocene for tropical regions and the SW of USA

Key words: basin of Mexico, Holocene, paleoenvironments, Pleistocene, pollen.

Las investigaciones palinológicas y paleobotánicas que se han efectuado en el país de manera sistemática en los últimos años, ofrecen un panorama muy general de la evolución de la flora mexicana. Si bien aún son insuficientes este tipo de investigaciones, considerando el tamaño del país y la complejidad de su historia geológica, se están realizando esfuerzos para ampliar la disponibilidad de estos datos fundamentales sobre la historia evolutiva de la vegetación. Diferentes tafofloras han sido estudiadas desde el punto de vista paleobotánico (Weber y Cevallos, 1994) que abarcan desde el Pérmico hasta el Oligoceno-Mioceno. Mientras que desde el punto de vista palinológico hay datos desde floras cretácicas hasta palinofloras oligocénicas-pliocénicas (Graham, 1976; Palacios, 1993,

Martínez-Hernández, 1992). Todos estos estudios aportan valiosos datos sobre aspectos fitogeográficos y evolutivos y el estudio de la flora cuaternaria a través de análisis de polen ofrece amplias posibilidades para conocer los factores que promueven el cambio de los ecosistemas. El análisis palinológico se puede concebir como un instrumento de percepción remota diseñado para registrar la composición de la vegetación actual y pasada. Este tipo de análisis tiene una resolución espacial y temporal: el polen extraído de un sedimento contiene una huella de la vegetación de una área, en un intervalo de tiempo (Prentice, 1988).

En el país se cuenta con un número importante de estudios sobre la vegetación cuaternaria, especialmente en su zona central. En el presente trabajo se

pretende dar un panorama de los avances del estudio palinológico de la vegetación cuaternaria de la cuenca de México en especial datos sobre la zona sur, con el objeto de ejemplificar los aportes, vertientes y dificultades de este tipo de estudios, haciendo énfasis en los cambios en la composición de la vegetación e insertándolos en un marco cronológico para explicar las aplicaciones en términos de cambios ambientales que tienen este tipo de análisis.

La región central del país

El territorio nacional hacia el Plioceno alcanzaba ya su configuración actual, aunque la formación de al-

gunas cadenas montañosas estaba aún en proceso, como son las elevaciones de la Faja Volcánica Transmexicana (FVT). Desde el punto de vista fisiográfico, la FVT es una meseta volcánica con altitudes que van de 1,000 a 5,000 msnm siendo la banda dominante la de 1,500 a 2,500 msnm. Si bien hay diferentes hipótesis sobre cuándo se inició la formación de esta provincia geológica, pues algunos autores le asignan una edad de Terciario medio, y otros una edad de Plio-Cuaternaria, todos coinciden en que es durante el vulcanismo del Plio-Cuaternario que se forman los grandes estratovolcanes como son el Popocatepetl, Nevado de Toluca y el Pico de Orizaba constituidos por lavas andesíticas-basálticas. A la par del desarro-

Figura 1. Mapa de localización de los sitios muestreados: 1. Lago de Tecocomulco, cinco núcleos; 2. Laguna de Apan, 1 sitio muestreado; 3, 4, y 5. Lago de Chalco, cinco núcleos; 6, 7, 8, y 9. Ex-lago de Texcoco, cinco núcleos.

llo de estos picos, se formaron cuencas endorréicas que dieron lugar a extensos lagos y la acumulación de sedimentos lacustres (Ferrusquía, 1993). Debido a la gran diversidad topográfica de la FVT hay también una variedad de condiciones climáticas importantes. La mayor parte de la humedad proviene de los vientos alisios que soplan durante el verano. La estación de lluvias es de junio a septiembre con algunas lluvias ocasionales durante el invierno como consecuencia de la llegada de aire polar comúnmente denominado norte. Las comunidades vegetales que se establecen en esta provincia geológica son en general los bosques de pino, de encino, de oyamel, tropical deciduo, mesófilos y pastizales (Rzedowski, 1978).

Cuenca de México

De entre las varias cuencas endorréicas que se formaron a lo largo del desarrollo de la FVT, tenemos a la Cuenca de México, una de las más estudiadas hasta la fecha desde diferentes puntos de vista. Destacan los estudios de mecánica de suelos, y geológicos en los que se ha hecho énfasis en las características del subsuelo de la ciudad de México. A partir de 1985, se efectuaron estudios que han permitido conocer a mayor profundidad la estructura geológica y características de la cuenca (Mosser, 1990; Singh, *et al.*, 1995; (Urrutia-Fucugauchi y Martín del Pozzo, 1993). Desde el punto de vista botánico se cuenta con los trabajos de la Flora del Valle de México (ver por ejemplo Rzedowski y Rzedowski, 1979; 1985). También destacan las numerosas investigaciones arqueológicas y antropológicas de esta zona; en una recopilación bibliográfica de Manzanilla (1987) se muestra el gran número de trabajos realizados que dan un panorama del desarrollo geológico, geomorfológico, hidrológico, edáfico y arqueológico-antropológico de esta gran cuenca.

La vegetación característica de las montañas del centro de México, y de las elevaciones que rodean a la cuenca de México principalmente, son los bosques mixtos de pino y encino. De acuerdo con Styles (1993), el género *Pinus* está presente desde el Cretácico en Norteamérica y llega a México, alrededor del Terciario medio aunque no hay evidencia paleobotánica hasta el momento. *Quercus* parece ingresar a México también durante esa época. Las evidencias palinológicas para ambos géneros, señalan su presencia en el Mioceno inferior de sedimentos marinos de Chiapas (Palacios, 1993); en los lignitos Pliocénicos de Tacolulan, Veracruz (Martínez-Hernández, 1992), y en los de la Formación Paraje Solo de Veracruz del Plioceno medio (Graham, 1976).

En la cuenca de México un estudio preliminar de una sección, constituida principalmente por margas,

calizas lacustres, tobas y arenas, que abarca del Plioceno medio a superior, la cual está siendo analizada por Lozano-García y Martínez-Hernández (en preparación), se identificaron varios conjuntos polínicos. El polen recuperado del Plioceno medio incluye a los géneros *Pinus*, *Alnus*, *Bursera*, *Engelhardtia* y *Quercus*; el conjunto perteneciente al Plioceno superior está compuesto por *Alnus*, *Quercus*, *Pinus*, *Bursera*, *Fraxinus Liquidambar*, y el alga *Pediastrum duplex*. Estos resultados preliminares indican la presencia de pino y encino como componentes importantes de la vegetación pliocénica de la cuenca y la existencia de un lago pliocénico ya señalado anteriormente (Mosser, 1990).

Pleistoceno

En gran parte de los estudios sobre la diversidad de la flora y fauna mexicana, y en particular en la FVT, se señala de manera reiterativa que buena parte de la alta diversidad documentada, así como endemismos en algunas zonas del país, son consecuencia de las oscilaciones climáticas ocurridas durante el Pleistoceno (Toledo, 1993; Flores-Villela, 1993; Rzedowski, 1993; Fa y Morales, 1993; Nixon 1993), sin embargo, faltan evidencias suficientes que permitan conocer y evaluar tales oscilaciones. Es por este motivo, que se requiere de un mayor estudio sobre la ocurrencia de estos eventos y sus efectos en las comunidades vegetales, su amplitud, y tiempo de ocurrencia; además de que es necesario establecer los patrones regionales de evolución climática y los probables mecanismos asociados a éstos. La mayor parte de la información paleoclimática disponible que hay sobre el último ciclo glacial/interglacial proviene de altas latitudes, mientras que las investigaciones en latitudes medias y bajas son escasas. Por lo que evidencias provenientes de áreas como el centro de México son fundamentales para probar la validez de algunas de las hipótesis de cambio en la circulación atmosférica durante estos períodos de transformación.

El Pleistoceno se caracteriza por ser una época de gran inestabilidad climática, se han detectado hasta 10 ciclos glacial/interglacial en los registros isotópicos de sedimentos oceánicos (Lowe y Walker, 1984). Muchos la denominan como la edad de las catástrofes, aunque si se tienen en cuenta las diferentes ponencias presentadas en el Simposio sobre la vegetación de México: una misión histórica, durante el XIII Congreso Mexicano de Botánica en 1995, la característica común de esta historia es el constante cambio.

Una de las explicaciones sobre la probable causa del cambio climático, al menos para el Pleistoceno, ha sido la denominada hipótesis astronómica, la cual básicamente explica los cambios en la temperatura

de la superficie terrestre como consecuencia de los cambios periódicos de la órbita terrestre y su eje (hipótesis de Milankovitch). De acuerdo con esta teoría, los ciclos glaciales/interglaciales son causados por cambios en: la precesión de los equinoccios resultado del giro en su propia órbita con una periodicidad de entre 19,000 a 23,000 años, de la oblicuidad, en que los períodos son de 41,000 años, y cambios en la excentricidad de la órbita, con ciclos de 100,000 años (Imbrie y Palmer Imbrie, 1979); sin embargo, algunos autores mencionan el hecho de que aún no se conoce cómo se traducen estos efectos, en términos de cambios globales del clima (Dawson, 1992). Otro aspecto importante es el hecho de que otros factores, como por ejemplo la tectónica, pudieron influir en la temperatura global traslapando sus efectos a la variación de la temperatura ocasionada por los cambios astronómicos.

Entre los cambios más notables, a consecuencia de las variaciones en la distribución de la radiación solar está el desarrollo de extensas masas de hielo que causaron períodos glaciales. La última expansión glacial del Hemisferio Norte, denominada Wisconsin tardío, se inició hace aproximadamente 30,000 años AP, alcanzando la máxima extensión de hielo entre los 22,000 y 18,000 años AP, denominada máximo glacial; posteriormente entre los 12,000 años AP y 9,000 años AP, se detecta una etapa de deglaciación en la que las temperaturas aumentan y el hielo comienza a derretirse con la consecuente elevación del nivel del mar. El desarrollo de una extensa capa de hielo en el Hemisferio Norte, provocó cambios en los patrones de circulación atmosférica globales, los cuales, modificaron las condiciones climáticas locales de extensas zonas tanto en latitudes medias como bajas. Los indicadores paleoclimáticos de numerosas partes del mundo apoyan la hipótesis de una disminución de temperaturas globales durante el máximo glacial, aunque no hay consenso en la magnitud de esto. Así por ejemplo, Emiliani y colaboradores (1975) basándose en análisis isotópicos en foraminíferos planctónicos sugieren una disminución de entre 6 y 7 °C en la temperatura del Golfo de México durante el máximo glacial, mientras que Brunner (1978) analizando conjuntos de foraminíferos estima un descenso de tan sólo 1 ó 2 °C en el máximo glacial para el mismo Golfo. En los modelos generales de circulación atmosférica (Kutzbach y Ruddiman, 1993) se apoya la idea de

variaciones en la temperatura de los océanos para las latitudes tropicales y subtropicales, sin que todavía se llegue a un consenso sobre la magnitud del cambio en la temperatura.

A pesar de las diferencias entre los datos disponibles, se ha propuesto un modelo general de variaciones climáticas, en el que se sugiere la existencia de climas áridos en las zonas tropicales durante el máximo glacial, la que es seguida por una etapa de mayor humedad durante el fin del Pleistoceno y Holoceno temprano. Otros registros indican un patrón diferente en los niveles lacustres de los lagos del suroeste de EUA se detecta una etapa de mayor humedad durante el máximo glacial y la disminución de los niveles lacustres se inicia durante el Holoceno temprano. Estas diferencias en la precipitación detectada en diversas áreas ha sido explicada a través del desplazamiento al sur de los patrones de circulación atmosférica, como son la zona intertropical de convergencia, las zonas de alta presión subtropical y los vientos del oeste (Kutzbach, 1983, COHMAP, 1988). El período de aridez en las zonas tropicales durante el máximo glacial y los altos niveles lacustres del suroeste de EUA pudo deberse a la migración hacia el sur de los vientos del oeste y de los vientos alisios, mientras que en un período posterior, durante el Holoceno temprano con la migración al norte de estos patrones de circulación atmosférica se podría explicar la aridez en el suroeste de EUA y la humedad tropical. En la zona central del país, la existencia de lagos que registren los cambios ambientales durante estos períodos, para traducirlos en cambios climáticos, son sumamente atractivos, ya que la mayor parte de las evidencias existentes están en las latitudes altas y algunos en zonas tropicales pero hay pocos en zonas de latitudes medias.

Estos cambios ocurridos a nivel mundial afectaron de manera significativa los ecosistemas promoviendo modificaciones en su estructura. Las evidencias de la vegetación cuaternaria en Norteamérica sugieren cambios rápidos en la distribución de los tipos de vegetación y en los conjuntos de especies que los conformaron. Hubo migración continua de especies en respuesta a estos cambios climáticos.

Es posible estudiar estos cambios climáticos y sus consecuencias a través de las investigaciones palinológicas del Cuaternario tardío, pues éstas ofrecen la resolución más fina de eventos ecológicos durante período de cambio climático rápido. Los datos pa-

Figura 2. Polen arbóreo de los taxa más frecuentes extraídos de los sedimentos de los lagos de Chalco y Texcoco. a. *Pinus* sp.1; b. *Picea*; c. *Pinus* sp.2 (500x); d. *Tsuga* aff. *canadensis*; e. *Liquidambar*; f. *Engelhardtia*; g. Tipo *Cu-Ju* (incluye los géneros *Cupressus* y *Juniperus*); h. *Alnus*; i. *Quercus*; j. *Ulmus*; k. *Fraxinus* (tipo 1); l. *Carpinus-Corylus*; m. *Ostrya*; n. *Fraxinus* (tipo 2); o. *Carya*; p. Sapindaceae; q. *Fagus*. Todas las microfotografías están a una escala de 1000x, donde 1µ corresponde a 1mm, excepto la figura indicada.

leoecológicos de este intervalo de tiempo pueden proveer hipótesis sobre el proceso de cambio de los ecosistemas en períodos previos, pero similares en variaciones climáticas.

Palinología del Pleistoceno/Holoceno de la Cuenca de México

El polen y esporas han probado ser los fósiles más importantes para la reconstrucción de la vegetación cuaternaria, ya que se encuentran en una gran cantidad de sitios y, tal vez lo más importante, en una secuencia estratigráfica continua que va archivando evidencias de cambios en la vegetación y en el entorno (Grimm, 1988). En la Cuenca de México, la existencia de varios lagos permite el desarrollo de estudios palinológicos los cuales en combinación con otras técnicas aportan información fundamental para la reconstrucción de paleoambientes. Las investigaciones palinológicas se inician en 1950 con los trabajos de Sears y Clisby (1955) y se continúan por otros autores (González-Quintero y Fuentes-Mata, 1980; González-Quintero, 1986).

Recientemente se inició un programa multidisciplinario con el objeto de documentar en detalle las condiciones paleoambientales de la Cuenca de México, analizando los denominados indicadores paleoclimáticos (proxy data): polen, diatomeas, datos paleomagnéticos, químicos, etc., durante el último ciclo glacial/interglacial. Para ello se llevó a cabo una campaña de perforación obteniéndose varios núcleos continuos de los lagos de Chalco, Texcoco y Tecocomulco y Apan (figura 1). Hasta el momento, se tienen resultados de los estudios sobre polen, diatomeas, propiedades magnéticas, estratigrafía y cronología de cinco núcleos del lago de Chalco y Texcoco y Tecocomulco, abarcando los últimos 40,000 años AP. Se cuenta con 25 fechas de ^{14}C ; 13 fueron realizadas en los sedimentos lacustres y las otras 12 se obtuvieron en la Universidad de Arizona por el método de acelerador de partículas (AMS) en polen extraído de los sedimentos. Del análisis palinológico realizado se han registrado un total de 234 palinomorfos que incluyen polen de árboles, arbustos, hierbas, acuáticas, esporas de pteridofitas, briofitas, hongos y varias especies de algas. En las figuras (2, 3, 4) se ilustran algunos de los palinomorfos más abundantes, y otros significativos desde

el punto de vista paleoecológico recuperados de los sedimentos lacustres de los lagos de Chalco, Texcoco y Tecocomulco.

La información con la que se cuenta se presenta en dos tipos de diagramas polínicos: el diagrama regional, que incluye polen de árboles, arbustos y hierbas y esporas de pteridofitas; y el local, en el que se muestran palinomorfos de las comunidades que vivían en la zona litoral y ambientes lacustres.

Se presenta un resumen de los aspectos más importantes de los diagramas palinológicos con los que se cuenta hasta el momento. Algunos datos se han publicado con mayor detalle en otras revistas (Lozano-García *et al.*, 1993; Lozano-García y Ortega-Guerrero, 1994; Lozano-García y Xelhuantzi-López, en prensa; Ortega-Guerrero, 1992; Caballero-Miranda, 1995).

Estudios iniciales en sedimentos lacustres del lago de Texcoco, con una edad basal estimada en *ca.* 200,000 años AP, muestran la existencia de una tendencia progresiva y moderada, a condiciones secas desde el Pleistoceno medio al Pleistoceno superior. Se observó en el estudio palinológico una disminución en la diversidad de paleocomunidades que se traduce en una dominancia de los bosques de pino y encino hacia el Pleistoceno superior. Desde el punto de vista limnológico, Texcoco parece haberse transformado de una lago de agua dulce, a un lago salobre hacia el Pleistoceno superior y Holoceno (Lozano-García, 1989).

Los datos provenientes de los registros palinológicos del lago de Chalco (Núcleo B), (figuras 6 y 8) para el período del glacial temprano, con edades de *ca.* 27,000 a *ca.* 23,000 años AP., muestran un diagrama polínico con una baja diversidad dominado por polen de *Pinus* spp. y con proporciones bajas de *Quercus*, *Alnus*, el grupo compuesto por polen de *Cupressus-Juniperus* (tipo Cu-Ju) y pastos. El registro abundante de *Botryococcus* y la ausencia de otros elementos indican un nivel lacustre bajo. Los datos sobre análisis de diatomeas efectuados en este mismo sondeo (Caballero-Miranda, 1995), corroboran la existencia de un nivel lacustre bajo, ya que las especies alcalófilas y halófilas aumentan y disminuyen las planctónicas. De acuerdo con el registro paleomagnético, Ortega-Guerrero (1992) considera este período de gran estabilidad ambiental. En uno de los diagramas para el lago de Texcoco, el SCI (Lozano-García y

Figura 3. Polen de hierbas y de elementos subacuáticos extraídos de sedimentos lacustres de los lagos de Chalco y Texcoco. a. Poaceae; b. Chenopodiaceae-Amaranthaceae; c. *Arenaria* tipo 1; d. *Arenaria* tipo 2; e. Asteraceae tipo 1; f. Asteraceae tipo 2; g. *Sida*; h. Umbelliferae tipo 1; i. Umbelliferae tipo 2; j. Polygonaceae; k. *Potamogeton pectinatus*; o. Lamiaceae; p. *Sagittaria*; q. *Ruppia maritima*; r. *Plantago*; s. *Thalictrum*; t. Cyperaceae; u. *Thypha*. Todas las microfotografías están a una escala de 1000x, donde 1µ corresponde a 1mm.

Xelhuantzi, en prensa), el cual abarca un período de >35,000 años a *ca.* 20,000 años AP, el conjunto palinológico está dominado por *Pinus* spp. y con valores menores de *Quercus*, *Alnus*, Poaceae, Chenopodiaceae-Amaranthaceae. También en este diagrama hay una clara dominancia de *Botryococcus*, sugiriendo niveles lacustres bajos. El conjunto de evidencias apuntan hacia condiciones relativamente secas y frías, donde posiblemente los bosques abiertos de pino dominaron el paisaje en las elevaciones alrededor de los lagos. Datos disponibles para otras zonas de la FVT, como es el diagrama polínico del lago de Pátzcuaro (Watts y Bradbury, 1982) y los datos de Ohngemach (1977) para Puebla-Tlaxcala muestran una clara dominancia de *Pinus*, con *Quercus* y *Alnus* con valores menores. Estas condiciones frías y relativamente secas son consistentes con los datos de niveles lacustres bajos disponibles para Pátzcuaro y Zacapu, en Michoacán, durante el período comprendido entre 27,000 a 23,000 años AP (Caballero-Miranda, 1995).

Un cambio importante se detecta entre los *ca.* 23,500 años AP. En los diagramas locales de Chalco, en los núcleos B y D (figuras 5, 6, 7), hay una reducción drástica en el polen de *Pinus*, y un aumento en la concentración de polen. Se registra una diversidad polínica mayor y aparecen elementos nuevos como *Picea*, *Podocarpus*, *Carpinus*, *Liquidambar*, *Fraxinus*, y el conjunto de Cu-Ju, hay incremento de pastos y otras hierbas. En los taxa locales, el cambio ambiental está representado por la presencia abundante de *Pediastrum*, *Myriophyllum*, *Potamogeton*, *Scirpus* y *Thypha*. Los conjuntos polínicos apuntan hacia condiciones más húmedas, con un nivel lacustre alto, esto es apoyado por el registro de diatomeas conformado por especies planctónicas dulceacuícolas (Caballero-Miranda, 1995). Un mayor arrastre de sedimentos hacia la cuenca de captación se observa en los datos de susceptibilidad magnética. En Texcoco, en un diagrama polínico que se está analizando (Sandoval en preparación), se observa disminución de polen de *Pinus* y fluctuaciones en los valores de *Quercus* y *Alnus*. En el diagrama de Texcoco SC1, se presentan ligeras fluctuaciones, aunque no son tan dramáticas como en los diagramas de Chalco. Previo al máximo glacial hubo cambios importantes en las comunidades vegetales alrededor del lago de Chalco. Se registran valores mínimos de pino (figura 8). No hay evidencias suficientes hasta el momento de que este cambio a los *ca.* 23,500

años AP, haya ocurrido en otras zonas de la FVT, debido principalmente al escaso control cronológico en los datos disponibles.

Durante el período del máximo glacial, es decir entre los 20,000 y 18,000 años AP los datos de polen muestran valores de concentración polínica bajos, el conjunto polínico del núcleo D no muestra cambios importantes en los taxa dominantes (*Pinus*, *Quercus* y *Alnus*), pero el polen herbáceo es abundante, constituido por pastos, chenopodiaceas, compuestas, etcétera. En el núcleo B, se observan valores semejantes en los conjuntos de polen. También hay una reducción de *Pediastrum* en ambos núcleos. El conjunto de indicadores paleoambientales sugiere un lago somero con bosques abiertos y pastizales, probablemente las condiciones eran frías y relativamente secas. En los otros datos palinológicos de Pátzcuaro, Jalapasquillo y Texcoco (Brown, 1985), las evidencias son similares.

En Chalco, el período que abarca el glacial tardío, de *ca.* 18,000 a 15,000 años AP, hay evidencias de una mejoría de la temperatura y se caracteriza por fluctuaciones importantes en los diagramas polínicos, en parte asociados a un aumento probable de la temperatura, pero tal vez el factor preponderante es la intensa actividad volcánica que ocurre en este período. Testigo de esto son las numerosas tefras presentes en las secuencias estratigráficas, incrementos notables en los valores de susceptibilidad magnética y abundantes restos de carbón observados en las laminillas palinológicas (Lozano *et al.*, 1993; Lozano-García y Ortega-Guerrero, 1993, Ortega-Guerrero, 1992). El polen de plantas herbáceas es más abundante y en los diagramas locales, hay un incremento de la vegetación subacuática, con abundancia de polen de *Scirpus* y *Thypha*; aunque el conjunto polínico y altos valores de calcinación indican un cambio a condiciones de pantano, éstas parecen ser fluctuantes, con períodos de mayor tirante de agua y otros con niveles menores.

Alrededor de los 14,500 años AP se detecta una tendencia al aumento de precipitación, la expansión de los bosques se inicia y se observa una reducción de los pastizales. Hacia el final del Pleistoceno (*ca.* 12,000 años) ocurrieron condiciones húmedas con temperaturas posiblemente más frías. Hay en los diagramas presencia de un conjunto polínico formado por: *Abies*, *Fagus*, *Liquidambar*, *Ulmus*, *Juglans* y *Carpinus-Corylus*; también presente, pero en muy baja proporción en los conteos, se encontró *Tsuga* aff. *canadensis*

Figura 4. Esporas de Pteridofitas, briofitas, algas y esporas de hongos extraídos de los sedimentos lacustres de los lagos de Chalco, Texcoco y Tecocomulco. a. *Polypodium*; b. *Isoetes*; c. *Anthoceros*; d. *Lycopodium*; e. *Spyrogira* tipo 1; f. *Debaria*; g. *Spyrogira* tipo 2; h. *Selaginella*; i. *Pediastrum boryanum*; j. *Pediastrum* tipo 1 (500x); k. *Coelastrum*; l. espora de hongo; m. *Gelasinospora*; n. *Assulina*; o. *Arcella* (500x); p. Espora de hongo. Todas las microfotografías están a una escala de 1000x, donde 1µ corresponde a 1mm, excepto las figuras indicadas.

Figura 5. Diagrama resumido del núcleo B, Lago de Chalco. Las curvas polínicas de los taxa señalados como regionales, están expresados en frecuencias relativas, mientras que los elementos locales se presentan como número de granos contados.

(Lozano-García y Ortega-Guerrero, 1994). En Texcoco, este período no está representado en el diagrama disponible, sin embargo los estudios de Bradbury (1989) en Chalco y Texcoco apoyan la suposición de condiciones frías.

Los conjuntos polínicos del Holoceno temprano están compuestos en su mayor parte por elementos arbóreos (figuras 6, 7, 8), los componentes son: *Pinus*, *Quercus*, *Alnus* y *Abies*, éste último por primera vez se presenta de manera continua en los registros. Otros taxa con valores muy bajos son *Picea*, *Podocarpus* y *Carpinus-Corylus*. La interpretación a partir de los componentes de los diagramas locales y regionales es de un clima subhúmedo-templado.

Hacia la parte terminal del Holoceno temprano y principio del Holoceno medio, los valores de *Quercus* aumentan notablemente en los diagramas, y en general, hay indicios de incremento en la temperatura que se podría asociar al incremento en la insolación que se propone para esta época (CHOMAP,

1988). Sin embargo, la cronología para este período no está bien establecida, por lo que hasta el momento las evidencias no son concluyentes. Los estudios en la zona de Texcoco no cubren todavía los períodos del Holoceno.

Brown (1985) resume los cambios ambientales holocénicos a partir de sus diagramas y de los estudios palinológicos realizados por Watts y Bradbury (1982), González-Quintero y Fuentes-Mata (1982), y Onghemach (1977) considera, que durante el Holoceno temprano hubo un incremento en la temperatura comparándola a la del Pleistoceno. En relación a la humedad, lo divide en dos períodos, uno temprano relativamente seco de 9,500 a 8,500 años AP, y otro más húmedo de 8,500 a 6,500 años AP. Señala la aparición de polen de maíz para el Holoceno temprano de Texcoco. Un aspecto fundamental en los estudios antes mencionados es el insuficiente control cronológico, así el diagrama del cráter Taloqua (Onghemach, 1977) solamente cuenta con una

Figura 6. Diagrama palinológico regional del Núcleo D, Lago de Chalco. En el extremo izquierdo se presenta la escala de edad en años antes del presente; a continuación la escala de profundidad expresada en centímetros. La primera curva corresponde a la concentración polínica (granos $\times \text{cm}^{-3} \times 1000$). Todas las curvas polínicas están expresadas en frecuencias relativas. (modificado de Lozano-García y Ortega-Gutiérrez, 1994)

fecha de radiocarbono; el de Texcoco (González-Quintero y Fuentes-Mata, 1980) inicialmente fue publicado como holocénico y a partir de dos fechas se determinó que representa el Pleistoceno tardío y Holoceno.

Los resultados palinológicos del Holoceno tardío, es decir de los últimos 3,000 años AP, muestran generalmente un incremento notable de Chenopodiaceae-Amaranthaceae, y una reducción en el polen de árboles en particular de *Pinus*, mostrando claramente el intenso impacto humano en la cuenca, así como en otras zonas. Obtener información paleoambiental resulta sumamente difícil en los registros del Holoceno tardío, en una zona tan larga y ampliamente ocupada por diferentes culturas.

Comparando los cambios detectados en las condiciones ambientales de la cuenca, con las tendencias generales sugeridas por otros registros paleoambientales y modelos de circulación general de la atmósfera, parece tener una perspectiva más global. Observamos que el máximo glacial parece ser más húmedo que el glacial temprano, por lo que no presenta un patrón similar al de las zonas tropicales ni al del

suroeste de EUA. En el Holoceno temprano de la cuenca, la temperatura aumenta en relación al final del Pleistoceno, y en lo que se refiere a la humedad, la presencia de polen de *Abies* puede interpretarse como condiciones sub-húmedas, sin embargo los datos de niveles lacustres para Chalco no coinciden con los datos palinológicos. También este período no corresponde totalmente al patrón de aridez en el SW de EUA, ni al incremento de humedad de los trópicos. Los resultados paleoambientales de la cuenca aunque necesitan más refinamiento y un mejor control cronológico, en particular para el Holoceno, presentan un comportamiento intermedio entre los registros de los trópicos y los del SW de EUA.

Cronología glacial

Los estudios de White (1962, 1981a, 1981b, 1987), White y Valastro (1984), White *et al.* (1990), Heine (1973, 1975, 1984a, 1984b, 1988), Nixon (1989) y Vázquez-Selem (1991, en prensa) proporcionan información sobre los avances glaciares en el Iztaccihuatl, Popocatepetl, Ajusco y la Malinche. La secuencia

Figura 7. Diagrama palinológico local del Núcleo D, Lago de Chalco. En el extremo izquierdo se presenta la escala de edad en años antes del presente, a continuación la escala de profundidad en centímetros. Las curvas polínicas están expresadas en número de granos contados (modificado de Lozano-García y Ortega-Gutiérrez, 1994)

establecida por White en el Ajusco y Popocatepetl, es diferente a la propuesta por Heine para la Malinche, Iztaccíhuatl y otros volcanes. Caballero-Miranda (1995) sintetiza los resultados de estos estudios y con base en las fechas de radiocarbono de estos autores presenta una secuencia glacial para la cuenca de México así los avances glaciares del Pleistoceno tardío ocurrieron: entre 35,000 años a 25,000 años AP, entre los 15,000 años y 12,000 años AP y para el Holoceno hay evidencias de un avance entre los 3500 y 1000 años AP. A la luz de estos períodos glaciales, los registros palinológicos de Chalco y Texcoco no evidencian una época fría y húmeda antes de los 25,000 años AP, sino que apuntan hacia una etapa fría pero relativamente seca. Mientras que un avance glacial alrededor de los 12,500 años pudiera explicar la presencia de *Tsuga*, *Picea* y *Podocarpus* en los diagramas. Los resultados palinológicos no permiten detectar si ocurrió un enfriamiento hacia el Holoceno tardío debido a la modificación que sufrió el entorno por el impacto humano en el área.

Cabe destacar que existen problemas en el establecimiento de una cronología glacial bien definida por falta de más estudios, pero también de un mejor control cronológico, ya que muchos de los avances glaciares que se observan no están suficientemente

fechados. Por lo mismo, es necesario trabajar en esta línea para establecer una secuencia glacial en el centro del país y así poder comparar con las etapas glaciares de Norteamérica.

Consideraciones finales

El estudio del polen es de gran utilidad para documentar la historia de la vegetación cuaternaria. Los diagramas palinológicos son un banco de datos con niveles taxonómicos diversos, esto impone ciertas restricciones para las reconstrucciones de las comunidades vegetales. Algunos elementos de los diagramas pueden representar afinidades ecológicas contrastantes. Por este motivo la reconstrucción de paleoambientes y clima a partir de los datos palinológicos debe tener en consideración varios aspectos. En primer término se deben buscar especies indicadoras o clave en la que la autoecología está bien definida, y por otro lado se deben considerar los conjuntos palinológicos. En la cuenca de México, y en general en la vegetación de la FVT la dominancia de el polen de pino y encino en los diagramas restringe la interpretación paleoecológica, por lo que se requiere por una parte analizar el conjunto de especies presentes en los diagramas y por otra, detectar

Figura 8. Diagrama palinológico de frecuencias relativas de los elementos denominados regionales del núcleo B, lago de Chalco. En el extremo izquierdo se presenta la escala de edad en años antes del presente. Junto a la escala de profundidad que se expresa en centímetros, está la columna litológica formada por limos (///, III), arcillas (—), cenizas volcánicas (vvv) y pómez(***).

especies indicadoras. Además, en una zona activa desde el punto de vista volcánico y tectónico es recomendable la complementación de los análisis palinológicos, con otros estudios para contar con un mayor número de indicadores paleoambientales, como las diatomeas para definir niveles lacustres, registros paleomagnéticos, que contribuyen a la definición de horizontes volcánicos y épocas de mayor o menor

erosión en la cuenca. Datos geoquímicos y estratigráficos, entre otros, permiten documentar con mayor precisión las modificaciones que sufrió el paisaje durante los períodos de cambio climático. Otro aspecto fundamental es el control cronológico que se debe tener para enmarcar en el tiempo los cambios detectados, ofreciendo posibilidades para correlaciones regionales y globales.

Agradecimientos

La investigación fue realizada gracias al apoyo de la Biól. Susana Sosa Nájera quien elaboró el material fotográfico y colaboró en los diagramas presentados, de la Dra. Margarita Caballero-Miranda por sus comentarios al manuscrito y del Dr. Douglas Donahue, de la Universidad de Arizona quien aportó las fechas de radiocarbono de 12 muestras por el método de AMS. Gracias al apoyo económico de CONACYT a través del proyecto CONACYT 1824T9211, parte de esta investigación se pudo realizar.

Literatura citada

- Bradbury J. P. 1989. Late Quaternary lacustrine paleoenvironments in the Cuenca of Mexico. *Quaternary Science Reviews* 8:75-100.
- Brown R. B. 1985. A summary of Late Quaternary pollen records from Mexico west of Tehuantepec. En: Bryant V.M. and Holaway R.G. Eds. Pollen records of Late Quaternary North American sediments. American Association of Stratigraphic Palynologist, Dallas., TX, pp 71-93.
- Brunner C. A. 1982. Paleogeography of surface waters in the Gulf of Mexico during the late Quaternary. *Quaternary Research* 17:105-119.
- Caballero-Miranda M. 1995. Late Quaternary Palaeolimnology of Lake Chalco, The basin of Mexico: New evidence for palaeoenvironmental and palaeoclimatic change in central Mexico during the last 45,000 years. Tesis Doctoral, Universidad de Hull, Reino Unido.
- COHMAP Members. 1988. Climatic changes in the last 18,000 years. Observations and model simulations. *Science* 241:1043-1052.
- Dawson A. G. 1992. *Ice Age History. Late Quaternary geology and climate*. Londres, Routledge. 293 p.
- Emiliani C., Gartner S., Lidz B., Eldridge K., Elvey D.K., Ting Chang Huang, Stipp J.J. and Swanson M.F. 1975. Paleoclimatological analysis of late Quaternary cores from the northeastern Gulf of Mexico. *Science* 189:1083-1088.
- Fa J.E. and Morales L.M. 1993. Patterns of mammalian diversity in Mexico. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. and Fa J.E. Eds. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. New York, Oxford University Press. pp: 319-361.
- Ferrusquía-Villafranca Y. 1993. Geology of Mexico: A Synopsis. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. and Fa J.E. Eds. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. New York, Oxford University Press. pp: 3-107.
- Flores-Villela O. 1993. Herpetofauna of Mexico. Distribution and Endemism. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. and Fa J.E. Eds. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. New York, Oxford University Press. pp: 253-280.
- Grimm E. 1988. Data analysis and display. En: Huntley B. and Webb III T. Eds. *Vegetation History*. Kulger Academic Publishers. pp. 43-76
- González-Quintero L. 1986. Análisis polínicos de los sedimentos. En: Lorenzo J.L. y Mirambell L. Eds. *Tlapacoya: 35,000 años de historia del Lago de Chalco*. (Colección Científica, Serie Prehistoria) INAH, México, pp. 157-166.
- González-Quintero L. y Fuentes-Mata M. 1980 *El Holoceno en la porción central de la cuenca del valle de México*. Coloquio sobre paleobotánica y palinología. Colección Científica, Serie Prehistoria, 86, INAH, México, Mem., 3:113-132.
- Graham A. 1976. Studies in Neotropical paleobotany. II. The Miocene communities of Veracruz, Mexico. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 63:787-842.
- Heine K. 1973. Variaciones más importantes del clima durante los últimos 40,000 años en México. *Comunicaciones* 7:51-58.
- Heine K. 1975. Studien zur junquartaen Glazialmorphologie mexikanischer vulkane mit eine, Ausblick auf die Klimaentwicklung. Das Mexilo Project der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Vol. VII, Franz Steiner, Wiesbaden.
- Heine K. 1984a. The classical Late Weichselian climatic fluctuations in Mexico. En: Morner N. and Karlen W. Eds. *Climatic changes on a yearly to millennial basis; geological, historical and instrumental records*. Reidel, Dordrecht, pp. 95-115
- Heine K. 1984b. Comment on "Pleistocene glaciation of Ajusco Volcano, central Mexico and comparison with the standard Mexican glacial sequence" by Sidney E. White and Salvatore Valastro, Jr *Quaternary Research* 22:242-246.
- Heine K. 1988. Late Quaternary glacial chronology of the Mexican volcanoes. *Geowissenschaften* 7:197-205.
- Imbrie J. y Palmer-Imbrie K. 1979. *Ice Ages. Solving the Mystery*. Harvard University Press. 224p.
- Kutzbach J.E. 1983. Monsoon rains of the late Pleistocene end early Holocene: Patterns intensity and possible causes of changes. En: Street-Perrot A., Beran M., and Ratcliff R. Eds. *Variations in the global water budget*. D. Reidel, Dordrecht, pp. 371-389.
- Kutzbach J.E. and Ruddiman W.F. 1993. Model description, external forcing, and surface boundary conditions. En: Wright H.E. Jr., Kutzbach J.E., Webb T. III, Ruddiman W.F., Street-Perrott F.A. and Bartlein P.J. Eds. *Global climates since the last glacial maximum*. University of Arizona Press. pp 12-24.
- Lozano-García M.S. 1989. Palinología y paleoambientes de la cuenca de México. *Geofísica Internacional* 28:335-362.
- Lozano-García M.S., Ortega-Guerrero B., Caballero-Miranda M. y Urrutia-Fucugauchi J. 1993. Late Pleistocene and Holocene paleoenvironments of Chalco lake, central Mexico. *Quaternary Research* 40:332-342.
- Lozano-García M.S. and Ortega-Guerrero B. 1994. Palynological and magnetic susceptibility records of Lake Chalco,

- central Mexico. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* **109**:177-191.
- Lozano-García M.S. and Xelhuantzi-López S. Some problems in the late Quaternary records of central Mexico: basin of Mexico and Zacapu. *Quaternary International*. (en prensa).
- Lowe J.J. and Walker M.J.C. 1984. *Reconstructing Quaternary Environments*. Longman, Londres. 389p.
- Manzanilla L. 1987. *Bibliografía de la Cuenca de México*. Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM, México, 135p.
- Martínez-Hernández E. 1992. La vegetación y el clima de México. Historia del Cretácico al Terciario basada en evidencia palinológica. *Ciencia* **43**:69-72.
- Mooser F. 1990. Estratigrafía y estructura del Valle de México. En: Ovando-Shelly E. and González-Valenes F. Eds, *El subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la Ingeniería de Cementaciones a cinco años del sistema*. Sociedad Mexicana de Suelos, 29-36p.
- Nixon G.T. 1989. The geology of Iztaccihuatl volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and valley of Mexico. *Geological Society of American Special Paper* **219**, 58pp.
- Nixon K.C. 1993. The genus *Quercus* in Mexico. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. and Fa J.E. Eds. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. New York, Oxford University Press. pp 447-458.
- Ohngemach D. 1977. Pollen sequence of Tlaloqua crater (La Malinche volcano, Tlaxcala, Mexico). *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **36**:33-40.
- Ortega-Guerrero B. 1992. Paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y paleoecología del Cuaternario tardío en el Lago de Chalco, Cuenca de México. Tesis Doctoral, UNAM, México, 161 pp.
- Palacios-Chávez R. 1993. Estudio palinológico de las floras fósiles del Mioceno inferior y principios del Mioceno medio de la región de Pichucalco, Chiapas, México. *Acta Botánica Mexicana* **24**:1-96.
- Prentice C. 1988. Records of vegetation in time and space: the principles of pollen analysis. En: Huntley B. and Webb III T. Eds. *Vegetation History*. Kulger Academic Publishers. pp: 17-42.
- Rzedowski J. 1978. *La vegetación de México*. Limusa, México, 432 pp.
- Rzedowski J. y Rzedowski C.G. 1979. *Flora fanerogámica del Valle de México*. vol. I, CECSA, México, 403 pp.
- Rzedowski J. y Rzedowski C.G. 1985. *Flora fanerogámica del Valle de México*. vol. II, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN, Instituto de Ecología, 674 pp.
- Rzedowski J. 1993 Diversity and origins of Phanerogamic Flora in Mexico. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. y Fa J.E. Eds, *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. New York, Oxford University Press. pp 129-146.
- Sears P.B. y Clisby K.H. 1955. Palynology of the southern North America: Pleistocene climate in Mexico. *Geological Society of America Bulletin* **66**:21-530.
- Singh S.K., Quaas R., Ordaz M., Mooser F., Almora D., Torres M. y Vázquez, R. 1995. Is there truly a "hard" rocks in the valley of México? *Geophysical Research Letters* **22**:481-484.
- Styles B.T. 1993. Genus *Pinus*: a mexican review. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. and Fa J.E. Eds. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. New York, Oxford University Press. pp 397-420.
- Toledo V.M. y Ordóñez M.J. 1993 The Biodiversity scenario of Mexico: a review of terrestrial habitats. En: Ramamoorthy T.P., Bye R., Lot A. and Fa J.E. Eds. *Biological diversity of Mexico: origins and distribution*. New York, Oxford University Press. pp. 757-770.
- Urrutia-Fucugauchi J. y Matín del Pozzo A.L. 1993. Implicaciones de los datos paleomagnéticos sobre la edad de la sierra del Chichinautzin, cuenca de México. *Geofísica Internacional* **32**:523-533.
- 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-Selem L. Late Quaternary glaciations of Teyotl volcano, central Mexico. *Quaternary International*. (en prensa).
- Watts W.A. y Bardbury J.P. 1982. Paleocological studies at Lake Patzcuaro on west-central Mexico plateau and Chalco in the basin of Mexico. *Quaternary Research* **17**:56-70.
- Weber R., y Cevallos-Ferriz S. 1994. Perfil actual y perspectivas de la paleobotánica en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* **55**:141-148.
- White S.E. 1962. Late Pleistocene glacial sequence for the west side of Iztaccihuatl volcano, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* **73**:241-249.
- White S.E. 1981a. Equilibrium lines altitudes of Late Pleistocene and recent glaciers in central Mexico. *Geografiska Annaler* **63A**:241-249.
- White S.E. 1981b. Neoglacial to recent glacial fluctuations on the volcano Popocatepetl, Mexico. *Journal of Glaciology* **27**:356-363.
- White S.E. 1987. Quaternary glacial stratigraphy and chronology of Mexico. En: Quaternary Glaciations in the Northern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews* **5**:201-205.
- White S.E. and Valastro, S. (1984) Pleistocene glaciation of Volcano Ajusco, central Mexico, and comparison with the standard mexican glacial sequence. *Quaternary Research* **21**:21-35.
- White S.E., Reyes-Cortés M., Ortega-Ramírez J y Vlastro S. 1990. *El Ajusco: geomorfología volcánica y acontecimientos glaciales durante el Pleistoceno superior y comparación con las series glaciares mexicanas y de las montañas Rocallosas*. INAH, México, 77 p.