



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO PALINOLÓGICO DE UNA SECUENCIA
SEDIMENTARIA LACUSTRE DEL LAGO
BABÍCORA, EN EL ESTADO DE CHIHUAHUA, DE
76,300 A 38,400 A.A.P**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

ERANDI TZAYANI RODRÍGUEZ PÉREZ



**DIRECTOR DE TESIS:
DRA. MARÍA DEL SOCORRO LOZANO GARCÍA
2014**

Ciudad Universitaria, D. F.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno
Rodríguez
Pérez
Erandi Tzayani
(044)5533323816
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Biología
305312064
2. Datos del Tutor
Dra.
Lozano
García
Mária del Socorro
3. Datos del Sinodal 1
Dr.
Priyadarsi
Debajyoti
Roy
4. Datos del Sinodal 2
Dra.
Calvillo
Canadell
Laura
5. Datos del Sinodal 3
Dr.
Valiente
Banuet
Alonso
6. Datos del Sinodal 4
Dra.
Caballero
Miranda
Margarita Erna
7. Datos del trabajo escrito
Estudio palinológico de una secuencia lacustre del Lago de Babícora, en el estado de Chihuahua, de 76,300 a 38,400 a.a.p
95pp
2014

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a aquellas personas que han formado parte de la tira cómica de mi vida,
a los libros y canciones con los que empezaba y concluía innumerables días
y a los maestros cuya visión del conocimiento, puede entre leerse en estas páginas.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| Figuras | I |
| Tablas | II |
| Láminas de palinomorfos | III |
| Resumen | IV |
| Capítulo 1: Introducción | 1 |
| 1.1 Introducción..... | 1 |
| 1.2. Justificación | 3 |
| 1.3. Objetivos | 4 |
| 1.4 Hipótesis | 4 |
| | |
| Capítulo 2. Marco Teórico | 5 |
| 2. 1. Palinología | 5 |
| 2. 2. Características morfológicas de los granos de polen | 6 |
| a) Apertura de los granos de polen..... | 6 |
| b) Pared de los granos de polen..... | 6 |
| 2.3.1 Análisis polínico..... | 7 |
| b) Polen local y regional..... | 7 |
| b) Suma y porcentaje polínico..... | 7 |
| c) Concentración polínica | 8 |
| d) Tasa de acumulación | 8 |
| 2.3.2 Diagramas polínicos | 9 |

| | |
|--|----|
| 2.4 El polen y las esporas como un indicador biológico: ventajas y desventajas | 10 |
| 2.5 Análisis multi-indicador | 13 |
| 2.6 Variabilidad climática durante el Cuaternario | 14 |
| 2.7 Clima en Norteamérica durante el Pleistoceno Medio y Tardío..... | 16 |
| 2.8 Datos de Vegetación en Norteamérica para el Pleistoceno | 18 |
| Capítulo 3: Sitio de estudio | 20 |
| 3.1 Ubicación de la cuenca de Babícora | 20 |
| 3.2 Geología de la cuenca..... | 20 |
| 3.3 Clima de la región..... | 21 |
| 3.4 Características del lago | 23 |
| 3.4 Vegetación regional y local..... | 23 |
| 3.5 Estudios paleoambientales previos..... | 25 |
| Capítulo 4: Método | 29 |
| 4.1 Laboratorio: Procesamientos para la extracción de palinomorfos .. | 29 |
| 4.2. Gabinete | 30 |
| 4.2.1 Conteos e identificación..... | 30 |
| 4.2.2 Análisis de datos y elaboración de diagramas polínicos | 31 |
| Capítulo 5: Resultados | 33 |
| 5.1 Sedimentos..... | 33 |
| 5.2 Fechamiento y modelo de edad..... | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 5.3 Palinoflora..... | 36 |
| 5.4 Diagramas polínicos | 41 |
| 5.4.1 Vegetación local y regional..... | 41 |
| 5.4.2 Diagrama de acumulación..... | 46 |
| 5.5 Comparación del registro con la flora actual..... | 48 |
| 5.6 Reconstrucción del paleoambiente..... | 51 |
| 5.6.1 Concentración de los granos sacados rotos..... | 51 |
| 5.6.2 Índice de aporte palinológico regional vs. local..... | 51 |
| Capítulo 6: Discusión..... | 54 |
| 6.1 Interpretación de los indicadores | 54 |
| 6.1.1 Indicadores de la flora regional | 54 |
| 6.1.2 Indicadores locales | 57 |
| 6.1.3 Indicadores geoquímicos | 59 |
| 6.2 Evolución de la flora | 60 |
| 6.3 Comparación con otros registros palinológicos del Pleistoceno..... | 69 |
| 6.3.1 Comparación con el registro de San Felipe de los 44 a 38 ka | 69 |
| 6.3.2 Trabajos previos en la cuenca de Babícora..... | 71 |
| a) Diversidad palinológica..... | 71 |
| b) Zonación y eventos importantes paleovegetación | 73 |
| 6.4 Comparación con la flora actual | 74 |
| 6.5 Reconstrucción del paleoambiente..... | 76 |
| 6.5.1 Preservación de los granos de polen sacados en el contexto de la energía de la cuenca..... | 76 |

| | |
|--|-----------|
| 6.5.2 Procedencia de la materia orgánica de los sedimentos | 79 |
| Capítulo 7. Conclusiones | 84 |
| Fuentes | 88 |

FIGURAS

| | Descripción | Página |
|----------|--|--------|
| Figura 1 | Expresión matemática utilizada para calcular la concentración con métodos indirectos. | 8 |
| Figura 2 | Expresión matemática utilizada para calcular la acumulación de los tipos polínicos. Las unidades en las que se expresa son no. de granos. cm^{-2} . año^{-1} . | 8 |
| Figura 3 | Mapa geológico del Lago de Babícora ubicado a $29^{\circ} 15' - 29^{\circ} 30' \text{ N}$, $107^{\circ} 45' - 180^{\circ} \text{ W}$, a los pies de la SMO y a 2 140 m.s.n.m con una superficie de 1896 km^2 , se puede ver la composición litológica que rodea la cuenca en la que abundan las rocas basálticas del Terciario y el Cuaternario, así mismo se observa que el núcleo GF fue tomado de la parte centro-oeste del lago. Modificado de (Información personal/ sección de la Carta Buena Aventura-7). | 21 |
| Figura 4 | Climatograma elaborado con los datos de la estación meteorológica Gómez Faríasde 1971-2000. Fuente: CONAGUA. | 22 |
| Figura 5 | Sección estudiada de la secuencia sedimentaria del núcleo GF del lago de Babícora de 353 a 933 cm de profundidad. Se muestran las unidades litológicas y los niveles a los cuales fueron tomadas las muestras datadas con ^{14}C AMS de la sección estudiada (Modificado de Roy, <i>et. al.</i> 2012). | 34 |
| Figura 6 | Modelo de edad construido por Roy, <i>et. al.</i> (2012) para los sedimentos >409 cm del núcleo GF. El modelo cronológico fue calculado con base en la extrapolación de la tasa de sedimentación entre los 273 y 375 cm. | 36 |
| Figura 7 | Diagrama polínico de porcentaje de los taxa de la vegetación regional. Se muestra el porcentaje de cada taxa, la proporción de los palinomorfos por su forma de vida (hierbas vs. árboles) y las cuatro zonas polínicas basadas en el análisis CONISS. | 45 |
| Figura 8 | Diagrama palinológico local. El registro de microalgas se presenta en concentración y el polen de plantas acuáticas se muestra como puntos de distintos colores y tamaños dependiendo de su porcentaje. Las zonas polínicas establecidas se señalan. Se muestran los datos de C/N y | 46 |

COT en porcentaje.

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 9 | Diagrama de acumulación polínica regional. Los datos se presentan (granos $\times 10^3/\text{cm}^2/\text{año}$). A la izquierda del diagrama se muestra la columna estratigráfica de la sección del núcleo estudiada y se indican las zonas polínicas. | 47 |
| Figura 10 | Diagrama de la acumulación total de palinomorfos, la concentración de granos de polen sacados rotos e indicadores geoquímicos. Se muestra la columna estratigráfica de la secuencia estudiada, la tasa de acumulación total de los granos de polen regionales, la concentración de los granos sacados rotos, los valores de TiO_2 , el índice $\text{Zr}/\text{Al}_3\text{O}_2$, el índice de aporte de palinomorfos regional vs. local y el índice de C/N. Los datos geoquímicos fueron obtenidos de Roy y cols. (2012). | 52 |

TABLAS

| | Descripción | Página |
|----------|---|--------|
| Tabla 1 | Se muestran las 7 familias más diversas del listado Florístico del lago de Babícora y sus alrededores. Datos de Estrada y cols. (1997). | 25 |
| Tabla 2 | Recopilación de las reconstrucciones realizadas para el lago de Babícora entre el Pleistoceno y el Holoceno. Las edades están dadas en ka (miles de años). | 26-28 |
| Tabla 3 | Las muestras fueron fechadas por medio de radiocarbono con acelerador de espectrometría de masas en Beta Analytic. El límite del método de datación con ^{14}C se registra en los sedimentos entre 409-457 cm. (Modificado de Roy, <i>et. al.</i> , 2012). | 35 |
| Tabla 4 | Palinomorfos encontrados en la sección del núcleo analizada. Se observan los cinco conjuntos por forma de vida en la que fueron divididos. | 37 |
| Tabla. 5 | Eventos de aumento en la acumulación más importantes registrados en la (Fig. 9). Indicando el intervalo de tiempo en el que se dieron y los taxa involucrados. Entre paréntesis se indica la tasa de acumulación para cada uno de ellos. | 47-48 |
| Tabla. 6 | Se indica la presencia de los taxa con mayor número de géneros reportados en distintos estudios de la flora actual de | 49-50 |

la cuenca de Babícora y del centro de Chihuahua (Estrada, *et al.*, 1997; Metcalfe, *et al.*, 2006; Estrada y Villarreal, 2010) con un *. La presencia de la familia en la vegetación del Pleistoceno medio se indica con un •.

LÁMINAS DE PALINOMORFOS

| | Descripción | Página |
|------------|--|--------|
| Lámina I | Árboles: <i>Pinus</i> spp. (1a-1d) (400x), Pinos piñoneros (1e-1i) (400x); <i>Picea</i> spp. (2a-2c); <i>Abies</i> spp. (3a-3b) (400x). | 38 |
| Lámina II | Árboles: <i>Quercus</i> (4a-4c) (1000x); Cupressaceae (5a-5b) (1000x) <i>Alnus</i> spp.(6) (1000x); <i>Juglans</i> spp. (7) (1000x); <i>Fraxinus</i> spp. (8). Hierbas: Poaceae (9 ^a -9f) (1000x); <i>Artemisia</i> ssp.(10 ^a -10b) (1000x), Asteraceae (10c-10e) (1000x). | 39 |
| Lámina III | Hierbas: Amaranthaceae (11a-11c) (1000x); Rosaceae (12) (1000x); Fabaceae (13) (1000x); <i>Thalictrum</i> spp. (14) (1000x); Reticulado Tipo 1 (15) (1000x); Pteridophyta (16) (1000x). Plantas acuáticas: Cyperaceae (17 ^a -17c) (1000x); <i>Myriophyllum</i> spp. (18a-18c) (1000x). Microalgas: <i>Pediastrum</i> spp. (19a-19b) (400x); | 40 |
| Lámina IV | Microalgas: <i>Pediastrum</i> spp. (19c-19d) (400x); <i>Botryococcus</i> spp. (20) (400x); <i>Gloetrichia</i> spp.(21a) (200x), (21b) (400). | 41 |

Resumen

Con base en el análisis palinológico de sedimentos provenientes de una secuencia sedimentaria de 9.76 m de profundidad, perforada en el lago de Babícora, se reconstruyó las comunidades vegetales, se infirió el nivel lacustre y la productividad del cuerpo de agua entre 76.3 y 38.4 ka.

El Lago Babícora (29° 15', 29° 30' N; 107° 40', 108 ° O; 2 138 m.s.n.m.), esta localizado en una cuenca endorreica tectónica en la porción occidental del desierto Chihuahuense colindando al oeste con la Sierra Madre Occidental. El clima actual del sitio se caracteriza por lluvias de verano, con una precipitación media anual de 500 mm, y una temperatura media anual de 11° C.

El marco cronológico de la secuencia se elaboró con base en nueve fechas de radiocarbono para la parte superior de la secuencia y la edad fue extrapolada tomando en consideración una tasa de sedimentación de 0.017 cm/año.

Para el estudio del contenido de palinomorfos se realizaron dos conteos, uno de los palinomorfos bien preservados y otro tomando en cuenta el grado de preservación de los granos de polen sacados (*Pinus*, *Abies* y *Picea*). Con los conteos fueron elaborados diagramas polínicos de porcentaje, concentración y acumulación.

Se identificó 39 palinomorfos pertenecientes a 38 taxa distintos. Los resultados obtenidos indicaron la presencia de bosques de *Pinus*-Cupresaceae de 76.3 a 66.9 ka. Entre los 66.9 y 59.9 ka se desarrollaron bosques mixtos con *Pinus-Quercus* y *Picea*, y entre los 59.9 y 38.4 ka la vegetación dominante fueron los bosque de *Pinus-Quercus*.

Se reconstruyó un lago profundo con características oligotróficas entre los 76.3 y 58.7 ka con base en taxa locales (*Pediastrum*, *Botryococcus*, *Gloeotrichia* y las plantas hidrófitas). Se reportan cambios en la productividad orgánica y fluctuaciones en el nivel del lago entre 66.9 y 58.7 ka. Entre 58.7 a 50.5 ka hay evidencias de condiciones más eutróficas y un lago más somero. Entre 50.5 a 38.4 ka se presentó un cuerpo de agua somero con características oligotróficas y una menor entrada de material orgánico.

Los conteos de preservación revelaron que el fraccionamiento de los granos de polen sacados puede deberse a condiciones variables en la cuenca, como son: el aumento de la entrada de materia al lago como producto del arrastre por precipitación o condiciones muy someras en el lago que dejaron expuestos a los granos de polen a una posible oxidación y a un mayor número de colaciones con los sedimentos.

El índice de aporte palinológico regional vs. local (concentración de taxa regionales/concentración de microalgas) puede funcionar como una nueva herramienta para la interpretación de la procedencia de la materia orgánica en los sedimentos, sin embargo, hace falta un estudio sistemático que evalúe su confiabilidad, alcances y limitaciones.

Las evidencias sobre la variabilidad climática durante el Pleistoceno en la región del desierto Chihuahuense indican que durante los últimos 80 ka los cambios ambientales en la región fueron importantes.

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción

Los lagos son cuerpos de agua cuyas características están afectadas por las variaciones ambientales intrínsecas y extrínsecas de los lugares donde se encuentran. Entre las variables que determinan su historia y características se encuentran, la composición de la base de la cuenca, la actividad tectónica y volcánica, la vegetación, la biota acuática y en tiempos geológicos recientes la actividad humana (Maher y Thomson, 2001; Cohen, 2003).

La influencia de estas variables, son registradas en los sedimentos que se depositan en los lagos, los cuales pueden brindar información acerca de la historia de los ecosistemas dentro y alrededor del mismo. Además, estos sedimentos lacustres persisten cientos o miles de años, aún después de la desaparición del cuerpo de agua y pueden llegar a tener una buena resolución temporal por lo que son de gran utilidad en los estudios paleoambientales y paleoclimáticos (Cohen, 2003). Los granos de polen y otros palinomorfos, que se pueden encontrar en estos sedimentos, son indicadores ambientales que se preservan en las secuencias sedimentarias de los cuerpos de agua. Su análisis permite establecer el cambio de las comunidades vegetales del pasado y su respuesta a las variaciones ambientales y climáticas (Bennett, 2001). La asociación de los palinomorfos con un grupo taxonómico específico es posible gracias a las características morfológicas únicas de los granos de polen, esporas y algas (Traverse, 1988).

Uno de los motivos por los que el presente trabajo es importante es que, una gran parte de los lagos en México están localizados en las regiones central y sur, mientras en la región norte, que es más árida, son pocos los lagos que existen, lo cual ha limitado los estudios paleoambientales y la reconstrucción de las comunidades vegetales pasadas.

El sitio de estudio del presente trabajo es el Lago Babícora que se encuentra dentro del desierto Chihuahuense ($29^{\circ} 15'$, $29^{\circ} 30'$ N; $107^{\circ} 40'$ - $108^{\circ} 0'$ O), a una altitud de 2,138 m.s.n.m; colindando al oeste con la Sierra Madre Occidental (Metcalf, *et al.*, 1997). El desierto Chihuahuense cubre una gran área de los estados de Chihuahua, Durango,

Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí en México, además de una parte de los estados de Texas, Nuevo México y Arizona en los Estados Unidos y está separado del desierto Sonorense por la Sierra Madre Occidental (Palacios-Fest, *et al.*, 2002). Entre los estudios paleoambientales realizados en el lago de Babícora se encuentran, los análisis geoquímicos y de susceptibilidad magnética (Metcalf, *et al.*, 2002; Palacios-Fest, *et al.*, 2002; Roy, *et al.*, 2012; Roy, *et al.*, 2012a y Chávez-Lara *et al.*, 2012); los trabajos de las propiedades magnéticas de los sedimentos (Ortega Ramírez, *et al.*, 1998; Urrutia-Fucugauchi, *et al.*, 1997). Entre las investigaciones realizadas con indicadores biológicos están los trabajos con polen y diatomeas (Metcalf, *et al.*, 1997; Metcalf, *et al.*, 2002) y los trabajos con ostrácodos (Palacios-Fest, *et al.*, 2006; Chávez-Lara *et al.*, 2012).

Además, existen diversos trabajos cercanos al área de estudio como las investigaciones sobre la historia de la vegetación y análisis geoquímico del Lago de San Felipe en el desierto Sonorense (Lozano, *et al.*, 2002; Roy, *et al.*, 2010, 2012a); los trabajos de elementos mayores y trazas en el Golfo de México (Pérez-Cruz, 2012) y los estudios paleoclimáticos analizando isótopos en plantas C₃ y C₄ para el desierto de Chihuahua (Holmgren, *et al.*, 2007). Otros estudios son las investigaciones con diatomeas (Bradbury, 1997) y los trabajos de caracterización sedimentológica de los depósitos lacustres en el estado de California, Estados Unidos (Kirby, *et al.*, 2006).

Con base en los estudios citados se ha reconstruido el paleoambiente del lago de Babícora y sus alrededores; proponiendo que durante el Pleistoceno tardío prevaleció un ambiente húmedo y frío en donde la vegetación dominante fueron los bosques de *Pinus* y *Quercus* (Metcalf, *et al.*, 2002).

Se ha sugerido que, los cambios en la circulación atmosférica del planeta ocasionaron un desplazamiento hacia el sur de los vientos del oeste, y por ende un incremento en la intensidad de las lluvias de invierno en la región norte de México y que impactaron la región de Babícora (Metcalf, *et al.*, 2006; Bradbury, 1997; Palacios-Fest, *et al.*, 2006). Sin embargo, estudios más recientes (Roy, *et al.*, 2012) plantean hipótesis alternativas, asociando los periodos de mayor precipitación con los periodos interestadiales de los núcleos de Groenlandia, es decir con los periodos

cálidos en el último glacial; mientras que durante los periodos estadiales las condiciones en la cuenca fueron en general más secas. Lo anterior permite plantear que la humedad en la región proviene principalmente de las lluvias de verano.

En este trabajo se realiza una reconstrucción de la vegetación durante el periodo de 76.3 a 38.4 ka con base en el análisis palinológico de muestras de una secuencia sedimentaria colectada en abril del 2010 como parte de los proyectos CONACYT 8380 y PAPITIT UNAM INI04610. Esta investigación se realizó en la sección más profunda de la secuencia y abarca los Estadios Isotópicos Marinos (MIS, por sus siglas en inglés) MIS 5a, MIS4 y parte del MIS 3, siendo uno de los pocos estudios para el norte del país que reconstruye la vegetación para el Pleistoceno medio.

1. 2 Justificación

Los trópicos son considerados una zona fundamental para la comprensión de la dinámica del clima global pues responden directamente a los cambios en la insolación y tienen una profunda influencia en la dinámica de las corrientes de aire y marinas, y en el establecimiento de los periodos glaciales e interglaciares del Cuaternario.

Durante las últimas décadas ha surgido un interés mayor por la comprensión de la variabilidad climática en las zonas subtropicales y tropicales, sin embargo las investigaciones paleoclimáticas en nuestro país se han centrado sobre todo en el Eje Volcánico Transmexicano y en los cambios ambientales de los últimos 50 ka, existiendo pocos trabajos que estudian el paleoclima de las regiones subtropicales de México.

El presente trabajo es parte de los esfuerzos para reconstruir la paleovegetación y los cambios en la composición de la misma en una cuenca ubicada en la región subtropical del norte del país. Considerando que dicha reconstrucción puede servir como herramienta para comprender el cambio climático durante el Pleistoceno medio en la región y aportar evidencias acerca del régimen de lluvias que predominó durante el periodo de tiempo estudiado en el norte del país.

1.3 Objetivos

Objetivo General

- Reconstruir la composición y los cambios de las comunidades vegetales de la región del desierto Chihuahuense con base en el análisis palinológico de sedimentos lacustres del lago de Babícora.

Objetivos particulares

- Identificar y cuantificar los distintos tipos polínicos y géneros de algas encontrados en las muestras.
- Cuantificar el grado de preservación de los granos de polen sacados (*Pinus*, *Picea* y *Abies*) a lo largo del núcleo.
- Reconstruir la composición de las comunidades vegetales que se desarrollaron alrededor del lago de Babícora de 76 a 38 ka.
- Analizar los resultados obtenidos bajo el contexto de las reconstrucciones paleoecológicas de la región y el cambio climático global.

1.4 Hipótesis

Asumiendo que las comunidades vegetales responden a cambios en la variabilidad climática como la precipitación y la temperatura, si las condiciones climáticas y ambientales han cambiado a lo largo del último periodo glacial-interglacial entonces la composición de las comunidades vegetales será diferente a la actual. Es así que, si la precipitación en la región fue mayor entre los 78 y 58 ka entonces se encontrarán granos de polen relacionados con taxa de ambientes más húmedos. Mientras que si la precipitación en la cuenca disminuyó entre los 58 y 38 ka se encontrarán taxa asociados a dicha disminución.

El grado de preservación de los granos de polen sacados (*Pinus*, *Picea* y *Abies*) será menor (alta concentración de granos de polen rotos) si la cuenca estaba sujeta a procesos de alta energía, como la actividad eólica.

Capítulo 2: Marco Teórico

2.1 Palinología

La palinología es la disciplina que aboca el estudio de los microfósiles orgánicos no mineralizados que resisten los diferentes pasos del procesamiento químico usados en dicha disciplina y que por lo tanto se encuentran en las preparaciones maceradas de las rocas sedimentarias procesadas.

Dichos palinomorfos, nombre que reciben estos microfósiles, cuentan con paredes celulares formadas por moléculas altamente resistentes como son la esporopolenina, la quitina y la pseudoquitina (Traverse, 1988). Los palinomorfos se encuentran en un rango de 5-500 μm (Traverse, 1988) e incluyen organismos o restos de organismos como los acritarcas, dinoflagelados, organismos quitinosos, granos de polen y esporas de plantas, algas microscópicas y sus esporas, hongos, e incluso algunos foraminíferos de composición orgánica (Warner, 1990; Molina, 2002).

Los restos de estos organismos pueden ser encontrados de forma relativamente abundante en horizontes sucesivos de núcleos de sedimentos de pantanos, lagos o deltas, lo cual permite su análisis cuantitativo (Huntley y Webb, 1988). Es por ello que después de la correcta identificación de los palinomorfos, dichos conteos se colocan en una matriz para la construcción de diagramas polínicos de la suma, porcentaje, concentración y acumulación de los palinomorfos en diferentes programas especializados, como Tilia (Grimm, 1991-1993).

Los estudios palinológicos son ampliamente usados en las investigaciones paleoecológicas y reconstrucciones paleoambientales de la historia geológica de la Tierra y en especial del Cuaternario (Warner, 1990, Armstrong & Brasier, 2005). El análisis polínico, es la técnica más usada en la generación de datos y la reconstrucción de la vegetación del pasado (Molina, 2002) ya que ofrece información acerca de los cambios en la vegetación regional a través del tiempo y en especial de los sedimentos del Cuaternario, donde los grupos de plantas actuales se encuentran claramente representados en la flora.

2.2 Características morfológicas de los granos de polen y esporas

Los granos de polen y esporas tienen dos ejes de simetría. El eje polar es un eje imaginario desde el centro de la cara próxima en el interior de la tétrada o polo proximal, a la opuesta o polo distal. La línea perpendicular a dicho eje es denominada ecuador y atraviesa el grano de polen por su parte media (Saenz de Rivas, 1978).

La mayoría de los granos de polen son elipsoidales con simetría radial, aunque los hay con una forma esferoidal o subesferoidal, variando de una forma alargada (prolados o perprolados) o achatada (oblados o peroblados). En vista polar muchos de los granos de polen puede apreciarse con diferentes formas dependiendo del número de aperturas, como lo son triangular, cuadrangular o hexagonal (Kapp, 1969).

a) Aperturas de los granos de polen y esporas

La posición de las aperturas en los granos de polen estarán fuertemente relacionadas con el lugar que ocupaba el grano de polen en el desarrollo de la tétrada, por ejemplo, al estar en contacto con otros tres granos de polen sus aperturas suelen ser tres o múltiplos del mismo número (Birks y Birks, 1980). Así mismo podemos encontrar una relación entre el número de aperturas y el tamaño del grano de polen, ya que cada apertura requiere de un espacio mínimo antes de formarse (Molina, 2002). El polen puede clasificarse por el número y forma de aperturas que presenta. Las esporas presentan una marca trilete o monolete.

b) Pared de los granos de polen y esporas

La alta resistencia de la pared de los granos de polen y esporas, que le permite a dichos palinomorfos estar presentes en el registro fósil de miles y millones de años, está compuesta de un biopolímero altamente resistente llamado esporopolenina, con una fórmula base $[C^{90}H^{142}O^{36}]^n$. Además es una estructura altamente especializada que tiene como función proteger al gametofito, en el caso de los granos de polen y al gametofito inmaduro en el caso de las esporas, de la falta de humedad, los ataques microbianos y permitir su rápida germinación (Birks y Birks, 1980; Warner (ed.), 1990; Smol, *et al.*, 2001).

Los granos de polen están protegidos por dos capas. La primera, de adentro hacia afuera, es la intina que se perderá durante el proceso de fosilización, por estar compuesta principalmente de celulosa, péptidos, calosa, polisacáridos, antígenos y proteínas que forman parte del sistema de compatibilidad en las plantas. Dicha capa tiene la capacidad de expandirse, permitiendo la liberación del tubo polínico en la fecundación (Kapp, 1969; Birks y Birks, 1980). Mientras que, la exina, que es la segunda capa, está compuesta de esporopolenina, y por sus características, permite definir a los grupos morfológicos, que son claves en el proceso de identificación.

2.3.1 Análisis polínico

a) Polen local y regional

La paleoecología estudia los patrones de la vegetación a largo plazo y el análisis palinológico es una de las técnicas que se utilizan para investigar los cambios en los ambientes terrestres. En ambientes anóxicos se preservan los granos de polen y esporas, los cuales son susceptibles de ser identificados a distintos niveles taxonómicos. Estos proceden de las comunidades cercanas (palinomorfos locales) o lejanas (palinomorfos regionales) al sitio de depósito.

b) Suma y porcentaje polínico

La suma polínica, se realiza separando los palinomorfos encontrados en cada preparación en diferentes grupos con base en su forma de vida (árboles, hierbas, hidrofitas y microalgas) e incluyendo únicamente a los elementos regionales (árboles, arbustos y hierbas= ΣP) (Huntley y Webb, 1988; Warner (ed.), 1990; Amstrong & Brasier, 2005).

El porcentaje polínico es la frecuencia en la que se encontraron cada uno de los taxa tomando en cuenta la suma de los elementos regionales. El porcentaje total de la vegetación regional se separa en las tres categorías mencionadas en la obtención de la suma polínica (Huntley y Webb, 1988, Warner (ed.), 1990).

c) Concentración polínica

La concentración polínica es una medida que estima la cantidad de palinomorfos por unidad de volumen o masa de sedimento húmedo o seco y se expresa como el número de granos de polen por cm^3 , cuando se trabaja en unidades de volumen (Birks y Birks, 1980). Para estimar dicho parámetro se adicionan a cada muestra polen o esporas exóticas de una concentración conocida y se calcula la ecuación que se muestra en (Fig.1) (Birks y Birks, 1980).

$$\frac{\text{Polen Fósil contado}}{\text{Polen Exótico contado}} \times \text{Concentración de Polen Exótico}$$

Figura 1. Expresión matemática utilizada para calcular la concentración con métodos indirectos.

Los datos de los diferentes palinormorfos en términos de la concentración puede ofrecer información paleoecológica acerca de los cambios en la redepositación o sedimentación de la cuenca. Una de las ventajas al reportar a los distintos palinomorfos en términos de su concentración en la muestra es que los valores de cada tipo polínico son independientes entre sí (Birks y Birks, 1980).

d) Tasa de acumulación

La tasa de acumulación polínica, también conocida como flujo polínico o tasa de depositación polínica, es el número total de granos acumulados por unidad de área de sedimentación por unidad de tiempo (Fig. 2). Se calcula considerando la concentración de polen en el sedimento y el tiempo por unidad de espesor o tiempo de depósito (Birks y Birks, 1980).

$$\text{Número de Granos} / \text{cm}^2 / \text{año}$$

Figura 2. Expresión matemática utilizada para calcular la acumulación de los tipos polínicos. Las unidades en las que se expresa son no. de granos. cm^{-2} . año^{-1} .

La acumulación proporciona información acerca de la abundancia de cada taxón y es independiente en cada especie, por lo que los diagramas de acumulación pueden dar

una visión más realista de la vegetación y del ambiente pasado y sus cambios. Además las relaciones en el flujo del polen permiten discernir si un taxa determinado se encuentra cerca o lejos del sitio de muestreo y es de utilidad en la medición de la migración de especies a nivel continental o nacional (Birks y Birks, 1980). El número de granos de polen y esporas puede, también, ser de utilidad para los estudios sedimentológicos por estar relacionado con las fluctuaciones de la tasa de sedimentación (Molina, 2002). Sin embargo, debe tomarse en cuenta que la depositación del grano de polen no puede relacionarse directamente con la producción del mismo (Birks y Birks, 1980).

2.3.2 Diagramas polínicos

El diagrama polínico consiste en la representación gráfica de los conteos, su objetivo es la visualización de los datos que se encuentran resumidos en la matriz de conteos polínicos realizados en el microscopio óptico y que son dispuestos siguiendo un orden cronoestratigráfico, litoestratigráfico o bioestratigráfico (Fægri y Iversen, 1989). Son una herramienta de documentación que nos permiten conocer los cambios temporales en las asociaciones de los granos de polen y esporas de las distintas embriofitas, así como de las algas encontradas en las preparaciones (Huntley y Webb, 1988).

Entre las preguntas que puede resolver un diagrama polínico se encuentra: 1) ¿qué taxa estuvieron presentes?, 2) ¿cuál es su abundancia relativa?, 3) ¿qué comunidades de plantas están presentes? 4) ¿qué espacio y tiempo ocupó una comunidad?, 5) ¿cuáles fueron los factores del ecosistema que operaron en el tiempo y el espacio estudiados? (Birks y Birks, 1980).

Los elementos que los componen son, un eje vertical donde se coloca la información cronoestratigráfica del diagrama y se presenta la escala de profundidad y las edades absolutas o relativas, que son generalmente eventos geológicos y/o arqueológicos. Un eje horizontal, en el que se encuentran los espectros polínicos, que son el conjunto

de frecuencias relativas en un nivel específico de los diferentes taxa encontrados y su variación a lo largo del eje vertical o del tiempo (Birks y Birks, 1980).

Otro de los elementos del diagrama polínico son las zonas polínicas. La zonación es una forma de sintetizar y describir la gran información que contiene un diagrama polínico y consiste en la construcción de secciones o zonas por su composición polínica (Birks y Birks, 1980).

Al construir una zona polínica se busca que una unidad estratigráfica comparta un contenido homogéneo de polen y esporas que se distinguen de los cuerpos sedimentarios adjuntos, ya sea por la composición o la frecuencia de los palinomorfos.

Si la zonación es construida adecuadamente considerando la litología y datos de fechamiento, se pueden realizar inferencias de la vegetación o el clima, puede ser comparada con otras zonaciones locales y ser propensa a formar parte de una zonación regional que nos permita hacer inferencias en el tiempo y en el espacio (Birks y Birks, 1980).

2.4 El polen y las esporas como un indicador biológico: ventajas y desventajas

El estudio del polen y las esporas provee un registro continuo de la historia evolutiva de las plantas vasculares (Molina, 2002) y reflejan la ecología de las mismas, por lo que el hábitat y la ecología de la vegetación puede ser más o menos inferido con ayuda de dichos indicadores si consideramos previamente los procesos de dispersión y sedimentación de los microfósiles y del ambiente sedimentario de trabajo (Armstrong y Brasier, 2005).

Algunos de los aspectos que permiten que los palinomorfos, como los granos de polen, las esporas y algunas algas, puedan ser usados como indicadores durante la historia geológica de la Tierra son:

- Desde el origen de las plantas se pueden encontrar en forma más o menos abundante en las rocas sedimentarias marinas y continentales, por lo que decimos que tienen una alta ubicuidad.
- Permiten hacer correlaciones de los cambios evolutivos que han sufrido los grupos de plantas a las que pertenecen (Molina, 2002).
- Tienen una buena preservación y durabilidad en el registro fósil por la presencia de esporopolenina en sus paredes celulares, la cual es un biopolímero de alta resistencia que protege a los granos de polen y esporas de los ataques microbianos y los procesos sedimentarios, diagénicos e incluso metamórficos de bajo grado (Armstrong y Brasier, 2005, Fægri e Iversen, 1989).
- Abundancia en los sedimentos, debido a la alta producción durante el ciclo de vida de las plantas (Fægri e Iversen, 1989, Armstrong y Brasier, 2005). Son unos de los microfósiles más abundantes. En un gramo de sedimento puede haber hasta 4 millones de granos de polen (Molina, 2002).
- Los granos de polen y esporas pueden extraerse de la matriz de sedimentos y ser identificados a nivel de familia, género o especie (Warner, 1990).
- En algunos casos pueden funcionar como marcadores bioestratigráficos y son eficientes en los estudios estratigráficos de resolución fina (Birks y Birks, 1980).
- El polen y las esporas tienden a depositarse universalmente en forma de lluvia polínica, y gracias a las turbulencias existe una mezcla homogénea de todos los tipos polínicos, que queda registrado en los sedimentos (Birks y Birks, 1980).
- Los diagramas polínicos producto de las observaciones y conteos de los granos de polen y esporas pueden ser comparadas con otros diagramas polínicos de la misma región o tiempo geológico.

Sin embargo, pese a lo comentado en los párrafos anteriores su uso presenta una serie de limitaciones como son:

- El tener un tamaño similar al de los limos, su presencia es escasa o nula en materiales bien clasificados constituidos de arcillas y areniscas (Molina, 2002).
- Son sensibles a la oxidación y a la alta alcalinidad, siendo escasos en materiales rojos, calizas puras y materiales evaporíticos (Smol, *et al.*, 2001). Además, son susceptibles a las altas temperaturas y la presión, por lo que en rocas metamórficas de grado medio o alto los granos de polen son destruidos (Molina, 2002).
- Los procesos de maceración y la cantidad de agua retenida por los fósiles puede afectar el tamaño del ejemplar, por lo que dicho factor debe ser considerado al hacer la asignación a un taxón considerando como carácter diagnóstico el tamaño (Molina, 2002).
- En ocasiones resulta complicado generar una relación entre la planta productora y las esporas o granos de polen encontrados, cuando estos últimos no se encuentran en relación orgánica. Dicha incertidumbre va aumentando conforme la antigüedad del fósil es mayor (Molina, 2002).
- Las especies de algunas familias y géneros pueden producir polen con características que hace difícil su distinción, las familias Poaceae y Cyperaceae son un buen ejemplo de lo anterior (Birks y Birks, 1980).
- Uno de los problemas que se presentan en los estudios ecológicos es que, la abundancia de un tipo polínico en la muestra no necesariamente corresponde a la abundancia de planta asociada en la comunidad vegetal (Birks y Birks, 1980).
- Se sabe que las plantas con dispersión por viento producirán una mayor cantidad de polen que aquellas que viajan a través de insectos, además existen distintos vectores por los que llegan al gametofito femenino, por lo que no

toda la flora de una región estará bien representada en la lluvia polínica (Smol, *et al.*, 2001).

- La producción de polen es un fenómeno estacional, lo cual podría representar una limitación en el muestreo (Horowitz, 1992), es por eso que es recomendable conocer la biología de los taxa o muestrear a lo largo de un año (Molina, 2002).
- El número de granos producidos por una planta puede variar de un año a otro, (Birks y Birks, 1980).
- La producción absoluta de polen varía de especie a especie y de individuo a individuo, respondiendo en ocasiones a las condiciones ambientales, sin embargo en ocasiones el análisis polínico está basado en el supuesto de la gran cantidad y el alto grado de uniformidad en la dispersión de los granos de polen (Fægri e Iversen, 1989).
- En teoría las muestras de un ensamblaje de polen podrían derivar de dos o más tipos de vegetación, ya que algunas de las especies de importancia ecológica podrían producir bajas cantidades de polen o tener una preservación mala, sin embargo este error puede disminuir si consideramos el hábito de distribución de las especies y las limitaciones para distinguir dos tipos diferentes de comunidades vegetales (Birks y Birks, 1980).

2.5 Análisis multi-indicadores

Los estudios de la dinámica de los ecosistemas en el pasado pueden abordarse desde las interpretaciones de los cambios en los organismos fósiles y las características de los sedimentos.

Los indicadores paleoambientales, que pueden ser de origen biológico o estar relacionados con alguna de las características de los sedimentos, preservan información del ambiente y son sensibles a diferentes variables climáticas en distintas escalas temporales (Li Bo, *et al.*, 2010), además cada indicador ocupa un

lugar en el ecosistema y en la red de interacciones, por lo que puede ser usado para reconstruir diferentes partes del mismo (Birks y Birks, 2006).

El entendimiento de las complejas conexiones e interacciones en estos sistemas pueden ser entendidas desde una visión más amplia, que la generada a partir de un solo indicador, al estudiar el mayor número de indicadores posibles. Las investigaciones que consideran múltiples indicadores son conocidas como multiproxy o multi-indicadores (Birks y Birks, 2006).

Considerando lo anterior, la mayoría de los estudios paleolimnológicos en la actualidad se realizan bajo un análisis de indicadores múltiples y tienen como objetivo investigar la dinámica del ecosistema y hacer inferencias del clima y los ambientes del pasado.

Los beneficios de un análisis que incluye a más de un indicador es mayor a la suma de los beneficios de cada uno de ellos de manera independiente (Birks y Birks, 2006). Además, otra de las ventajas al trabajar con varios indicadores es que cada uno de ellos tiene la capacidad de reflejar distintos factores ambientales en diferentes escalas, por lo que las interpretaciones que se realizan con ellos tienen diferentes debilidades y fortalezas. Al realizar un trabajo con distintos indicadores las fortalezas pueden explotarse y las debilidades identificarse (Birks y Birks, 2006).

Los trabajos de este tipo consideran que el estudio de cada uno de los indicadores debe estar encaminado a resolver una pregunta en común o cumplir los mismos objetivos (Birks y Birks, 2006). Uno de los objetivos más importantes en estos trabajos es la identificación de grandes patrones de variación de los datos, que pueden ser identificados visualmente o estadísticamente, buscando que sea lo más parsimonioso posible e independiente a las zonaciones previas construidas para cada uno de los indicadores (Birks y Birks, 2006).

2.6 Variabilidad climática durante el Cuaternario

La variabilidad climática durante el Cuaternario se caracteriza por la alternancia entre los ciclos glaciales e interglaciales de los últimos 800 ka con una periodicidad de ~100 ka entre cada uno de ellos. Ésta variabilidad a escala global ha sido

observada en los registros de los núcleos de hielo de la Antártida, los sedimentos marinos y distintos registros continentales (Wolff, *et al.*, 2010; Long y Stoy, 2013).

La variabilidad climática de los últimos 800 ka es atribuida a los cambios en los parámetros orbitales, que provocaron cambios en la insolación (forzamientos externos del clima) y amplificados por factores internos como el crecimiento de los casquetes polares y los cambios en la concentración de gases de efecto invernadero (Wolff, *et al.*, 2010).

Los MIS (*Marine Isotopic Stage*) son periodos globales de variación en la temperatura durante el Pleistoceno y Holoceno, que han sido detectadas principalmente mediante la variación del $\delta^{18}\text{O}$ en la estructura carbonatada de los foraminíferos en los sedimentos marinos de diferentes latitudes y en los núcleos de hielo de Groenlandia (Gibbard, 2007).

El $\delta^{18}\text{O}$ es una relación entre el ^{18}O y ^{16}O que permite medir el fraccionamiento isotópico del oxígeno debido a la temperatura (Lowe, *et. al.*, 2007; Quiroz, 2012). La variación en el $\delta^{18}\text{O}$ a nivel global en el océano es controlada por la entrada de agua con diferentes composiciones isotópicas a causa de la variación en los volúmenes de hielo glaciales y continentales (Bowen, 2009). La variación en el $\delta^{18}\text{O}$ toma valores más altos durante las épocas glaciales, cuando el volumen de hielo incrementa y valores bajos durante los interglaciales (Lower, *et. al.*, 2007).

Esta señal isotópica es uniforme a nivel global y permite la división de estadios isotópicos globales, que se denotan con números pares para los periodos fríos e impares para los periodos cálidos (Gibbard, 2007).

Bajo éste contexto el Cuaternario Tardío y particularmente el Último Glacial, corresponden a los Estadios Isotópicos Marinos 4, 3, 2 (MIS, por sus siglas en inglés) abarcando entre los 73.5-14.7 ka. Se caracterizan por oscilaciones climáticas de escalas milenarias de periodicidad irregular, donde la mayoría de los cambios en el clima se dieron en lapsos de entre 10 y 200 años con cambios en la temperatura de entre 8-15 °C en Groenlandia (Sanchez y Harrison, 2010).

Entre las oscilaciones a escalas milenarias que se han detectado se encuentran los eventos Henrich (H) y los eventos Dansgaard-Oeschger (DO), los cuales están fuertemente asociados con el MIS 3 (Long y Stoy, 2013).

2.7 Clima en Norteamérica durante el Pleistoceno Medio y Tardío

La influencia de los cambios en los parámetros orbitales y la variabilidad climática milenaria durante el Pleistoceno produjeron grandes variaciones a nivel global en la temperatura, los niveles del mar y el régimen de precipitación, afectando la cantidad y estacionalidad de esta última (Metcalf, 2006). Se ha propuesto que la expansión del manto Laurentino y la disminución de la insolación fueron algunos de los factores que modelaron el clima de Norteamérica durante la Última Glaciación a través de la modulación de la circulación atmosférica (Kirby, *et al.*, 2006). La expansión hacia bajas latitudes del frente polar, las corrientes de chorro del oeste y las celdas de alta presión, influyeron en la distribución de los vientos que traían consigo humedad al norte de México (Quiroz, 2012).

Además se ha sugerido que el planeta experimentó condiciones más secas durante la glaciación aunque existió una diferenciación regional a este patrón (Metcalf, 2006). Kirby, *et al.* (2006) plantea que en el Último Glacial Máximo (UGM), ca. 21 ka, se experimentaron condiciones húmedas. Algunos de los modelos de circulación atmosférica desarrollados para el Wisconsiniano Tardío para la región noroeste de México y sureste de Estados Unidos sugieren que los Vientos del Oeste y las celdas de baja presión asociadas migraron hacia el sur hasta llegar a los 30° N, ocasionando un incremento de las lluvias de invierno en la región (Palacios-Fest, *et al.*, 2002). Este incremento en la humedad efectiva permitió un aumento en los lagos pluviales y su persistencia (Holmgren, *et al.*, 2006), mientras que la temperatura se mantuvo varios grados por debajo de la presente.

Los trabajos de Bradbury (1997) en el lago Owens, en los Estados Unidos sugieren una relación entre la glaciación y un incremento de la humedad efectiva en la zona, respaldando el desplazamiento hacia el sur de los vientos del oeste durante los episodios glaciares. Dicha interpretación considera que existe una correspondencia entre los altos niveles de susceptibilidad magnética y los altos porcentajes de las

diatomeas planctónicas de agua dulce, que fueron dominantes entre los 100 y 50 ka durante los periodos fríos de la Última Glaciación, mientras que durante el periodo interglaciar hay una dominancia de las diatomeas salinas.

Los registros del centro y noroeste de los Estados Unidos indican una fuerte relación temporal de los climas glaciales con el Norte del océano Atlántico, planteando que la posición de las Corrientes de Chorro Polar moderaron la variabilidad de la temperatura superficial del océano, que liga la diversidad espacial del clima en el centro y noroeste de Norteamérica con el Atlántico del norte (Kirby, *et al.*, 2006).

Es aceptado ampliamente que la circulación monzónica de verano se restableció hace alrededor de 12 a 9 ka en respuesta al incremento en la insolación durante el verano del hemisferio norte (Metcalfe, *et al.*, 1997). Entre los 9 y 6 ka se dio un periodo de máximo calentamiento en el Hemisferio Norte y la precipitación aumentó en la provincia Sierras y Cuencas, aunque muchos de los datos del suroeste de los Estados Unidos indican una disminución en los niveles de los lagos y una reducción de los bosques (Metcalfe, *et al.*, 1997).

Barbour (1988) y Heusser (1998) proponen que la migración de los vientos del oeste disminuyó la temperatura alrededor de 9 °C por debajo del promedio actual e incrementó la precipitación anual aproximadamente 700 mm sobre la media actual en California. Hace 21.1 ka la temperatura en enero se encontraba por arriba de los 2.4 °C (4.5 °C más baja a la actual) y una temperatura media del mes de julio por arriba de los 23.3° C (4.4 °C por debajo de la actual), mientras la precipitación media fue al menos de 80 mm (Holmgren, *et al.* 2006). , aunque en las latitudes altas se estima que durante el UGM hubo un decremento entre 5 y 8.5 °C.

Los límites de distribución hacia el norte de los pastos C₄ y las plantas anuales han permanecido más o menos constantes durante el último ciclo glacial e interglaciar, mientras que las plantas C₃ no se encuentran en el registro hasta hace 5 ka (Holmgren, *et al.*, 2006). Dichos resultados pueden conllevar a la idea de la permanencia del Monzón Mexicano para la última glaciación en el suroeste de los Estados Unidos y a la reconstrucción de temperaturas relativamente cálidas durante el Pleistoceno con humedad durante el verano y condiciones probablemente frías o húmedas durante el

invierno, estimando que la precipitación de verano contribuye con al menos la mitad o es incluso comparable a su actual aportación a la precipitación anual.

El registro geoquímico de la cuenca de Babícora indican que la fuente principal de humedad para la región fueron las lluvias del Monzón Mexicano durante los interestadiales y que hubo una influencia mínima de los vientos del oeste en latitudes por debajo de los 29° durante los estúdiales (Roy, *et al.*, 2012)

2. 8 Datos de Vegetación en Norteamérica para el Pleistoceno

Los registros palinológicos para el MIS 4 (74-60 ka), MIS 3 (60-24 ka) y MIS 2 (24-11 ka) muestran una fuerte influencia de los cambios en los parámetros orbitales a escala milenaria en la vegetación de Norteamérica; detectando un cambio gradual en la vegetación entre periodos dominados por especies de clima frío durante los estadiales y especies de climas más cálidos durante los interestadiales (Jiménez-Moreno, *et. al.* 2010).

Los trabajos de Ingram y Kennett (1995) realizados en California, en Jiménez-Moreno y cols. (2010), indican fluctuaciones en la abundancia relativa de bosques templados a cálidos abiertos con la presencia importante de *Quercus* y bosques de coníferas templados durante los últimos 160 ka. Los bosques de coníferas, que en la actualidad solo se encuentran a alturas elevadas, dominaron durante el UGM y otros periodos fríos, como los eventos Henrich, periodos en los que se reconstruyen condiciones más frías.

Holmgren y cols. (2006) menciona la presencia de bosques mixtos de coníferas y bosques abiertos, donde ahora predominan los bosques de pinos, *pinos* piñoneros y *Juniperus* y bosques con pinos piñoneros y *Juniperus* donde ahora hay desiertos en el suroeste de los Estados Unidos entre los 30 y 13 ka. Además, documenta que las hierbas anuales con floración en el verano y los pastos C₄ persistieron durante el Pleistoceno Tardío con una distribución cercana a sus límites actuales. Los autores proponen que dichas plantas pudieron formar parte de pastizales que se expandieron en el centro de los estados de Texas, y el sur de Arizona más allá de los 35 °N en los últimos 40 ka.

Bradbury (1997) recopila la información de distintos registros para los Estados Unidos en los que se reporta la presencia de *J. osteosperma* entre los 31.5 y 9.5 ka y *J. scopulorum* entre los 17.7 y los 16.1 ka. Además, menciona que *Artemisia*, género de la familia Asteraceae, es uno de los tipos polínicos más característicos para el Pleistoceno tardío en los depósitos del *Great Basin* y que dicho género está asociado a los bosque de pinos piñoneros y *Juniperus* sobre las pendientes bajas de la Sierra Nevada y en White-Ionyo (Bradbury,1997).

Para la cuenca de San Felipe durante el MIS 3 se reconstruye entre los ca. 44,000 y ca. 34,000 ¹⁴C años a.P. un bosque abierto de *Pinus* y *Juniperus*, reportando una alta presencia de *Pinus* en el estrato arbóreo y porcentajes altos de granos de polen de lo que parece ser *Pinus* de tipo piñonero. *Artemisia* y Amaranthaceae son taxa del estrato herbáceo. Entre los ca. 34,000 a los 22,000 ¹⁴C años a.P se reconstruye un bosque con chaparrales y reportan un aumento de *Juniperus*, una disminución de *Pinus* y un establecimiento de *Quercus* y plantas del Chaparral, como lo son *Arctostaphylos* y *Rhus*, de la familia Ericaceae y Anacardiaceae respectivamente (Lozano, et al. 2002).

Palacios-Fest y cols. (2002) sugieren que entre las comunidades vegetales que se establecieron en el norte México y sitios cercanos en los Estados Unidos antes, durante y después del UGM (22-17 ka) se encuentran los *Juniperus* y pastizales entre los 610-680 m.s.n.m y a elevaciones más altas, entre 880-1,200 m.s.n.m., en el área de Big Bend en Texas se desarrollaron bosques de pinos piñoneros, *Juniperus* y *Quercus*, que reflejarían un clima relativamente seco.

En los desiertos de Chihuahua y Sonora se registran Bosques siempre verdes donde se encontrarían plantas de hoja perenne mesofíticas y flora esclerófila y micrófila (Palacios-Fest, et al., 2002). Los arbustos desérticos C₃ permanecen ausentes en esta región de Estados Unidos y México durante el Pleistoceno Tardío y no es hasta hace 5 y 4 ka que llegan a ocupar esté espacio, aunque el límite norte de los arbustos C₃ es similar al límite actual de los pastos C₄ (Holmgren, et al., 2006).

Capítulo 3: Sitio de estudio

3.1 Ubicación de la cuenca de Babícora

La cuenca de Babícora se encuentra en el desierto Chihuahuense, el cual junto con los desiertos de Mojave, Sonora y la Gran Cuenca forman parte de la franja de los desiertos de Norteamérica (Palacios Fest, *al et.*, 2002).

El desierto Chihuahuense cuenta con una extensión de 362,000 km² y está conformado por extensas planicies interrumpidas por serranías, y se extiende sobre los estados mexicanos de Chihuahua, Durango, Zacatecas, Nuevo León y San Luis Potosí y los estados de Nuevo México, Texas y Arizona en los Estados Unidos (Palacios Fest, *al et.*, 2002).

La cuenca de Babícora, (29°15' - 29°30'N, 107°45' - 108° O), es una cuenca endorréica de origen tectónico con escurrimientos de agua semipermanentes (Roy *et al.*, 2012) que cubre un área de alrededor 1,896 km² (Palacios Fest, *et al.*, 2002) y se encuentra a los pies de la Sierra Madre Occidental (SMO) (29° N, 108° O) con una altitud de 2,140 m.s.n.m., en el municipio de Gómez Farías (Metcalf, *et al.*, 1997, Roy *et al.*, 2012). Las montañas que la rodean van de los 2,500 a los 3,000 m.s.n.m y pertenecen a la Subprovincia Fisiográfica Sierras y Llanuras Tarahumaras perteneciente a la Provincia Fisiográfica de la SMO (Estrada, *et al.*, 1997). Por su parte Hawley (1969) identifica a la cuenca en el sector Babícora-Bustillos dentro de la unidad fisiográfica Sierras y Valles Mexicana (*Basin and Ranges*).

3.2 Geología de la cuenca

Los procesos tectónicos y volcánicos durante el Terciario y el Cuaternario han modelado la cuenca de Babícora (Ferrari, 2005). La mayor parte de las rocas que rodean la cuenca son rocas de origen volcánico y forman parte del "Complejo Volcánico Inferior" y "Complejo Volcánico Superior". Las rocas volcánicas del Paleógeno están representadas por tobas rióliticas e ignimbritas que afloran en la parte noroeste y suroeste de la cuenca andesitas tranquiandesitas que rodean el lago en la parte suroeste y noroeste. Al este y noreste hay conglomerados polimícticos del Neógeno (Servicio Geológico Mexicano, 1998, Ortega Ramírez *et al.*, 1998).

Los basaltos y conglomerados del norte y algunos de los conglomerados polimícticos del sur depositados en el Cuaternario están en contacto tectónico con tobas riolíticas e ignimbritas del Paleógeno (Servicio Geológico Mexicano, 1998). Los sedimentos depositados durante el Pleistoceno, que son de origen fluvial y lacustre sugieren que la morfodinámica del área fue mucho más activa que en nuestros días (Palacios Fest, *et al.*, 2002).

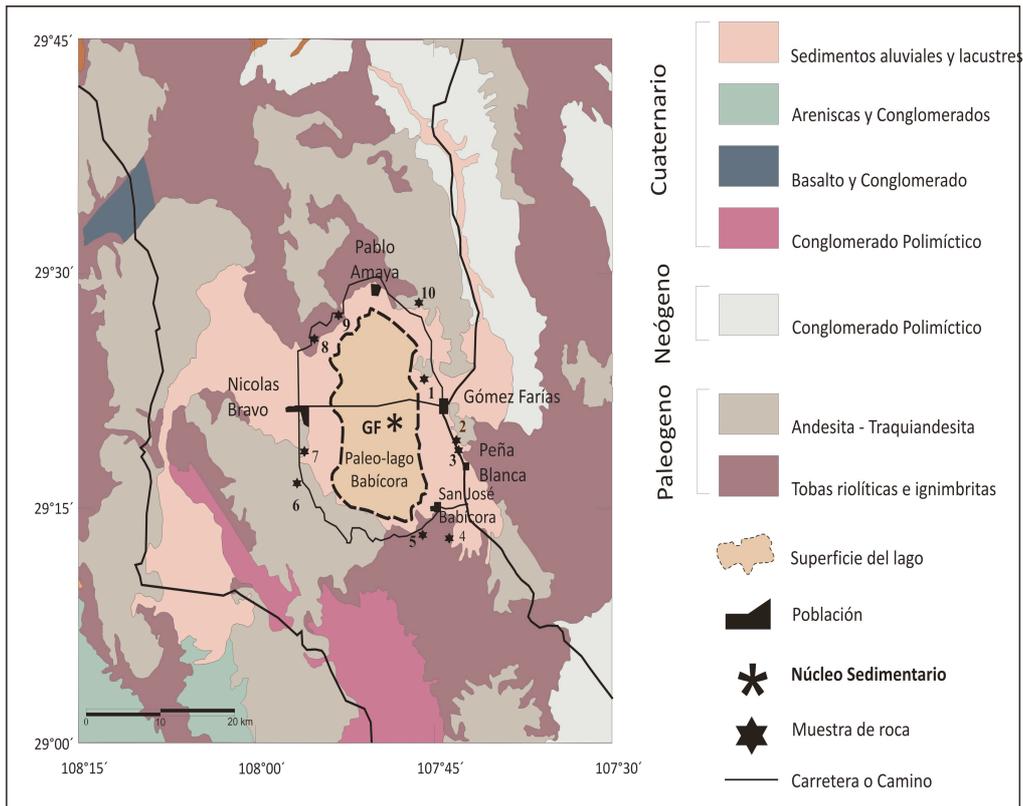


Figura 3. Mapa geológico del Lago de Babicora ubicado a 29° 15' - 29° 30' N, 107° 45' - 108° 00' W, a los pies de la SMO y a 2,140 m.s.n.m con una superficie de 1,896 km², se puede ver la composición litológica que rodea la cuenca en la que abundan las rocas basálticas del Terciario y el Cuaternario, así mismo se observa que el núcleo GF fue tomado de la parte centro-oeste del lago. Modificado de (Información personal/sección de la Carta Buena Aventura-7).

3.3 Clima de la región

El clima del noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos, depende de la posición e intensidad de las celdas atmosféricas de alta presión y su interacción con la masa continental (Metcalf, 2006). Durante el verano la circulación monzónica y los ciclones tropicales transportan humedad desde el Pacífico y el Golfo de México y

producen más del 70% de la precipitación anual en la región (Chávez-Lara, *et al.*, 2012). Durante el invierno las lluvias son producto de la humedad de las latitudes medias en el Pacífico (Metcalf, 2006).

El clima que prevalece en la cuenca pertenece a la clasificación C (E) (w1) (b) (e'), un clima semifrío subhúmedo, con lluvias en verano de tipo torrencial, veranos frescos y largos, y oscilaciones de la temperatura medio mensual muy altas (Estrada, *et al.*, 1997).

La temperatura media anual es de 12.7°C. Durante de los meses de verano (de junio a septiembre), la temperatura oscila entre los 17 y 20°C y en los meses de noviembre a marzo la temperatura promedio es de 4 a 8°C (Roy, *et al.*, 2012). La precipitación promedio anual es de 550 mm, mientras que durante los ocho meses restantes la zona permanece en condiciones generalmente secas (Fig. 4) (Roy, *et al.*, 2012), debido a la intensa evaporación. La cuenca tiene un déficit hidrológico aproximado de 120 mm por año (Servicio Meteorológico Nacional) (Fig. 4), aunque se han observado grandes cambios en la precipitación anual que van de los 351 a los 770 mm entre 1958 y 1986 AD (Roy, *et al.*, 2012).

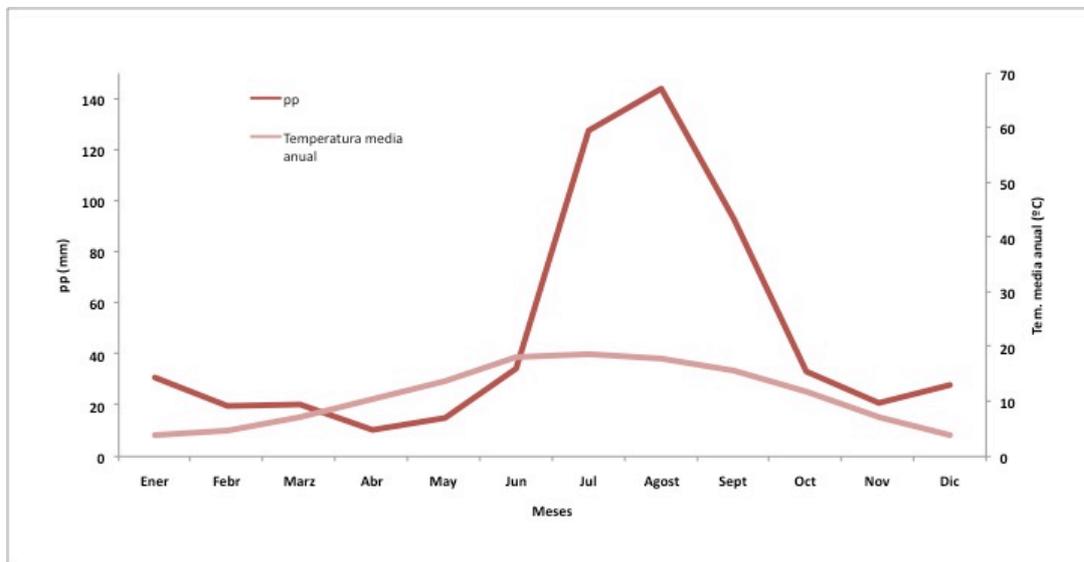


Figura 4. Climatograma elaborado con los datos de la estación meteorológica Gómez Faríasde 1971-2000. Fuente: CONAGUA.

3.4 Características del lago

El lago de Babícora que, cubre un área de 25 km de norte a sur y de 13 km de este a oeste aproximadamente (Metcalfé, *et al.*, 1997), se caracteriza por tener una profundidad de <1m bajo condiciones normales. La superficie de inundación permanente se encuentra en dos pequeñas áreas en la parte norte de la cuenca, aunque llega a extenderse temporalmente (Metcalfé, *et al.*, 2002).

Durante el periodo de estiaje la cuenca es sometida al proceso de deflación y la superficie del lago disminuye drásticamente (Chávez-Lara, *et al.*, 2012). En temporada de lluvias el lago de Babícora es alimentado por los arroyos intermitentes, El Jaral y El Cuatrocientos, que se encuentran al este y al oeste de la cuenca respectivamente (Quiroz, 2012) y cuyos escurrimientos permiten que el lago se extienda hasta por 158 km² (Metcalfé, *et al.*, 2002). En la época húmeda se deposita la mayor parte de los sedimentos en la cuenca (Quiroz, 2012).

Los sedimentos lacustres son de origen aluvial y fluvial, en su mayoría de grano fino (limos y arcillas), aunque también hay depósito de arenas y carbonatos, estos últimos como consecuencia de la alta evaporación, y depósitos de arenas finas y limos de origen eólico. Además, se observan en la actualidad, la presencia de terrazas lacustres o líneas de playa, indicios de que en el pasado el lago alcanzó niveles más altos (Ortega-Ramírez, 1995).

3.4 Vegetación regional y local

Los estudios florísticos del estado de Chihuahua indican que cerca del 70% de su territorio está cubierto por comunidades vegetales de zonas áridas y semiáridas, sin embargo, el contraste en el relieve, los suelos y el clima han propiciado una configuración heterogénea de la cubierta vegetal. Existen diferentes clasificaciones de los tipos de vegetación dominante para el estado, Shreve (1939) hace la división de cuatro tipos de comunidades: 1) el desierto, 2) los bosques de encino y pastizales, 3) bosques de pino y 4) vegetación de barranca. Rzedowski (1978), menciona la presencia de 1) matorral xerófilo, 2) pastizales, 3) bosques de coníferas y encinos y 5) bosques tropicales subcaducifolios, como señalan Estrada y Villarreal (2010).

Estrada y cols. (1997) reportan dos tipos principales de vegetación para el área de estudio del presente trabajo: el bosque de *Pinus-Quercus* y el pastizal halófito. Bajo ésta clasificación, la comunidad de Bosque de *Pinus-Quercus* cubre una extensión de 1,075 km² en todos los picos montañosos que rodean el lago, siendo la comunidad vegetal dominante en la zona. Se reportan como especies dominantes a *P. cembroides*, *P. engelmannii*, *P. chihuahuana*, *Q. emoryi*, *Q. arizonica*, *Q. depresipes*, *Q. hypoleucoides* y *Q. rugosa*.

En las partes bajas o llanuras, que abarcan un área aproximada de 237 km², la comunidad dominante es el pastizal halófilo, que se caracteriza por tener plantas de no más de 30 cm. de longitud en promedio y donde las especies dominantes son *Distichlis spicata* var. *stricta*, *Muhlenbergia utilis*, *Sporobolus cryptandrus* y *Eragrostis mexicana* de la familia Poaceae; *Cyperus adoratus*, *C. sphaerolepis* y *Eleocharis tenuis* de la familia Cyperaceae, y *Physalis sulphurea* de la familia Solanaceae (Estrada, et. al., 1997).

Ortega-Ramírez (1997) menciona una estratificación de las comunidades vegetales relacionada con la altitud, las cuales son 1) Bosque de coníferas localizados por encima de 2,400 m.s.n.m., 2) Bosques de enebro y encino entre los 2,400 y los 2,200 m.s.n.m. y 3) Matorral árido tropical dominado por pastizales en elevaciones menores a 2,200 m.s.n.m.

Estrada, et. al., 1997 estima la riqueza florística para la cuenca de Babícora en 489 especies y taxa intraespecíficos agrupados en 247 géneros y 69 familias, de las cuales, las 7 familias con mayor número de especies se muestran en la (Tabla. 1). Además se registra la presencia de una especie endémica para la zona, *Hydropectis estradii* B. L. Turner, de la familia Asteraceae. Entre los géneros con mayor número de especies se encuentran *Muhlenbergia* (15/ Poaceae), *Cyperus* (10/ Cyperaceae), *Euphorbia* (10/ Euphorbiaceae), *Quercus* (9/ Fagaceae), *Dalea* (9/ Fabaceae), *Desmodium* (8/ Fabaceae) y *Aristida* (8/ Poaceae), el número de especies por género y la familia a la que pertenecen se indica entre paréntesis (Estrada, et. al., 1997).

Tabla. 1. Se muestran las 7 familias más diversas del listado Florístico del lago de Babícora y sus alrededores. Datos de Estrada y cols. (1997)

| Familia | Géneros | Especies |
|------------------|---------|----------|
| Asteraceae | 48 | 80 |
| Poaceae | 28 | 79 |
| Fabaceae | 18 | 48 |
| Cyperaceae | 4 | 16 |
| Scrophulariaceae | 7 | 13 |
| Solanaceae | 4 | 13 |
| Euphorbiaceae | 4 | 13 |
| Total | 113 | 262 |

Finalmente cabe mencionar que aún no se cuenta con un listado completo de la flora del estado, sin embargo entre los trabajos de la flora de la laguna de Babícora y sus alrededores (1997) y la flora del centro de Chihuahua (2010) mencionados para ésta sección, existe una similitud del 99% en las familias, el 60% de géneros y 26.9% de las especies (Estrada y Villarreal, 2010), por lo que ambos trabajos serán considerados en la discusión.

3.5 Estudios paleoambientales previos

Varias secuencias sedimentarias del lago de Babícora han sido estudiadas por distintos autores que han reconstruido las condiciones paleoambientales del Pleistoceno y el Holoceno. Los indicadores biológicos, geoquímicos y sedimentológicos empleados en dichas reconstrucciones son muy diversos, sin embargo, a excepción de los trabajos de Metcalfe y cols. (2002), Chavéz-Lara y cols. (2012) y Roy y cols. (2012), los otros registros paleoambientales para el lago están basados en núcleos cortos de sedimento (<300 cm). En la siguiente tabla (Tabla. 2) se presentan las características y cambios más importantes que se han registrado para la cuenca a través de las reconstrucciones paleoambientales.

Tabla 2. Recopilación de las reconstrucciones realizadas para el lago de Babícora entre el Pleistoceno y el Holoceno. Las edades están dadas en ka (miles de años).

| Periodo | Reconstrucción y observaciones |
|------------|--|
| 80 y 58 ka | <p>Alta precipitación en la cuenca. Las lluvias de verano son la principal fuente de precipitación.</p> <p>Entre los 65 y 58 ka se reconstruye un cuerpo de agua profundo, de alta energía con entrada de material producto de la erosión. Entre los 71 y 53 ka la vegetación es la principal fuente de materia orgánica en los sedimentos depositados en el lago (Roy, <i>et al.</i>, 1012).</p> <p>Presencia de ostrácodos de agua dulce y ausencia de especies salinas entre los 72 y 63 ka. El lago presentó condiciones de baja salinidad (<100 ppm) y altas temperaturas (13-32 °C) (Chávez-Lara, <i>et al.</i>, 2012). Entre los 63 y 62 ka se reconstruyen variaciones en la salinidad (Roy, <i>et al.</i>, 2012).</p> <p>Bosques de <i>Quercus</i> y <i>Pinus</i> entre 65 y 58 ka (Metcalf, <i>et al.</i>, 2002).</p> |
| 58- 40 ka | <p>Alrededor de los 58 ka se presenta un cambio significativo en la precipitación, el nivel del lago y la vegetación alrededor de la cuenca. La precipitación en la cuenca decrece y el lago se vuelve más somero con periodos en los que aumenta la evaporación (Roy, <i>et al.</i>, 2012).</p> <p>Máximo nivel lacustre a los 57 ka (19 m más profunda a la actual). Hay un aumento de <i>Stephanodiscus niagarae</i> (Metcalf, <i>et al.</i>, 2002).</p> <p>Entre los 57 y 38 ka hay fluctuaciones en la abundancia de diatomeas (<i>Fragilaria construens</i> y <i>Cyclotella meneguiniana</i>) y la presencia de polen de <i>Chenopodiaceae</i>. Probables etapas de desecación y deflacción con fluctuaciones a periodos puntuales de un lago más profundo. El lago es altamente variable entre los 54.6 y 38 ka (Metcalf, <i>et al.</i>, 2002).</p> <p>Entre los 49 a los 29 ka se dan condiciones óptimas para el desarrollo de ostrácodos en un cuerpo de agua con temperaturas de entre 15 y 32 °C y salinidad entre 100 y 100,000 ppm (Chávez-Lara, <i>et al.</i>, 2012).</p> |

| Periodo | Reconstrucción y observaciones |
|--|---|
| 40-37 ka | <p>Entre los 40 y 37 ka la cuenca recibe una alta precipitación. El ensamble de diatomeas indica un nivel lacustre más alto entre los 42 y 37 ka (Roy, <i>et al.</i>, 2012). Entre los 38 y 29 ka la abundancia de <i>Stephanodiscus niagarae</i> indica condiciones húmedas con un lago profundo de baja salinidad.</p> <p>Se infiere la presencia de bosques de <i>Pinus</i> y <i>Quercus</i> en la zona (Metcalfé, <i>et al.</i>, 2002).</p> |
| 37-20 ka UGM (24-21 ka) H2 (24) | <p>Entre los 34 y 27 ka hay ambiente con altas fluctuaciones de humedad y dos eventos áridos a los 33 y 29.5 ka (Sánchez-Córdova, 2012).</p> <p>Entre los 33 y 20 ka la dominancia de los ostrácodos <i>Candona patzcuaro</i>, <i>Limnocythere plataforma</i> y <i>L. ceriotuberosa</i> y las mediciones de Mg/Ca y Sr/Ca sugirieron condiciones fluctuantes de salinidad y temperaturas bajas del agua (5-10 °C). Estas condiciones son atribuidas a la migración del sistema climático al sur y al aumento en la precipitación, lo que disminuyó la salinidad a los 20 ka cuando se presentaba un ambiente húmedo y frío (Palacios-Fest, <i>et al.</i>, 2002).</p> <p>Entre los 29 y los 10.5 ka el lago fue somero y hubo mayor turbación. Presencia de <i>Fragilaria construens</i> y <i>Stephanodiscus niagarae</i> (Metcalfé, <i>et al.</i>, 2002).</p> <p>La vegetación regional indica condiciones más frías y secas con una dominancia de <i>Pinus</i> y <i>Picea</i> (Metcalfé, <i>et al.</i>, 2002).</p> <p>Condiciones de baja descarga pluvial y condiciones hidrológicas relativamente estables con periodos de alta salinidad entre los 27 y 19 ka. Actividad eólica intensa a los 23 y entre los 22 y 20 ka (Roy <i>et al.</i>, 2012a).</p> <p>En el UGM y en el Younger-Dryas (12 ka) la precipitación fue baja. La ausencia de un aumento significativo en la salinidad posiblemente indica la presencia de un lago somero durante el UGM (Roy, <i>et al.</i>, 2012).</p> <p>Durante el H2 se presentó una alta humedad (Roy <i>et al.</i>, 2012a).</p> |
| 20-10 ka Younger-Dryas (12 ka)H1 (16.8) | <p>Entre los 20 y 13 ka el lago de Babícora fue un lago de gran estabilidad con condiciones de baja salinidad, donde las especies de ostrácodos se diversificaron. Las celdas polares de alta presión que se desplazaron al sur y al fortalecimiento de los vientos del oeste (Palacios-Fest <i>et al.</i> 2002).</p> <p>En el Younger-Dryas la precipitación fue baja.</p> <p>Durante el H1 se presentó una baja precipitación (Roy <i>et al.</i>, 2012a).</p> |

| | |
|---------------------------------------|--|
| | <p>Expansión del lago e incremento en la precipitación de verano, la erosión en la cuenca y el transporte de materia entre los 11 y 8 ka (Roy <i>et al.</i>, 2012a).</p> <p>Evidencias de dos periodos húmedos durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno temprano. El periodo húmedo del Pleistoceno tardío es seguido por un periodo de aridez gradual hacia los 6 ka (Urrutia, <i>et al.</i>, 1997; Palacios-Fest, <i>et al.</i>, 2002).</p> |
| Periodo | Reconstrucción y observaciones |
| Transición del Pleistoceno y Holoceno | <p>El lago fue permanente, y hay un cambio en la composición de diatomeas. La presencia de <i>Aulacoseira granulata</i> marca el establecimiento actual de las lluvias de verano (Metcalfé, <i>et al.</i>, 1997).</p> <p>Se registran fluctuaciones en el nivel del lago volviéndose un lago somero, la vegetación arbórea desaparece y las Poaceae regresan (Metcalfé, <i>et al.</i>, 1997, Ortega Ramírez <i>et al.</i>, 1998). Posibles condiciones de desecación y una mala preservación de polen para ~3 ka, que puede deberse a su baja producción y/o oxidación que apoya la idea de la prevalencia de condiciones secas (Metcalfé, <i>et al.</i>, 1997).</p> <p>Las marcas de desecación apoyan la idea de un periodo muy seco con un decremento en la precipitación que se extendió hasta los 1 ka (Urrutia, <i>et al.</i> 1997; Chávez-Lara, <i>et al.</i>, 2012).</p> |
| Holoceno | <p>El Holoceno Temprano es relativamente húmedo, seguido de una sequía gradual (Urrutia, <i>et al.</i>, 1997; Sánchez-Córdova, 2012). En el Holoceno tardío hubo un fuerte periodo de erosión seguido del establecimiento de las condiciones actuales de aridez (Ortega Ramírez, 1995). La cuenca ha sufrido periodos extensivos de acidificación alrededor de los ~41.5 ka y ~1 ka (Roy, <i>et al.</i>, 2012).</p> |

Capítulo 4: Método

El presente trabajo, se llevó a cabo con los sedimentos de un núcleo (976 cm) entre 933 y 353 cm de profundidad, el cual fue obtenido utilizando un equipo de perforación tipo *Eijelkamp* en la parte central del lago Babícora. Para recuperar el material sin alteración, se colocó en la parte del muestreador un tubo de policarbonato donde es recuperado el material sedimentario a medida que se encaja en la superficie seca del lago. Los tramos de 1 m fueron transportados al laboratorio para su procesamiento y análisis en abril del 2010. La descripción estratigráfica en Roy *et al.* (2012) define 5 unidades estratigráficas. Dicha división se elaboró con base a la observación de la textura y color de los sedimentos presentes y las estructuras sedimentarias encontradas, como la presencia de laminación y la sedimentación masiva.

4.1 Laboratorio: Procesamientos para la extracción de palinomorfos

Para el estudio se tomaron 30 muestras en intervalos de 20 cm entre las profundidades de 933 y 353 cm. Las muestras seleccionadas, con un volumen de 0.5 cm³ de sedimento, fueron procesadas para la extracción de palinomorfos que consiste en la aplicación de ácidos y bases. Esta técnica se caracteriza por la eliminación de la materia orgánica e inorgánica y la neutralización de la muestra sin dañar la pared de los distintos palinomorfos, siguiendo los pasos que se indican a continuación para cada una de las muestras:

- 1) En un tubo de ensaye se colocó un volumen de 0.6 cm³ de sedimento junto con dos pastillas de esporas marcadoras de *Lycopodium clavatum* del lote No. 938934 al que se le agregó HCl al 10% y se agitó hasta deshacer la muestra, después de lo cual, se dejó reposar durante 10 min. en Baño María. Posteriormente la muestra fue agitada una vez más y colocada en la centrífuga a 1,500 revoluciones durante 5 min.
- 2) Posteriormente se agregó agua destilada para re-suspender la muestra y meterla nuevamente a la centrifugadora bajo los parámetros indicados. Después la muestra fue decantada y se añadió nuevamente agua destilada y para ser centrifugada. Dicho paso se repitió hasta que la muestra alcanzó un pH de 7.

3) Los pasos anteriores tuvieron la finalidad de eliminar los carbonatos del sedimento, mientras que el siguiente elimina la materia orgánica del mismo, para lo cual se colocaron aproximadamente 3 ml. de KOH con los que se re-suspendió la muestra, seguido de 10 min. de reposo en Baño María, para después agregar agua destilada, re-suspender y meter el tubo a la centrifugadora bajo las condiciones ya citadas.

4) Se agregó nuevamente HCl 10% para eliminar los carbonatos restantes y se dejó reposar 10 min., continuando con lavado y su posterior centrifugación y decantación de la muestra por tres veces consecutivas.

5) Se colocaron 3.5 ml de HF 48% en la muestra durante 24 horas; posteriormente la muestra fue lavada.

6) Se añadió HCl 10N, se dejó por 10 min. en Baño María y se repitió el lavado hasta neutralizar la muestra. Posteriormente las muestras fueron teñidas con safranina y montadas en laminillas para su observación en el microscopio.

4.2 Gabinete

4.2.1 Conteos e identificación

Cuando las muestras estuvieron montadas fueron observadas en el microscopio óptico Olympus PH2 en los objetivos de 100x y 40x para realizar los conteos. Se contaron todos los tipos polínicos, microalgas y esporas marcadoras que se encontraran hasta llegar a por lo menos 300 granos de polen o a más de 1,000 esporas marcadoras cuando la presencia de polen era escasa. La separación entre los pinos y los pinos piñoneros se realizó considerando que estos últimos presentan una longitud $\leq 65 \mu\text{m}$.

Además, se realizó un conteo que evaluaba el grado de preservación de los granos de polen sacados (*Pinus*, *Picea* y *Abies*) que estaban incompletos o fragmentados, es decir, que presentaban únicamente un saco aéreo, un cuerpo o que habían perdido uno de sus sacos aéreos.

Para la identificación de los granos de polen y otros palinomorfos se consultaron distintas publicaciones (Erdtman, 1972; McAndrews, *et. al.*, 1973; Moore, *et. al.*, 1991; Palacios y Arreguín, 1990; Kapp, 1969; Kumazawa, 1936; Roubik y Moreno, 1991; Tseng- Chieng, 1972; Van Der Hammen, 1984), además de la consulta del portal de internet de la Universidad de Arizona <http://www.geo.arizona.edu/palynology/>.

4.2.2 Análisis de datos y elaboración de diagramas polínicos

Los conteos se sistematizaron y se analizaron con el programa Tilia 2.1 (Grimm, 1991-1993) y fueron calculados las sumas palinológicas, el porcentaje de los distintos palinomorfos, su concentración y la acumulación. Las zonas polínicas fueron definidas por medio del análisis de agrupamiento aglomerativo y jerárquico estratigráficamente restringido (CONISS) que es parte del software de Tilia.

Para la elaboración del diagrama polínico de porcentaje, se asignó una categoría a cada uno de los palinomorfos dependiendo de la forma de vida de cada taxón, dicha clasificación consistió en la división de los 40 palinomorfos en cinco conjuntos, el conjunto I para los árboles, el II para las hierbas; el III agrupa a las plantas hidrófitas, el IV a las microalgas y el V a Pteridophyta. Lo anterior permitió realizar la suma polínica (ΣP) y la obtención de los porcentajes. Se calculó la concentración (individuos/cm³) de los tres géneros de microalgas encontrados y la presencia de plantas hidrófitas fue calculada como el porcentaje de la suma total de la vegetación regional, es decir de árboles y hierbas. Este último conjunto se separó en dos categorías (enraizadas emergentes y enraizadas sumergidas) con base en la clasificación de plantas acuáticas de Bonilla-Barbosa y Novelo (1995).

Se calculó la tasa de acumulación de los taxa regionales y la concentración de los conteos de preservación de los granos de polen sacados (*Pinus*, *Picea* y *Abies*). Además, con los datos de la concentración total de los taxa regionales (árboles y hierbas) y la concentración total de los taxa de microalgas (*Pediastrum*, *Botryococcus* y *Gloeotrichia*) se obtuvo el cociente (concentración total de palinomorfos regionales/concentración total de microalgas). Los datos obtenidos fueron graficados

como un índice de aporte palinológico regional vs. local, el cual fue usado como un nuevo indicador de la fuente de procedencia de la materia orgánica y comparado con los datos del índice Carbón/Nitrógeno.

Las interpretaciones realizadas con este cociente consideraron que, cuando el valor del índice de aporte palinológico regional vs. local es <1 , el índice refleja una mayor contribución de la materia orgánica del sistema lacustre, con valores >1 pero <2 el índice no permite una diferenciación entre la procedencia de la materia orgánica depositada en los sedimentos; mientras que con valores >2 se indica la procedencia regional de la materia orgánica.

La información de los diagramas polínicos fue comparada con los datos de concentración del Carbón Orgánico Total (COT) y Dióxido de Titanio (TiO_2), y los índices de Carbono/Nitrógeno (C/N) y Zirconio/Óxido de Aluminio ($\text{Zr}/\text{Al}_2\text{O}_3$) publicados en Roy y cols. (2012). Las muestras para la obtención de los indicadores geoquímicos, fueron tomadas en intervalos de 10 cm, a excepción de las concentraciones de TiO_2 , que se tomaron cada centímetro.

Capítulo 5: Resultados

5.1 Sedimentos

Para este estudio fueron seleccionadas las muestras de la base del núcleo de 933 cm hasta los 353 cm. A continuación se describen las tres unidades estratigráficas del núcleo, considerando únicamente la sección muestreada para este trabajo (Fig. 5):

Unidad V (933-903 cm) ésta compuesta de limos arcillosos de color gris y café. La Unidad IV (903-560 cm) ésta caracterizada por limos verdes y limos arenosos cafés y está subdividida a su vez en dos subunidades. La primera de 903-760 cm, presenta 3 niveles de arenas limosas intercaladas por limos en las profundidades de 900-880 cm, 796-790 cm y 762-760 cm. La segunda subunidad de 760-560 cm registra limos arenosos cafés con una capa delgada de arenas finas entre los 682-680 cm.

La Unidad III (560-353 cm) está constituida por la intercalación de limos arenosos gris oscuro y arenas finas café oscuro que se encuentran entre los 560 y los 500 cm y entre los 460 y los 435 cm. Además tiene un nivel masivo de limos arcillosos café verdoso (385-353 cm) y presenta fisuras de desecación verticales de ~60 cm entre 450 y 385 cm.

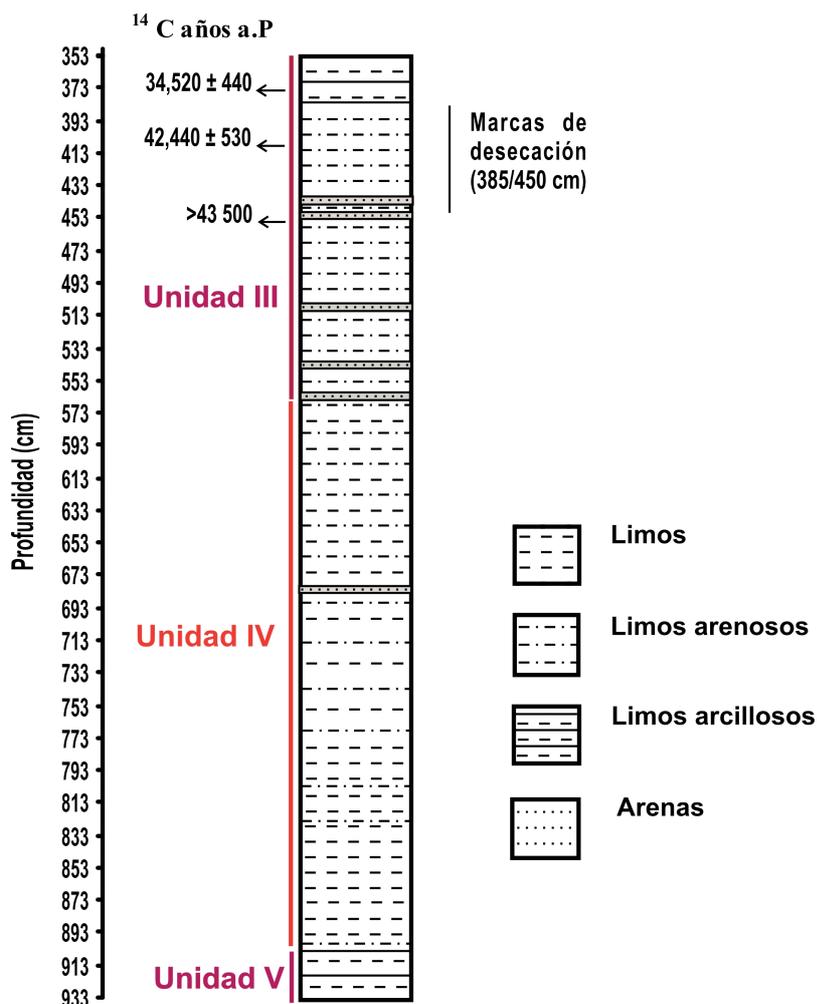


Figura 5. Sección estudiada de la secuencia sedimentaria del núcleo GF del lago de Babicora de 353 a 933 cm de profundidad. Se muestran las unidades litológicas y los niveles a los cuales fueron tomadas las muestras datadas con ^{14}C AMS de la sección estudiada (Modificado de Roy, *et. al.* 2012).

5.2 Fechamiento y modelo de edad

La sección del núcleo estudiada cuenta con tres fechas de AMS ^{14}C , a los 375 cm ($34,520 \pm 440$ años), 409 cm ($42,440 \pm 530$ años) y 457 cm ($>43,500$ años), respectivamente, esta última fecha rebasa el rango de detección alcanzado por el método de AMS ^{14}C , por lo que se considera una edad subestimada. Las tasas de acumulación obtenidas para la parte del núcleo estudiada son de 0.017 cm/año (273-375 cm) y de 0.005 cm/año (375 y 409 cm).

Las fechas y el modelo de edad mencionados en el presente trabajo fueron tomadas de Roy y cols. (2012), donde se reportan 9 fechas AMS ^{14}C obtenidas de la materia orgánica tomada en distintas profundidades del núcleo (Tabla 3). La calibración de

las edades se generó con el programa Cal 6.0 software y la curva IntCal 09 de Reimer *et. al.*, (2009).

Tabla 3. Las muestras fueron fechadas por medio de radiocarbono con acelerador de espectrometría de masas en Beta Analytic. El límite del método de datación con ^{14}C se registra en los sedimentos entre 409-457 cm. (Modificado de Roy, *et. al.*, 2012).

| Profundidad (cm) | Código de laboratorio | AMS ^{14}C años aP | Distribución de 2-Sigma | Años calibrados (cal ka aP) | ^{13}C (‰) |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 17 | Beta-277504 | 1 400 ± 40 | 1272-1378 | 1 325 | -18.0 |
| 37 | Beta-280151 | 3 610 ± 40 | 3830-4080 | 3955 | -18.6 |
| 47 | Beta-283602 | 8 330 ± 40 | 9152-9467 | 9 310 | -19.6 |
| 89 | Beta-269217 | 17 640 ± 90 | 20533-21392 | 20 963 | -23.2 |
| 183 | Beta-304053 | 18 460 ± 80 | 21576- 22339 | 21 958 | -23.0 |
| 273 | Beta-269218 | 28 960 ± 230 | 32941-34495 | 33 718 | -24.3 |
| 375 | Beta-277505 | 34 520 ± 440 | 38619-40725 | 39 672 | -23.6 |
| 409 | Beta-299070 | 42 440 ± 530 | 44816-46528 | 45 672 | -23.8 |
| 457 | Beta-280152 | >43 500 | - | - | -22.9 |

El modelo de edad fue estimado a partir de la gráfica generada de edades calibradas vs. profundidad. Las tasas de sedimentación obtenidas varían entre los 0.002 cm/año y 0.094 cm/año, este último valor se presenta en los sedimentos del intervalo entre los 183 a los 89 cm de profundidad. Las edades calculadas entre los 17 y los 409 cm de profundidad se estimaron con la interpolación de las tasa de sedimentación de dos datos subsecuentes. A la parte basal del núcleo (933 cm) se le asignó una edad de 79 ka con base en la extrapolación de una tasa de sedimentación equivalente a 0.017 cm/año, la cual fue calculada entre los 273 a los 375cm. No fue considerada la tasa de sedimentación entre los 375 y 409 cm, debido a la presencia de marcas de desecación

y un posible evento de hiato en la sedimentación (Fig. 6). Este modelo de edad tiene una incertidumbre de 53-1,053 años entre los puntos de anclaje.

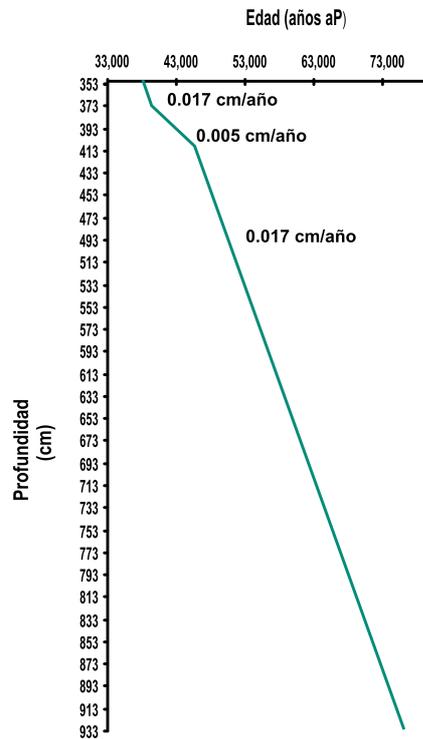


Figura 6. Modelo de edad para los sedimentos >409 cm del núcleo GF (Roy, *et. al.*, 2012). El modelo cronológico fue calculado con base en la extrapolación de la tasa de sedimentación entre los 273 y 375 cm.

5.3 Palinoflora

Con los datos del análisis palinológico de la secuencia estudiada se elaboraron diagramas polínicos de porcentaje, concentración y acumulación (Figs. 7, 8, 9, 10). Dichos diagramas son el resultado del conteo de 300 granos de polen o 1,000 esporas marcadoras de 26 muestras, ya que en las cuatro restante, 773, 833, 873 y 893 cm debido a la mala preservación y/o ausencia de granos de polen, solo se pudieron contabilizar 198, 192, 61 y 109 granos de polen, y 787, 610, 500 y 529 esporas marcadoras respectivamente.

Los 39 palinomorfos observados en los sedimentos del lago de Babícora, corresponden a 38 taxa diferentes (19 géneros y 17 familias), los cuales fueron divididos en palinomorfos regionales y locales. Los palinomorfos regionales incluyen el polen de árboles, hierbas y Pteridophytas, que corresponden al conjunto I, II y V,

respectivamente. Mientras que los palinomorfos locales incluyen a las microalgas y polen de plantas hidrófitas agrupadas en el conjunto III y V.

En el conjunto I de los árboles fueron identificados 9 géneros y 2 familias (Lámina I y II). En el conjunto II, de las hierbas, se encontraron 3 géneros, 13 familias y se agrupó al Tipo 1 Reticulado (Lámina II y III). En el conjunto V de las Pteridophytas, se agrupó a la única espora que se identificó como perteneciente a este grupo. Los palinomorfos locales incluyen 3 géneros de microalgas pertenecientes al conjunto IV (Lámina III y IV) y polen de 4 géneros y 2 familias de plantas hidrófitas agrupados en el conjunto III (Lámina III) (Tabla 4).

Tabla 4. Palinomorfos encontrados en la sección del núcleo analizada. Se muestran los cinco conjuntos por forma de vida en la que fueron divididos.

| Conjunto I: Árboles | Conjunto II: Hierbas | Conjunto III: Plantas hidrófilas | Conjunto IV: Microalgas | Conjunto V: Pteridophyta |
|------------------------|-------------------------|--|----------------------------|-----------------------------|
| <i>Abies</i> | <i>Alternanthera</i> | Cyperaceae | <i>Botryococcus</i> | Pteridophyta |
| <i>Alnus</i> | Amaranthaceae | (enraizada emergente) | <i>Gloeotrichia</i> | |
| Betulaceae | <i>Artemisia</i> | Liliaceae | <i>Pediastrum</i> | |
| Cupressaceae | Asteraceae | (enraizada emergente) | | |
| <i>Fraxinus</i> | Brassicaceae | | | |
| <i>Ilex</i> | Caryophyllaceae | <i>Myriophyllum</i> | | |
| <i>Juglans</i> | Convolvulaceae | (enraizada sumergida) | | |
| <i>Quercus</i> | Fabaceae | <i>Plantago</i> | | |
| <i>Picea</i> | Loranthaceae | (enraizada emergente) | | |
| <i>Pinus</i> | Poaceae | | | |
| <i>Pinus</i> de | Ranunculaceae | <i>Rorippa</i> | | |
| Tipo piñonero | Rosaceae | (enraizada emergente) | | |
| <i>Prosopis</i> | Rubiaceae | <i>Typha</i> | | |
| | Rutaceae | (enraizada emergente) | | |
| | <i>Thalictrum</i> | | | |
| | Tipo 1 Reticulado | | | |
| | Urticaceae | | | |

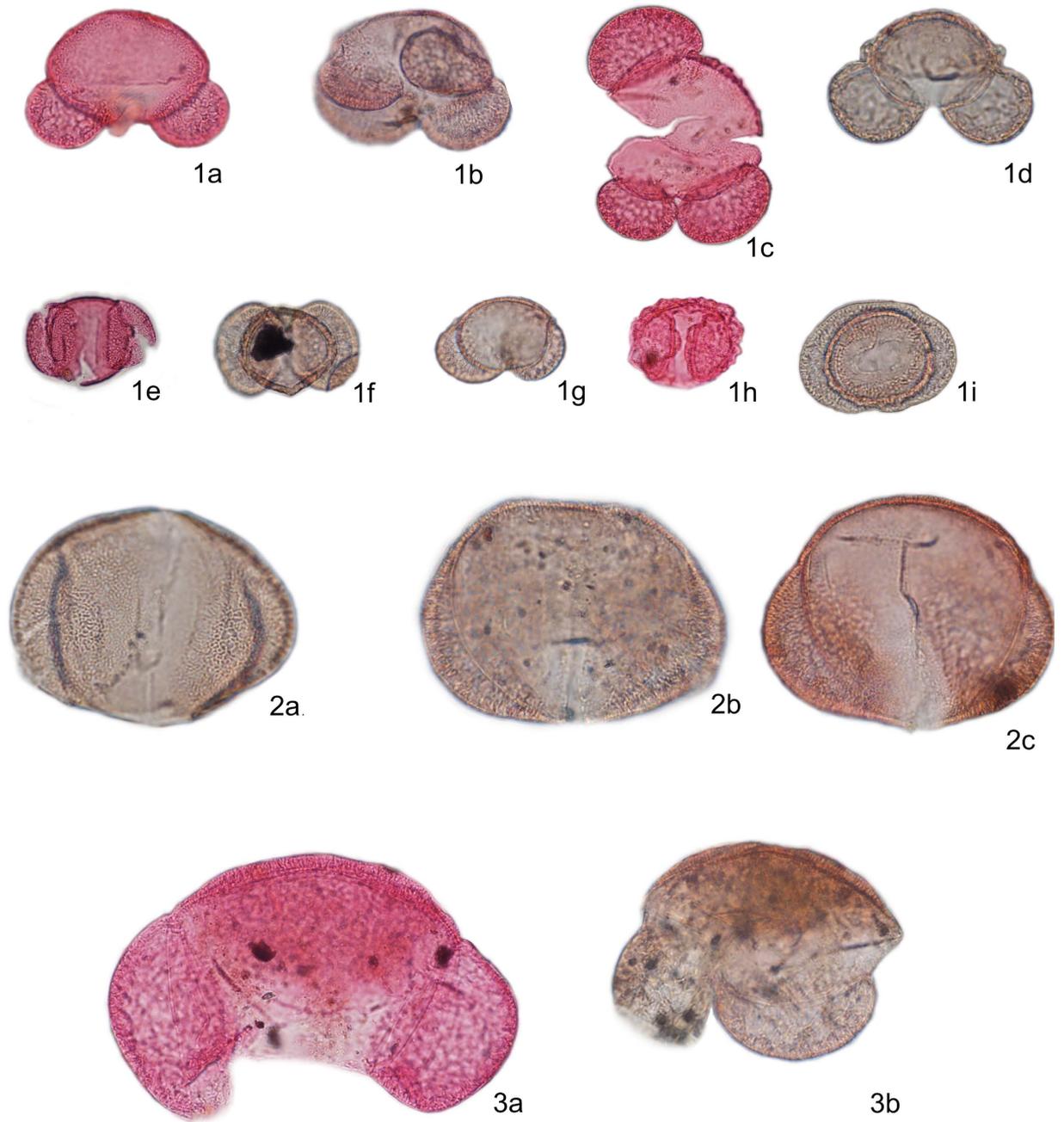


Lámina I. Árboles: *Pinus* spp. (1a-1d) (400x); Pinos piñoneros (1e-1i) (400x); *Picea* spp.(2a-2c) (400x); *Abies* spp.(3a-3b) (400x).

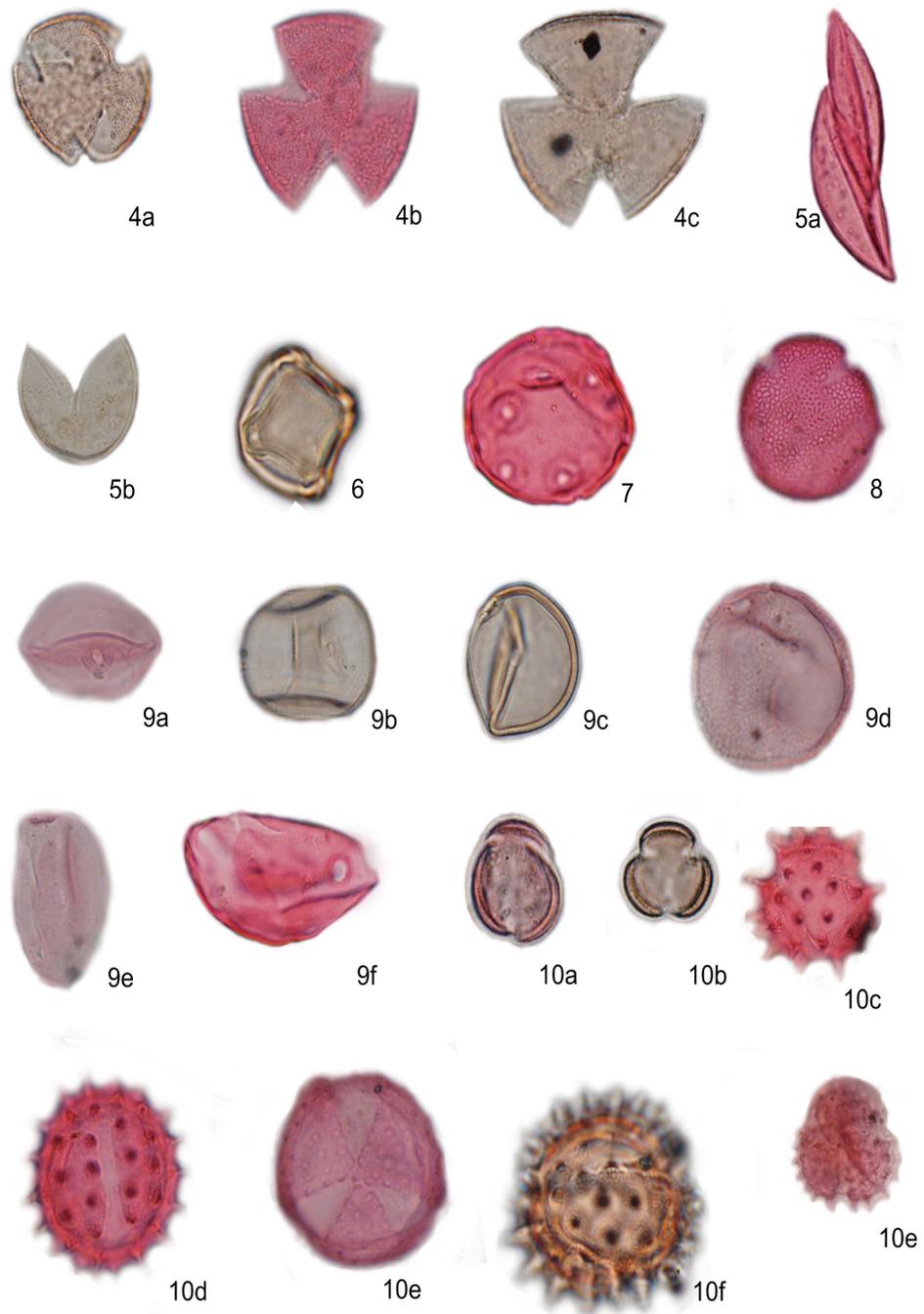


Lámina II. Árboles: *Quercus* spp.(4a-4c) (1000x); Cupressaceae (5a-5b) (1000x); *Alnus* spp.(6) (1000x); *Juglans* spp. (7) (1000x); *Fraxinus* spp. (8). Hierbas: Poaceae (9a-9f) (1000x); *Artemisia* spp.(10a-10b) (1000x), Asteraceae (10c-10e) (1000x).

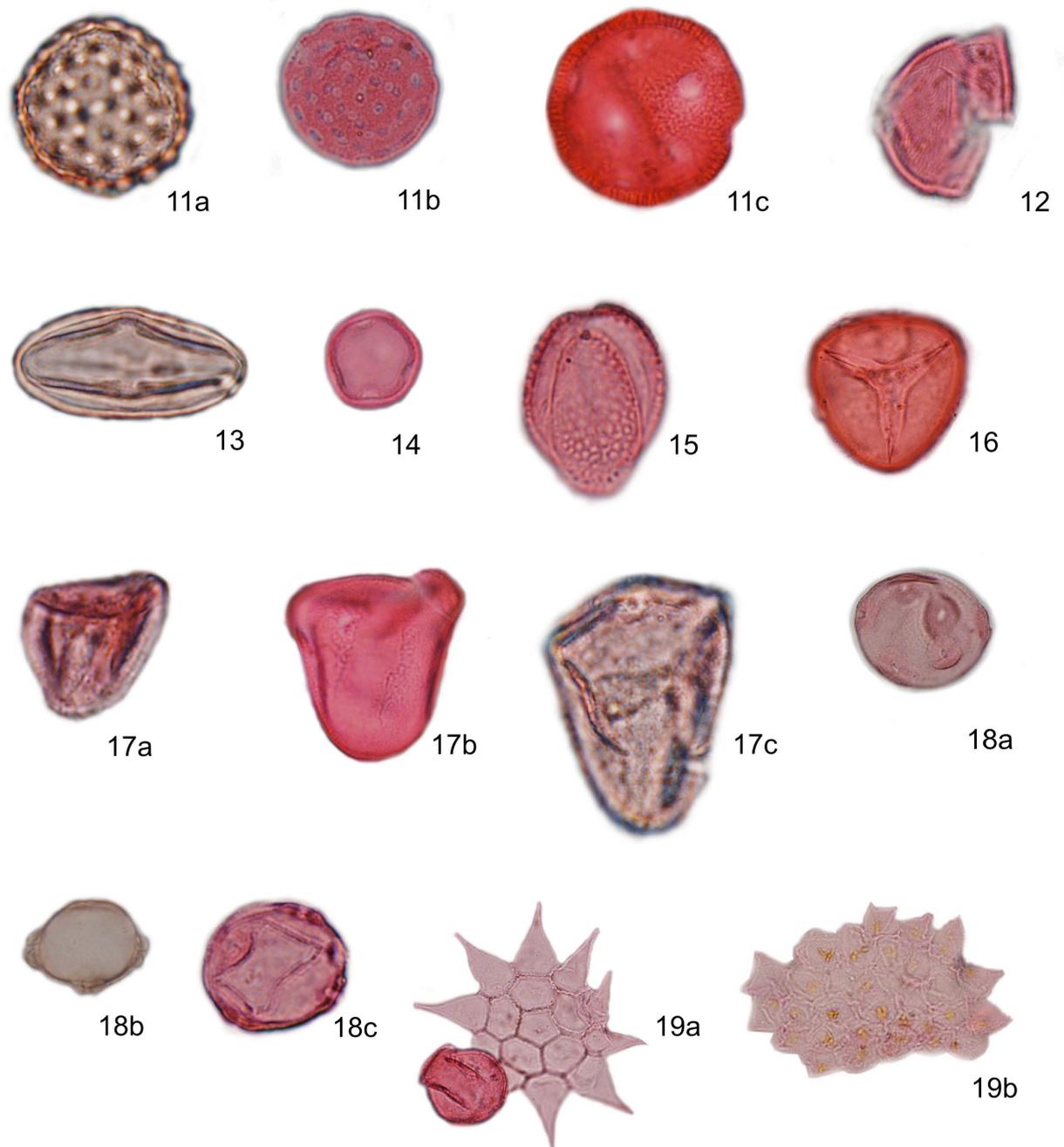


Lámina III. Hierbas: Amaranthaceae (11a-11c) (1000x); Rosaceae (12) (1000x); Fabaceae (13) (1000x); *Thalictrum* spp. (14) (1000x); Reticulado Tipo 1 (15) (1000x); Pteridophyta (16) (1000x). Plantas acuáticas: Cyperaceae (17a-17c) (1000x); *Myriophyllum* spp. (18a-18c) (1000x). Microalgas: *Pediastrum* spp. (19a-19b) (400x).

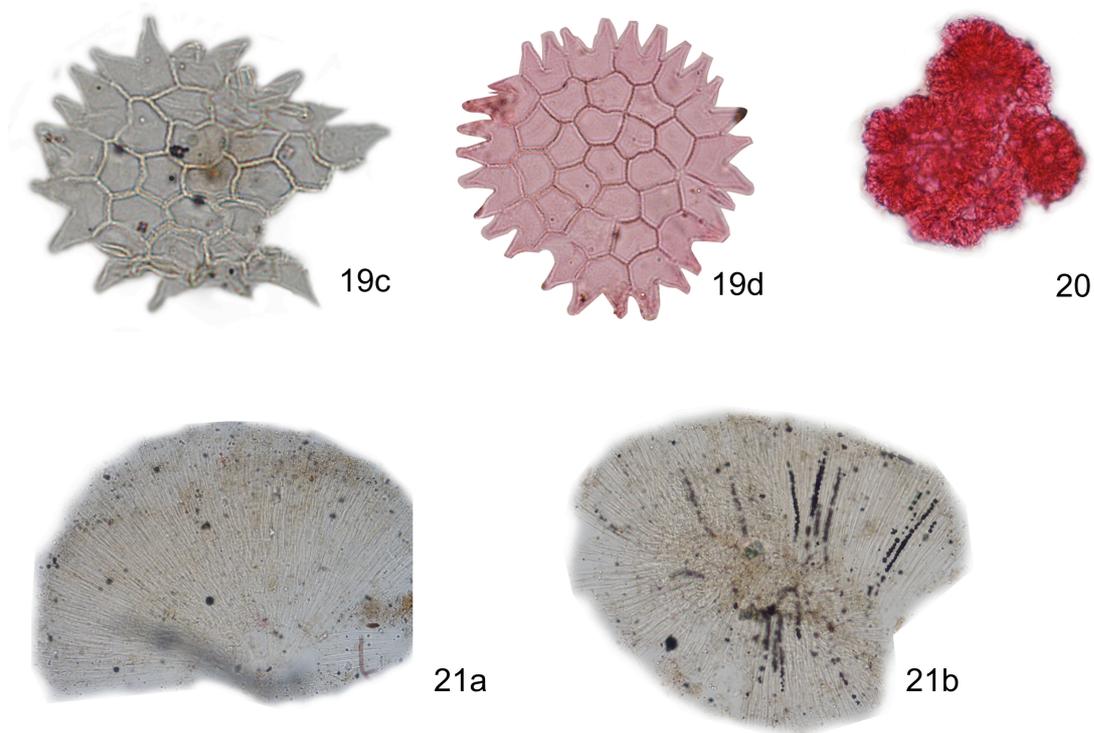


Lámina IV. Microalgas: *Pediastrum* spp. (19c-19d) (400x); *Botryococcus* spp. (20) (400x) *Gloeotrichia* spp. (21a) (200x), (21b) (400x).

5.4 Diagramas polínicos

5.4.1 Vegetación local y regional

Los datos de los tipos polínicos regionales se presentan en un diagrama de porcentaje donde se incluye la proporción de los palinomorfos por su forma de vida (hierbas vs. árboles) (Fig. 7). Mientras que los conteos de los elementos denominados locales que incluyen a microalgas y plantas hidrófitas son presentadas en concentración para el caso de las microalgas y como el porcentaje de la suma del polen regional (Fig. 8). Las zonas polínicas obtenidas con el análisis CONISS se indican en ambos diagramas, con el cuál se definieron cuatro zonas palinológicas que muestran cambios en las comunidades vegetales de la cuenca de Babícora.

Zona I, de 933 a 773 cm de profundidad (76.3 a los 66.9 ka). Esta zona se caracteriza por valores de *Pinus* que van del 70% a los 913 cm (75 ka) a 12% a los 773 cm (66.9 ka) y el porcentaje más alto de pino piñonero (30%) a los 773 cm (66.9 ka). Otros de los componentes de la vegetación son *Abies* con valores <10%, *Picea* ($\leq 20\%$), *Quercus* (<15%), *Ilex*, *Alnus* (<10%) y *Prosopis* (873 cm). El estrato arbóreo alcanza su valor más alto (90%) de la secuencia analizada alrededor de 75 ka. En el estrato herbáceo, Asteraceae tiene valores menores al 20%, al igual que en el resto de la secuencia. La presencia de *Artemisia* es menor al 10% al igual que en Poaceae y Amaranthaceae. *Thalictrum* y Convolvulaceae están presentes a los 933 cm, Fabaceae (853 cm) y Brassicaceae (773 cm).

Dentro del conjunto de taxa acuáticos destaca la presencia de *Pediastrum* con una concentración de ~1,000 a 5,000 individuos/cm³ y un valor máximo >10,000 en la base de la zona. *Gloetrichia* presenta un valor de 1,700 individuos/cm³ hace 68 ka (793 cm), aunque en la mayor parte del registro se encuentra ausente o con valores <400 individuos/cm³.

Botryococcus presenta un valor máximo de 14,000 individuos/cm³ a los 75 ka (913 cm) y tiene concentraciones de 150 y 450 individuos/cm³ para la mayor parte de la zona, a excepción de la muestra 933 y 793 cm con valores >1,500 individuos/cm³. El registro de plantas hidrófitas revela la presencia de Cyperaceae en todas las muestras, *Myriophyllum* se encuentra en gran parte de la zona y se registra la presencia de *Rorippa* (833 cm) y Liliaceae (773 cm).

Zona II abarca de 773 a 653 cm de profundidad (66.9 a los 59.9 ka). Durante el periodo que abarca esta zona los valores de *Pinus* y pino piñonero no presentan grandes variaciones. Mientras que Cupressaceae es escasa (5%) y sus porcentajes se reducen hasta desaparecer en la parte superior de la zona. *Quercus* tiene una tendencia a aumentar, tomando valores entre el 10 y 20%. En comparación con la zona previa, *Abies* aumenta y nuevas taxa arbóreas como *Juglans* (753 cm) y *Fraxinus* (753-733 cm) están presentes con bajos porcentajes, <10%, al igual que *Alnus* (753 cm). El estrato arbóreo fluctúa alrededor del 60% y alcanza un pico del 70% hace 63.4 ka.

El conjunto herbáceo es más diverso. Asteraceae tiene porcentajes cercanos al 10%, excepto para las muestras 773cm y 753 cm donde alcanza porcentajes ~15%; Amaranthaceae, Poaceae, *Artemisia* y el Tipo 1 reticulado son $\leq 10\%$.

En el conjunto local, *Pediastrum* tiene concentraciones de 1,000 a 2,000 individuos/cm³, un valor máximo (7,165 individuos/cm³) a los 62.2 ka y presenta una disminución hacia la parte final de la zona. *Botryococcus* presenta bajas concentraciones (150 a 1,000 individuos/cm³). *Gloeotrichia* presenta un valor de 500 individuos/cm³ a los 64.5 ka (733 cm). *Myriophyllum* se encuentra siempre presente, Cyperaceae está ausente entre los 61 y 59.9 ka (673 y 653 cm), *Plantago* y *Typha* se encuentran a los 64.5 ka (733 cm).

Zona III incluye de 653 a 493 cm de profundidad (59.9 y los 50.5 ka). Los porcentajes de *Pinus*, pinos piñoneros, *Quercus* y *Picea* no presentan grandes variaciones en sus valores. Sin embargo, en este periodo se presentan los últimos dos registros de Cupressaceae a los 633 cm (58.7 ka) y a los 573 cm (55.2 ka). *Abies* a diferencia de otras partes de la secuencia esta presente a lo largo de casi toda la zona con valores bajos (~ 5%), a excepción de la primera y la última muestra que limitan la zona, en donde no está presente. *Fraxinus* se encuentra en 593 cm, *Juglans* en 613 y 553 cm y *Alnus* en 613 cm y del 553-533 cm con porcentajes de entre el ~8% para *Fraxinus* y $\leq 5\%$ para los dos restantes. El estrato arbóreo fluctúa entre el 60%.

Dentro del conjunto herbáceo tenemos Amaranthaceae con un porcentaje $\leq 5\%$ y $> 5\%$ en la muestra 533 cm, Asteraceae ($\leq 10\%$) *Artemisia* que presenta valores $\leq 10\%$; Poaceae con porcentajes $> 10\%$ y de 20% hace 58.7 ka, que equivale al mayor porcentaje del taxón en la secuencia. *Thalictrum*, Colvolvulaceae (633 y 553 cm), Rosaceae (553 y 513 cm), Brassicaceae, Ranunculaceae (553 cm), *Alternanthera* (533 cm) y el Tipo 1 reticulado se encuentran con porcentajes $\leq 10\%$.

Gloeotrichia alcanza una concentración máxima (22,172 individuos/cm³) al inicio de la zona (633 cm). *Pediastrum* presenta fluctuaciones en sus concentraciones (241 individuos/cm³) a los 58.7 ka (633 cm), y de 16,000 individuos/cm³ hace 55.2 ka y 10,000 individuos/cm² a los 50.5 ka. *Botryococcus* tiene concentraciones de 13,000 y 10,000 individuos/cm³ a los 57.7 y 55.2 ka, respectivamente, y valores menores que

nos puede indicar un periodo de alta variabilidad para el género. *Cyperaceae* y *Myriophyllum* están presentes en gran parte de este periodo y se registra la presencia de *Liliaceae* y de *Typha* en la cima de la zona.

Zona IV, de 493 a 353 cm de profundidad y de los 50.5 a 38.4 ka. Esta zona se caracteriza por el incremento en los porcentajes de *Pinus* (40-60%), la tendencia a valores menores de pinos piñoneros (<10%), la ausencia de *Cupressaceae* y valores intermedios de *Quercus* (20 a 30%). La cobertura arbórea es alta (65 y 85%) con una reducción del conjunto herbáceo. *Abies* se presenta con porcentajes <10%; *Picea* mantiene valores entre 10% y 15% al final de la secuencia; *Alnus*, *Juglans* y *Betulaceae* también forman parte de este estrato con un porcentaje <10%.

Se alcanzan los porcentajes más bajo de *Amaranthaceae* ($\leq 5\%$) de la secuencia sedimentaria así como de *Asteraceae* y *Poaceae* ($\leq 10\%$). *Thalictrum* desaparece del registro hace 49.4 ka y se observa la presencia <10% de *Fabaceae*, *Caryophyllaceae*, *Loranthaceae*, *Urticaceae*, *Rubiaceae*, *Brassicaceae* y el Tipo I reticulado.

En cuanto al conjunto local, *Gloeotrichia* tiene valores menores a los 1,000 individuos/cm³ y se encuentra ausente en algunas de las muestras, a excepción de un pico de 4,400 individuos/cm³ a los 393 cm. *Pediastrum* presenta altas concentraciones (23,100 individuos/cm³) a los 49.4 ka y una disminución (500 individuos/cm³) entre 48.2 y s 47 ka, y al final de la secuencia. Entre los 45.9 y los 39.5 ka tiene una concentración de 4,000 individuos/cm³. *Botryococcus* tiene concentraciones entre 5,000 y 12,000 individuos/cm³. Solo hay presencia de *Cyperaceae* y *Myriophyllum*, la cual desaparecen después de los 42.8 ka.

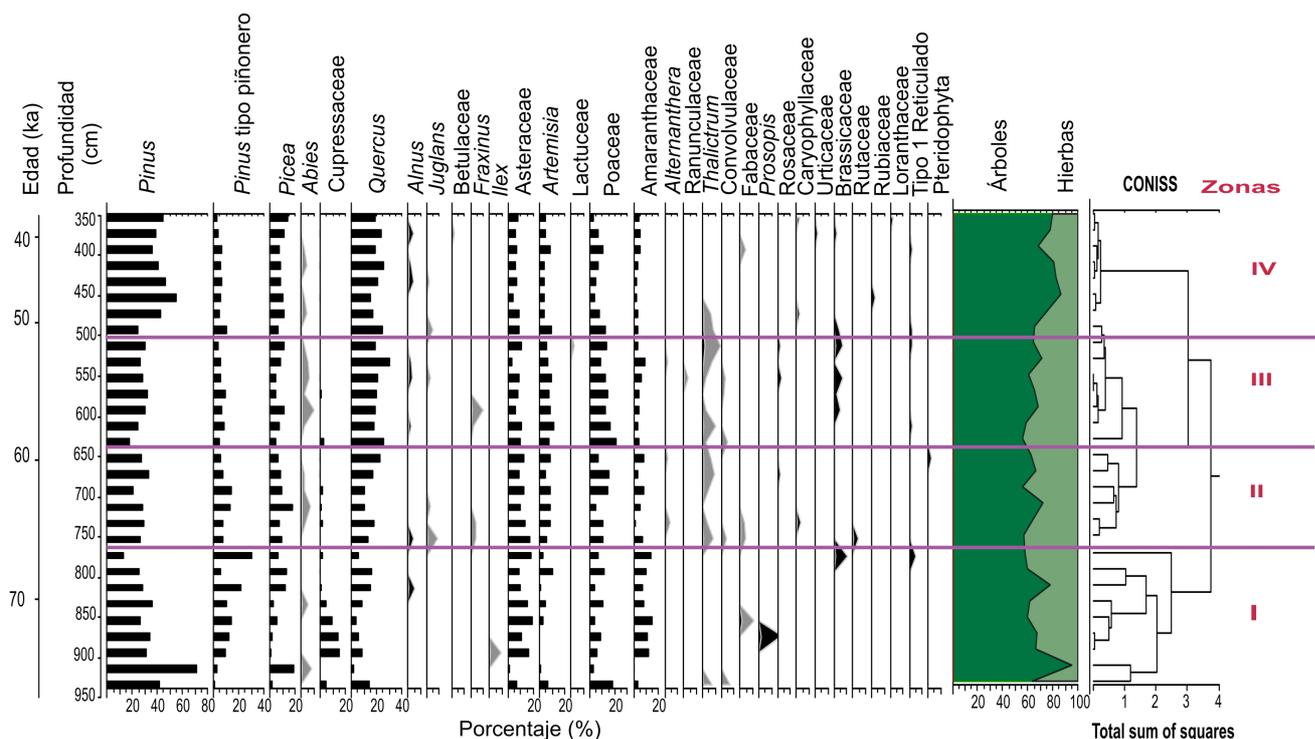


Figura 7. Diagrama polínico de porcentaje de los taxa de la vegetación regional. Se muestra el porcentaje de cada taxa, la proporción de los palinomorfos por su forma de vida (hierbas vs. árboles) y las cuatro zonas polínicas basadas en el análisis CONISS.

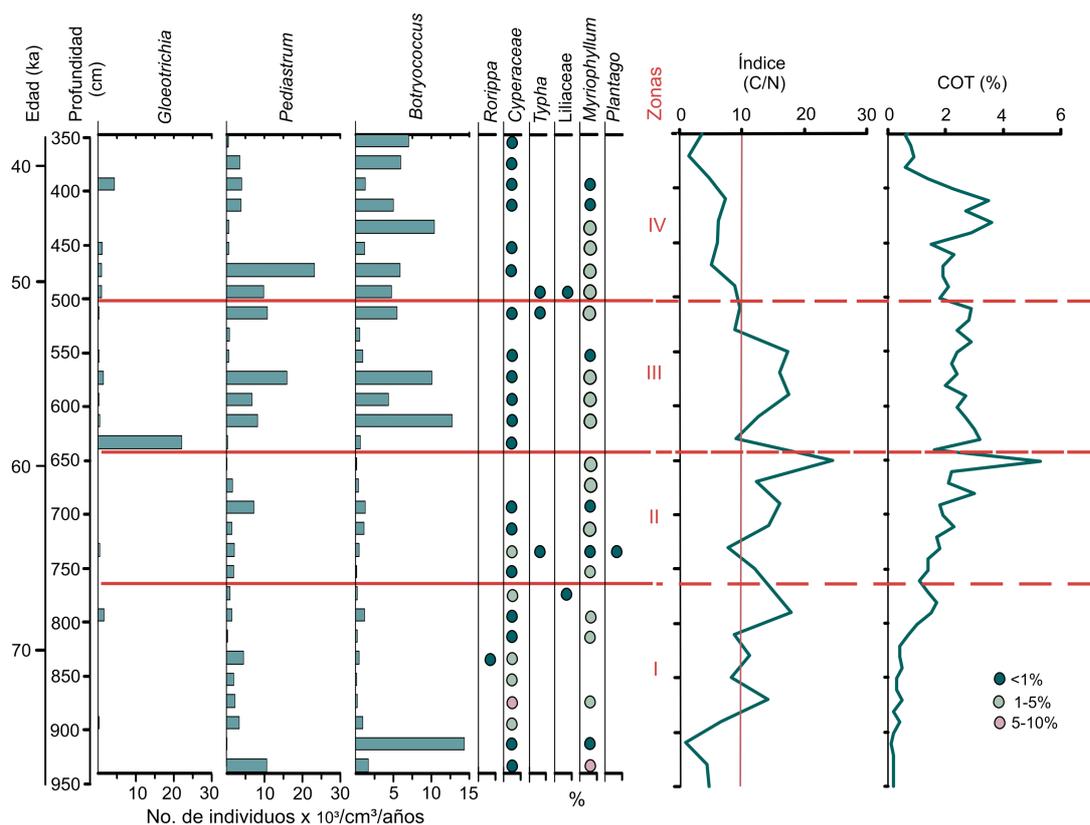


Figura 8. Diagrama palinológico local. El registro de microalgas se presenta en concentración y el polen de plantas acuáticas se muestra como puntos de distintos colores y tamaños dependiendo de su porcentaje. Las zonas polínicas establecidas se señalan. Se muestran los datos de C/N y COT en porcentaje.

5.4.2 Diagrama de Acumulación

En el diagrama polínico de acumulación se observa que, desde la base de la secuencia y hasta 64.5 ka que las tasas de acumulación polínica varían de 4,343 a 12,314 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) (Fig.9). Posteriormente, entre 63.4 y 50.5 ka las tasas oscilan de 10,371 a 20,418 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$), con un valor máximo de 25,657 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) hace 62.2 ka y mínimo 8,617 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) hace 54 ka. Entre los 49.4 y los 42.8 ka las tasas de acumulación fluctúa de 23,313 a 33,573 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) con un máximo de 39,148 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) a los 47 ka. En la parte superior de la secuencia, la acumulación polínica total aumenta, con valores de 79,472 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) hace 39.5 ka y 60,760 ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{año}$) a los 38.4 ka.

En el diagrama se pueden observar eventos donde hay un aumento simultáneo en las tasas de acumulación de distintos taxa y estos se sintetizan en la Tabla 5.

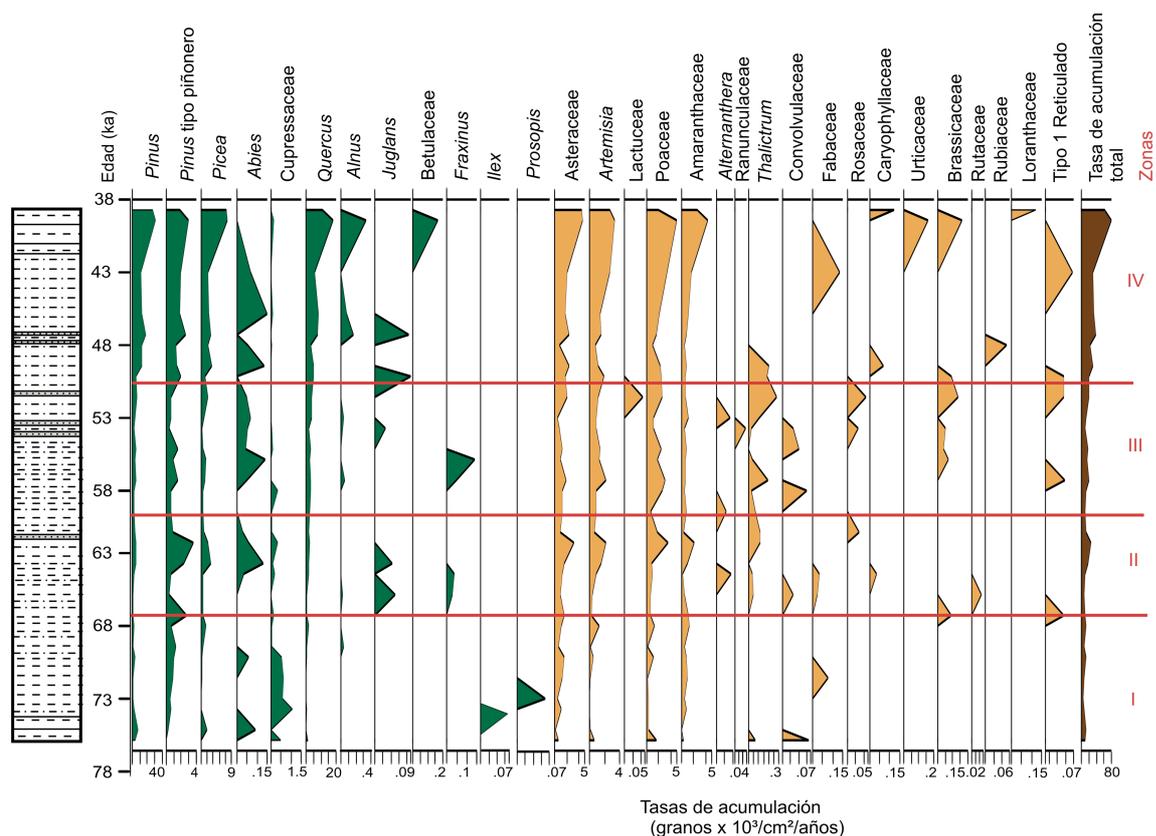


Fig. 9. Diagrama de acumulación polínica regional. Los datos se presentan (granos x 10³/cm²/año). A la izquierda del diagrama se muestra la columna estratigráfica de la sección del núcleo estudiada y se indican las zonas polínicas.

Tabla. 5. Eventos de aumento en la acumulación más importantes registrados en la (Fig. 9). Indicando el intervalo de tiempo en el que se dieron y los taxa involucrados. Entre paréntesis se indica la tasa de acumulación para cada uno de ellos.

| Edad (ka) | Tasa de acumulación en (g/cm ² /año) de los taxa presentes en los eventos de aumento. |
|-------------------|--|
| 76.3 | Asteraceae (627), Artemisia (595), Poaceae (~1,690), Thalictrum (66) y Convolvulaceae (66). |
| 75 | Pinus (7,962), Picea (2,000) y Abies (93) |
| 73.9 | Cupressaceae (1077) e Ilex (67) tienen su aumento más importante a lo largo de la secuencia. |
| Entre 71.5 y 70.4 | Asteraceae (627), Artemisia (595), Poaceae (1,686), Amaranthaceae (297), Thalictrum (66) y Convolvulaceae (66). |
| 68 | Hay un pico pequeño de Asteraeae (~1,000), Artemisia (~1,200), Poaceae (~1,300) y Amaranthaceae (~1,200). |
| Entre 63.4-62.2 | Pinus (2,706-5,316) entre 64.5 y 62.2 ka. Pinos piñoneros (2,309 y 1,641) Picea (3,180 y 2,311), Abies (131 y 58), Juglans (63) y Fraxinus, este último presente entre 65.7 y 64.5 ka. Asteraceae (1,22), Artemisia (1,348), Poaceae (2,401) y Thalictrum. |

| Edad (ka) | Tasa de acumulación en (g/cm ² /año) de los taxa presentes en los eventos de aumento. |
|-------------------|---|
| Desde los 64.5 | <i>Quercus</i> comienza a ser más abundante. Tiene valores altos de los 47 a los 42.8 ka, y valores muy altos al final de la secuencia (hace 39.5 ka). Se observa una tendencia al aumento con fluctuaciones en el registro. |
| Desde los 58.7 | Cupressaceae deja de ser un elemento constante en las comunidades vegetales y presenta únicamente picos esporádicos con bajas tasa de acumulación, entre los que se encuentran los picos de hace 48.3 y 45.9 ka. |
| Entre 57.5 y 55.2 | <i>Pinus</i> (4,647-5,434), pinos piñoneros (882-1,559); <i>Picea</i> (~1,500) y <i>Fraxinus</i> (49-141) está presente entre los 57.5 y los 56.4 ka. Se observa la presencia de <i>Alnus</i> y Cupressaceae con bajas tasas de acumulación. |
| Entre 57.5 y 42.8 | Aunque <i>Abies</i> no es muy abundante, su presencia es más conspicua. Sus picos importantes de acumulación son, hace 56.4, 49.4 y 45.9 ka con una tasa de acumulación de ~145. |
| 55.2 | Hay un pico pequeño de Asteraceae (~1,200), <i>Artemisia</i> (~1,300), Poaceae (2,400) y Amaranthaceae (800). |
| Desde los 50.5 | Pinos piñoneros tiene valores más constantes y altos (~1,836) |
| Entre 49.2 y 42.8 | <i>Pinus</i> (~13,512), <i>Picea</i> (~2,789) y de <i>Alnus</i> hace 47 y 45.9 ka, Además hay un pico de <i>Juglans</i> hace 47 ka. |
| 39.5 y 38.4 | <i>Pinus</i> (26,882-30,630), <i>Picea</i> (~8,500), <i>Quercus</i> (18,378-11,170) Asteraceae (~4,500), <i>Artemisia</i> (~2,700 y 3,331) y Amaranthaceae (~4,305 y 2,578). A los 39.5 ka hay un pico de <i>Alnus</i> (331), Betulaceae (166), pinos piñoneros (2,980) y Poaceae (5,000). |

5.5 Comparación del registro con la flora actual

El estado de Chihuahua alberga diferentes comunidades vegetales. En la cuenca de Babícora y sus alrededores se reporta la presencia de un bosque de *Pinus-Quercus* en los picos montañosos que rodean el lago, y de Pastizal Halófito para la base de la misma (Estrada, *et al.*, 1997). Ortega-Ramírez (1995) menciona una estratificación de las comunidades vegetales relacionada con la altura y divide la flora en tres comunidades. Bosque de coníferas por encima de 2,400 m.s.n.m., bosques de enebro y encino entre los 2,400 y 2,200 m.s.n.m y Matorral árido tropical dominado por pastizales en elevaciones menores a 2 200 m.s.n.m, como se mencionó en el capítulo del sitio de estudio.

Se realizó una tabla comparativa de los taxa presentes en el núcleo y los principales taxa (familias con el mayor número de géneros) reportados en la actualidad para el centro de Chihuahua y la cuenca de Babícora. Estos dos sitios tienen una similitud del 99% de las familias y del 60% de los géneros presentes (Estrada y Villarreal, 2010) (Tabla 6).

Tabla. 6. Se indica la presencia de los taxa con mayor número de géneros reportados en distintos estudios de la flora actual de la cuenca de Babícora y del centro de Chihuahua (Estrada, *et al.*, 1997; Metcalfe, *et al.*, 2006; Estrada y Villarreal, 2010) con un *. La presencia de la familia en la vegetación del Pleistoceno medio se indica con un •.

| Familia | Vegetación actual | Vegetación en el Pleistoceno medio |
|-----------------|-------------------|------------------------------------|
| Amaranthaceae | * | • |
| Aquifoliaceae | | • |
| Asteraceae | * | • |
| Brassicaceae | * | • |
| Betulaceae | | • |
| Cactaceae | * | |
| Caryophyllaceae | * | • |
| Convolvulaceae | * | • |
| Cupressaceae | * | • |
| Cyperaceae | * | • |
| Euphorbiaceae | * | |
| Fabaceae | * | • |
| Fagaceae | * | • |
| Juglandaceae | * | • |

| Familia | Vegetación actual | Vegetación en el Pleistoceno medio |
|------------------|--------------------------|---|
| Loranthaceae | | • |
| Malvaceae | * | |
| Nyctaginaceae | * | |
| Oleaceae | * | • |
| Plantaginaceae | * | • |
| Poaceae | * | • |
| Pinaceae | * | • |
| Ranunculaceae | * | • |
| Rubiaceae | * | • |
| Rutaceae | * | • |
| Rosaceae | * | • |
| Salicaceae | * | |
| Solanaceae | * | |
| Scrophulariaceae | * | |
| Tamaricaceae | * | |
| Ulmaceae | * | |
| Verbenaceae | * | |
| Zygophyllaceae | * | |

5.6 Reconstrucción del paleoambiente

5.6.1 Concentración de los granos sacados rotos

Durante el conteo fue evidente que había una gran cantidad de granos de coníferas rotos (*Pinus*, *Picea* y *Abies*) por lo que se procedió a realizar un conteo de los mismos. Los conteos de preservación consideraron a los granos de polen sacados que estaban incompletos o fragmentados, es decir, que presentaban únicamente un saco aéreo, un cuerpo o que habían perdido uno de sus sacos aéreos. Dichos conteos revelan una preservación variable en los granos de polen sacados (Fig. 10).

En la parte basal del núcleo (76.3-75 ka) hay una concentración de $\sim 6,620$ g/cm³. Entre 73.9 y 64.5 ka las muestras fluctúan entre los $\sim 1,900$ y $3,782$ g/cm³, a excepción de la muestra que corresponde a la edad de 72.7 ka, en la cual no se contó ningún grano en mal estado, y hace 69.2 ka cuando hay 757 g/cm³.

Hace 63.4 ka los granos rotos aumentan a $6,441$ g/cm³, mientras que entre 62.2 y 58.7 ka los conteos indican fluctuaciones entre $\sim 2,200$ y $5,600$ g/cm³. Si bien en la parte basal del núcleo hay una preservación variada, a partir de 57.5 ka esta variación se incrementa como lo reflejan los grandes cambios entre una muestra y la siguiente. Entre 57.5 y 48.2 ka los granos rotos van de $7,644$ a $9,541$ g/cm³; para los 54 ka, la concentración es de $3,992$ g/cm³; y para los 52.9, 49.4, 48.2 y 42.8 ka se registran altos valores ($\sim 14,750$ g/cm³). Para los 47 ka se observa la concentración más alta de granos de polen sacados rotos en toda la secuencia con un valor de $47,462$ p/cm³; hace 45.9 la concentración es de $26,698$ g/cm³ y hace 42.8 ka la concentración es de $16,686$ p/cm²; mientras que entre los 39.5 y 38.4 ka hay un nuevo aumento de los granos rotos, que va con valores de $47,000$ y $41,655$ g/cm³.

5.6.2 Índice de aporte palinológico región vs. local

El índice de aporte palinológico regional vs. local, construido a partir del cociente de la concentración de los palinomorfos regionales entre la concentración de microalgas, tiene una media (μ) de 4.6 y una desviación estándar (σ) de 5.5. El valor mínimo es de 0.52 en la muestra 633 (58.7 ka) y el valor máximo es de 28.2 en la muestra 653 cm

(59.9 ka) (Fig. 10). Este indicador no presentó una correlación lineal con el índice C/N, debido a que el valor de $R^2=0.1$.

El índice de aporte palinológico mostró que la fuente principal de materia orgánica en los sedimentos es terrestre o procedente de los palinomorfos regionales a lo largo de la secuencia. Los periodos de mayor influencia de la entrada de materia orgánica alóctona en la cuenca se dieron entre los 853 y 653 cm (71.5-59.9), 553 y 533 cm (54-52.9), y 453 y 353 cm (48.2-38.4 ka).

Entre los 933 y 913 cm (73.8-72.8 ka), 633 y 613 cm (57.6-56.5 ka) y 573 cm (54.4 ka) el índice de aporte palinológico indica que hay una mayor depositación de materia orgánica del sistema lacustre.

En las muestras 893 cm (73.8 ka), 873 cm (70.6 ka), 593 cm (55.5 ka), 513 cm (51.1 ka) y 493 cm (50.1 ka) la relación entre la fuente de procedencia de la materia orgánica (regional vs. lacustre) depositada en los sedimentos no es clara, es decir el índice del aporte palinológico regional vs. local tiene valores entre el uno y dos, que no permiten identificar un mayor aporte de materia orgánica de alguno de los dos sistemas.

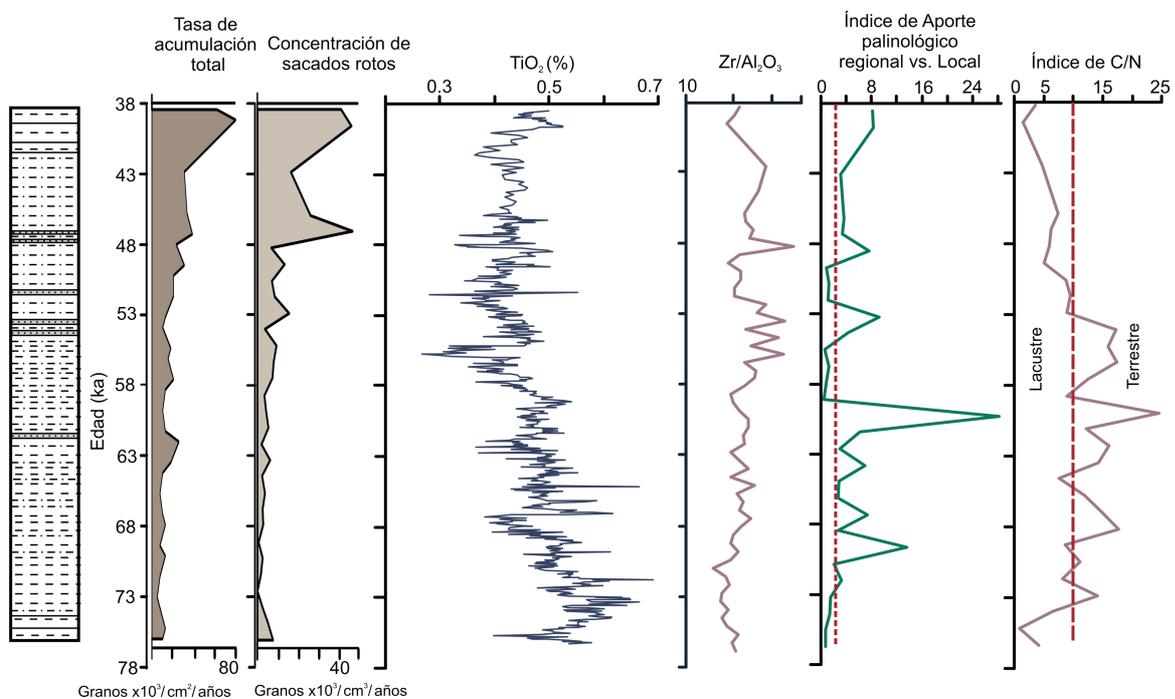


Fig 10. Diagrama de la acumulación total de palinomorfos, la concentración de granos de polen sacados rotos e indicadores geoquímicos. Se muestra la columna

estratigráfica de la secuencia estudiada, la tasa de acumulación total de los granos de polen regionales, la concentración de los granos sacados rotos, los valores de TiO_2 , el índice $\text{Zr}/\text{Al}_3\text{O}_2$, el índice de aporte de palinomorfos regional vs. local y el índice de C/N. Los datos geoquímicos fueron obtenidos de Roy y cols. (2012).

Capítulo 6: Discusión

6.1 Interpreteación de los indicadores

6.1.1 Indicadores de la flora regional

a) Cupressaceae

Estrada y cols. (1997) reportan a *Cupressus arizonica* como parte de la flora actual de la cuenca de Babícora. *Cupressus arizonica* se encuentra en algunos de los estados del sur de los Estados Unidos donde los estudios revelan que su crecimiento es favorecido por suelos permeables, profundos y húmedos. Suelen preferir los micro sitios húmedos (Parker, 1980).

Bradbury (1997) indica una relación entre polen de Cupressaceae y las diatomeas planctónicas, proponiendo que su aumento ésta relacionado con un aumento en la humedad. *Juniperus scopulorum* es una especie métrica que crece preferentemente en suelos húmedos y que durante el verano requiere de un bajo estrés hídrico y menores temperaturas. Su registro fue interpretado como una prueba del fortalecimiento de las lluvias de invierno y una mayor precipitación durante los periodos fríos del Último Glacial por Bradbury (1997). Ésta y otras especies que se encuentran en el norte de México y suroeste de los Estados Unidos y que requieren un bajo estrés hídrico durante el verano pueden apoyar la hipótesis planteada por Roy y cols. (2012) de la dominancia de las lluvias de verano en la Cuenca de Babícora.

b) *Picea* y *Abies*

En la actualidad ambos géneros se encuentran comúnmente en las quebradas de las cumbres de la Sierra Madre Occidental, donde predominan condiciones frías y húmedas, protegidos de los vientos secos y asociados usualmente con *Pinus*, escasos *Cupressus* y *Quercus* (Gordon, 1968), coincidiendo de manera general con los bajos porcentajes de Cupressaceae y *Quercus* encontrados en este estudio entre los 76.3 y 66.9 ka.

En algunos de los sitios donde se encuentran las poblaciones de *Picea* en México se han reportado fuertes lluvias de verano, primaveras muy secas e inviernos ligeros

(Gordon, 1968), apoyando la idea de lluvias de verano para el noroeste de México durante el Pleistoceno medio.

En México los bosques de *Abies* se encuentran en climas sin estaciones frías y cálidas bien diferenciadas, con una estación seca bien diferenciada, temperaturas medias anuales que van de los 7 a 15 °C o hasta 20 °C. Nevadas moderadas, escasas o ausentes, insolación intensa, largo del día poco variable a lo largo del año (Rzedowski, 1978).

c) Pinos piñoneros

Los pinos piñoneros se encuentran en ecosistemas relativamente variables con climas de tipo semihúmedo, de transición o semiárido (Passini, 1982). En los picos montañosos del estado de Coahuila *Pinus cembroides* y *P. remota* en climas templados semisecos (Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005).

d) *Quercus*

Quercus puede encontrarse en bosques de encino, en matorrales submontanos, bosques de pinos-encinos (Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005)

e) *Alnus*, *Juglans* y *Fraxinus*

Alnus, *Juglans* y *Fraxinus* crecen preferentemente en sitios húmedos y pueden encontrarse dentro de las mismas comunidades de plantas en el norte de México y el suroeste de los Estados Unidos (Torres, *et al.*, 2012; USA Forest Service, 2014). *Pinus* y *Quercus* son algunos de los grupos asociados a estos tres géneros en diferentes comunidades vegetales (Encina-Domínguez, *et. al.*, 2008; USA Forest Service, 2014). Los bosques de *Alnus* en México usualmente se desarrollan a lo largo de arroyos, pequeños ríos o constituyendo comunidades sucesionales de bosques de pino, *Pinus-Quercus* y bosques mesófilos de montaña (Rzedowski, 1978). *Alnus* y *Fraxinus* pueden llegar a formar bosques caducifolios, aunque la temporada de ausencia de hojas es prevé (Rzedowski, 1978).

f) *Thalictrum*

En México existen 30 especies del género, distribuidas en gran parte del territorio mexicano en bosques mesófilos de montaña, y de *Abies*, *Pinus* spp. y *Quercus* spp. (Telléz, 2006). Especies como *T. hernandezzii* y *T. gibbosum* se encuentra en matorrales secundarios y bosques mesófilos, la primera entre los 1,500-2,800 y la segunda de 2,450-2,800 m.s.n.m. *T. pachucense* se distribuye en bosques de *Abies* y claros adyacentes entre los 2,800 y 3,000 m.s.n.m. *T. pubigerum* se encuentra en laderas húmedas y boscosas 2,500-3,000 m.s.n.m. *T. strigillosum* se encuentra en gran parte de la república mexicana en matorrales, zacatonales y en bosques de encino y pino entre los 2,350-3,200 m.s.n.m (Telléz, 2006).

g) *Artemisia*

Artemisia está asociada con los bosque de pinos piñoneros y *Juniperus* sobre las pendientes bajas de la Sierra Nevada y en White-Ionyo, y es uno de los tipos polínicos más característicos encontrados en el Pleistoceno tardío en los depósitos del *Great Basin* (Bradbury, 1997).

h) Brassicaceae

El polen de Brassicaceae es abundante en esta zona. La familia Brassicaceae comprende alrededor de 3,000 especies, de las cuales la mayoría son herbáceas y habitan en regiones templadas del hemisferio norte. Suelen encontrarse en climas muy extremos, viviendo en ambientes alpinos y árticos hasta en climas desérticos, siendo escasos en los trópicos (Freeny, 1977). El género *Ranunculus* uno de los más grandes de la familia habita las altas montañas en los trópicos. Las especies de este género se establecen en hábitat secos o húmedos (Emadzade, *et al.*, 2010). Algunos de sus géneros habitan en diferentes tipos bosques y matorrales submontanos donde predominan los climas templados semihúmedos (Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005).

La identificación del polen a nivel de familia impide hacer interpretaciones más detalladas de la amplia ecología que presentan los miembros de esta familia.

i) Poaceae

Los géneros de Poaceae se pueden encontrar en matorrales micrófilos y rosetófilos, en bosques de pinos-encinos, bosques de pinos (Villarreal-Quintanilla y Encina-Domínguez, 2005).

6.1.2 Indicadores locales

Las algas son organismos fijadores de carbono y generadores de biomasa, que conforman el mayor grupo fotosintético de los cuerpos de agua, por lo que, la comprensión de su ecología es clave en el entendimiento de la dinámica de los sistemas acuáticos, su productividad y las cualidades del medio en el que habitan (Wehr y Sheath, 2003). Entre las variaciones ambientales y del cuerpo de agua a las que son sometidos estos organismos se encuentran: 1) su profundidad y tamaño, 2) la salinidad, pH y en general su composición química, 3) la cantidad de nutrientes disponibles y 4) la transparencia del agua (Wehr y Sheath, 2003).

a) *Botryococcus*

Botryococcus se distribuye principalmente en las zonas cálidas del planeta (Smol, *et al.*, 2001), aunque tolera climas estacionales fríos con salinidades variables (Sousa, 2013) y forma parte del plancton de lagos, estanques, pantanos y cuerpos de agua estacionales aunque rara vez son abundantes. Se ha observado que algunas especies del género *Botryococcus* como *B. braunii* se encuentran en la zona pelágica de lagos oligotróficos, grandes y profundos y pueden llegar a formar florecimientos (Wehr y Sheath, 2003). Además, diversos estudios señalan que *Pediastrum* y *Botryococcus* pueden subsistir juntos bajo condiciones oligotróficas o mesotróficas (Whitney y Mayle, 2012; John, *et al.*, 2002, Chmura, *et al.*, 2006).

La información ecológica para *Botryococcus* apunta que por lo general proliferan en cuerpos de agua donde existe una alta concentración de nutrientes y degradación de la materia orgánica que aporta el nitrógeno necesario para el desarrollo de las colonias (Rodríguez y Ottone, 2003) y en algunos trabajos se menciona que bajo estas condiciones la presencia del género está acompañada de *Gloeotrichia* (Chmura, *et al.*, 2006).

b) *Pediastrum*

Komárek y Jankovská (2001) y Sarmaja- Korjonen y cols. (2006) señalan que la mayor parte de las especies del género *Pediastrum* prefieren condiciones eutróficas (Torres, 2010). Así mismo Bellinger y Sigee (2010) señalan que las colonias de *Pediastrum* tienen un rápido crecimiento cuando los niveles de nutrientes son altos. Torres (2010) comenta que el género vive en aguas ricas en Calcio y con relaciones Nitrógeno/Fósforo muy altas. Whitney y Mayle (2011) escriben que la abundancia de *Pediastrum* no varía significativamente con la profundidad.

c) *Gloeotrichia*

Gloeotrichia es una cianobacteria que tiene dos estadios de vida, béntico durante el cual crece entre los sedimentos de los cuales toma fósforo que posteriormente utiliza durante su estadio planctónico cuando flota y migra a la columna de agua. A medida que *Gloeotrichia* se convierte en planctónica, ésta puede transportar nutrientes desde los sedimentos hacia la columna de agua (Torres-Rodríguez, *et al.*, 2012; Chmura, *et al.*, 2006). La presencia del género puede sugerir condiciones de mayor productividad y un mayor nivel lacustre (Torres-Rodríguez, *et al.*, 2012).

d) *Plantago*

La mayor parte de las especies del género *Plantago* se encuentran en las regiones templadas o en las partes altas de las montañas en los trópicos, 25 especies del género son nativas de Norteamérica, en donde pueden encontrarse en ambientes muy variados, como áreas que sufrieron un disturbio, praderas, cañones, pantanos y chaparrales y suelen crecer en suelos alcalinos o en sustratos rocosos.

f) *Typha*

El género *Typha* agrupa plantas acuáticas y subacuáticas perennes, que forman fácilmente clones. Suelen crecer en pantanos poco salinos, estanques, lagos, cunetas y en ríos con corriente débil (Gucker, 2008). Sus especies suelen vivir en ambientes mesófilos y son tolerantes a la alta salinidad (Sousa, 2013). Las características de los

suelos en los que crecen son igualmente variadas, presentando distintas texturas, niveles de nutrientes, regímenes de humedad y niveles de pH (Gucker, 2008).

Se ha descubierto que bajo ciertas circunstancias responde bien a la eutrofización y puede tolerar sustratos con altos contenidos de metales. Algunas de las especies del género pueden reducir la diversidad de los sitios y afectan negativamente las funciones ecosistémicas (Shih y Finkelstein, 2008).

g) Cyperaceae

La presencia de Cyperaceae está asociada a bajos niveles lacustres (Sousa, 2013).

6.1.3 Indicadores Geoquímicos

a) TiO₂

El TiO₂ es un indicador del flujo de minerales detríticos en la cuenca por la actividad fluvial o pluvial y es un estimador de la precipitación regional (Roy, *et al.*, 2012). Se ha documentado que el TiO₂ y FeO₂ provienen de las rocas que se encuentran en la cuenca de Babícora y puede reflejar las fluctuaciones de la entrada de sedimentos en el lago y por ende los cambios en los procesos de erosión, el clima y la tectónica (Urrutia, *et al.*, 1997).

b) Carbón Orgánico Total (COT)

El contenido de COT en los sedimentos es un reflejo de la actividad orgánica en los medios lacustres, por lo que es considerado como un indicador de la productividad (Cohen, 2003) y representa la cantidad de materia orgánica preservada después de la sedimentación, la cual depende de su producción inicial y el grado de degradación (Mackie, *et al.*, 2005).

c) Índice Carbón/Nitrógeno (C/N)

La medición del índice C/N de los componentes orgánicos refleja el origen alóctono, cuando la materia proviene de las plantas terrestres, o autóctono, cuando deriva de los organismos acuáticos, siendo de gran utilidad en la reconstrucción de los cambios ambientales de los lagos y cuencas en las que se encuentran (Fagel, *et al.*, 2010).

Cuando el índice presenta valores bajos (<10) indica que la materia orgánica proviene del fitoplancton lacustre, mientras que los valores altos (>10) indican que la materia orgánica proviene de las plantas terrestres (Fig. 8) (Smykatz-Kloss y Roy, 2010).

La diferenciación de la materia orgánica del fitoplancton y las plantas terrestres usando el índice C/N, es posible debido a su composición bioquímica diferencial. Los primeros son ricos en Nitrógeno, elemento estructural de las proteínas y ácido nucleicos, (Leng, *et al.*, 2005) y contiene pequeñas o nulas cantidades de celulosa y lignina, que son más ricas en carbono; por su parte, las plantas vasculares que crecen en el área cercana al lago contienen una alta proporción de tejidos fibrosos y son pobres en su contenido proteínico como material estructural (Meyer, 1993; Fagel, *et al.*, 2010).

d) Zr/Al_2O_3

Zr/Al_2O_3 refleja una variación en la abundancia entre feldespatos y Zircón, éste último está concentrado en la fracción areno limosa y puede ser transportado por procesos eólicos, un valor alto de Zr/Al puede ser considerado un indicador de actividad eólica (Roy, *et al.*, 2009). Los índices Zr/Al_2O_3 y SiO_2/Al_2O_3 representan periodos con alta entrada de Zircón y cuarzos en la cuenca de Babícora e indican aporte eólico (Roy, *et al.*, 2012).

6.2 Evolución de la flora

El análisis de agrupamiento CONISS del diagrama polínico de porcentajes de los palinomorfos regionales agrupa a los taxa en 4 zonas sugiriendo cambios en la composición de la vegetación de la cuenca de Babícora. Así mismo, el análisis palinológico reveló la presencia de taxa regionales de condiciones más húmedas y frías para el periodo analizado. El registro de algas y plantas hidrófitas indica la presencia de un cuerpo de agua permanente, aunque con variaciones en sus características (profundidad, salinidad, pH y temperatura), como también plantean los indicadores geoquímicos y ostrácodos, para este periodo (Chávez-Lara, 2012 y Quiroz, 2012).

Zona I de 76.3 a los 66.9 ka

Las comunidades alrededor de la cuenca de Babícora corresponden a bosques de *Pinus-Cupressaceae*, que se desarrollaron entre el MIS 5a (92-74 ka) y el MIS 4 (74-60 ka). La presencia de este tipo de bosque coincide con un periodo de humedad en la cuenca como lo sugieren los valores altos de TiO₂. *Cupressaceae*, *Picea*, *Abies* e *Ilex*, que forman parte de la vegetación de la región para este periodo sugieren también condiciones húmedas en la cuenca.

Entre 76.3 y 66.9 ka el porcentaje de diatomeas planctónicas es alto y hay una dominancia de *Stephanodiscus niagarae*, por lo que se puede pensar en una relación positiva entre *Cupressaceae* y las diatomeas planctónicas para el sitio de estudio. Además, el aumento en las tasa de acumulación de *Cupressaceae* e *Ilex* coincide con un aumento de humedad hace 73.9 ka. El incremento ocurre dentro del MIS 5a, un periodo interstadiales que con base en los datos geoquímicos del registro se caracterizó por un aumento de la precipitación en la región (Roy, *et al.*, 2012).

El aumento en las tasa de acumulación de *Pinus*, *Picea* y *Abies* hace 75 ka coincide con los valores más altos de cobertura arbórea y con el valor de *Pinus* más alto de la secuencia lo que sugiere un amplio desarrollo de los bosques en la zona.

Hace 66.9 ka se presenta el valor más alto de pinos piñoneros (30%), este pico podría corresponder a la respuesta de las comunidades vegetales a una menor precipitación con el establecimiento de taxa de ambientes de transición, ya que a partir de los 67 ka se da una disminución gradual de la precipitación con fluctuaciones menores respecto a las registradas entre los 87 a los 67 ka, aunque la precipitación siguió siendo alta (Quiroz, 2012).

Dentro del conjunto de las herbáceas, los taxa *Asteraceae*, *Poaceae*, *Thalictrum* y *Fabaceae*, presentan tres picos de tasas altas de acumulación: 76.3, 71-70.4 y a los 68 ka, este último más pequeño que los anteriores. Estos taxa se encuentran actualmente de los listados florísticos del sotobosque de diferentes bosques de coníferas en el norte y centro de México. Rzedowski (2006) menciona que las familias *Asteraceae* y *Poaceae* tienen una buena representación en climas templados.

Entre los 76.3 y 66.9 ka los datos del sistema lacustre revelan que *Pediastrum* presenta concentraciones relativamente bajas, *Botryococcus* tiene su concentración más alta en toda la secuencia hace 75 ka; y *Gloeotrichia* se encuentra en concentraciones muy bajas. Liliaceae, *Rorippa*, Cyperaceae y *Myrophyllum*, tienen porcentajes bajos y únicamente los dos últimos taxa son conspicuos en este periodo y presentan porcentajes superiores al 5% a los 72.7 y 76.3 ka respectivamente.

Para la cuenca de Babícora entre los 79 y 67 ka se reconstruyen bajas concentraciones de COT (Fig. 10), que se han asociado a la mala preservación del material orgánico, por la entrada de material detrítico pluvial que oxigenó el agua e impidió la preservación del material orgánico o al efecto de disolución por entrada de dichos materiales (Quiroz, 2012).

El valor de concentración más grande que presenta el género *Botryococcus* hace 75 ka (913 cm) coincide con el periodo del MIS 5a registrado en la cuenca. El MIS 5a se caracteriza por una mínima extensión del casquete de Norteamérica desde el inicio de su crecimiento en el MIS 5d, por lo que el glacial tenía un volumen muy pequeño (Stokes, *et al.*, 2012), además, el MIS 5a se caracteriza por un incremento en las temperaturas oceánicas y globales (Shackleton, 1969).

Las especies del género *Botryococcus* crecen preferentemente en ambientes cálidos, por lo que las altas concentraciones del género registradas hace 75 ka pueden estar respondiendo, no sólo a un lago profundo con características oligotróficas sino también, a las temperaturas menos frías en la cuenca que propiciaron su crecimiento. Chávez y cols. (2012) reconstruyen entre los 72 y 57 ka un cuerpo de agua con bajas concentraciones de sales (>100 ppm) y un flujo importante de agua dulce. Además, se sugiere un lago de aguas cálidas con temperaturas de entre 13 y 32 °C, información que apoya la idea de que el pico de *Botryococcus* está asociado a temperaturas menos bajas. La idea del desarrollo de un lago con características oligotróficas está apoyada por las interpretaciones realizadas con ostrácodos, los indicadores geoquímicos (valores de bajos a moderados del índice Sr/Cu, que indica una salinidad baja entre los 79 y 67 ka) las bajas concentraciones de microalgas.

Por otra parte, si bien las concentraciones de COT en este periodo son las más bajas para el núcleo también presenta fluctuaciones. Uno de los valores más altos ocurre a 68 ka, edad en la que además comienza el incremento gradual del COT (Roy, *et. al.*, 2012). Este aumento en los valores coincide con el valor más alto del índice C/N (alto aporte terrestre) y el valor más alto de *Gloeostrichia* en la zona I, por lo que se propone, al igual que en otros trabajos, que el género funciona como indicador del cambio de las condiciones tróficas del cuerpo de agua.

La presencia de Cyperaceae esta asociada a bajos niveles lacustres (Sousa, 2013), sin embargo se encuentra en porcentajes muy bajos, a excepción de la muestra 853cm hace 72.7 ka que tiene un porcentaje del 7.1%, y el resto de los indicadores geoquímicos y biológicos indican la presencia de un lago profundo.

Zona II de 66.9 a 59.9 ka.

En este periodo se reconstruye un bosque de *Pinus-Quercus* y *Picea*, donde *Quercus* comienza a ser un elemento importante de las comunidades vegetales, aunque sigue siendo menor al 10%. Esta época contiene elementos con distintas afinidades ecológicas que reflejan la transición de un ambiente húmedo a uno menos húmedo. Las comunidades vegetales de este periodo se desarrollan durante el MIS 4 (74-60 ka).

El aumento en las tasa de acumulación y porcentajes de pinos piñoneros, los porcentajes más altos de *Quercus* y la presencia cada vez más esporádica y con bajos porcentaje de Cupressaceae podrían estar relacionados con la disminución en la precipitación, coincidiendo con los datos de Roy y cols. (2012).

Sin embargo, se observa variabilidad climática como lo sugiere la diversidad de taxa durante los 65.7 y 61 ka y especialmente de los 65.7 a los 62.2 ka. *Alnus*, *Juglans* y *Fraxinus* que indican el mantenimiento de una alta precipitación y una disminución de la misma inversa a la profundidad. En este intervalo de tiempo se da además, el aumento de las tasas de acumulación de: *Pinus*, pinos piñoneros, *Picea*, *Abies*, *Juglans*, *Fraxinus*, Asteraceae, *Artemisia*, Poaceae y *Thalictrum*, que alcanzan sus valores más altos entre los 65.7 y 62.2 ka. Dicho evento coincide con un valor muy bajo de

intemperismo para los ~62.2 ka (691 cm) (Quiroz, 2012). Sugiriendo un aumento en la cobertura vegetal que impidió altas tasas de intemperismo. Esta idea puede estar apoyada por los altos valores de COT y en el índice C/N (Roy, *et al.*, 2012).

Durante el periodo de 66.9 y 59.9 ka hay concentraciones fluctuantes de *Pediastrum*, que van de concentraciones relativamente bajas con un incremento a los 62.2 ka, a concentraciones muy bajas al final de la zona. *Botryococcus* presenta concentraciones bajas y hay un valor bajo de *Gloetrichia* hace 64.5 ka. *Myriophyllum* se encuentra siempre presente, Cyperaceae está ausente entre los 61 y 59.9 ka, *Plantago* y *Typha* se encuentran a los 64.5 ka.

Los valores de COT presentan una alta variabilidad de 61.5 a 58.6 ka. Los valores más altos, que comienzan a aumentar hace ~68 ka, pueden ser una consecuencia de la menor entrada de material detrítico evidenciado con la disminución de TiO₂, que permitió la preservación de la materia orgánica o un menor efecto de dilución por la entrada de los mismos (Quiroz, 2012). Además, el aumento en el COT ocurrió posiblemente en un ambiente de baja oxigenación que permitió su preservación (Quiroz, 2012). El pequeño aumento en la concentración de *Gloetrichia* hace 64.5 ka coincide con uno de los valores más altos de COT en dicho periodo, reafirmando su asociación con el cambio en las condiciones tróficas del cuerpo de agua.

Metcalf y cols. (2002) reportan la dominancia de *Stephanodiscus niagarae* en la asociación de diatomeas entre los 65 y 57 ka y reconstruye el lago de Babícora como un cuerpo de agua profundo, de alta energía y con la entrada de material producto de la erosión. Quiroz (2012) propone que durante este periodo el lago fue menos profundo respecto al periodo anterior y que el régimen de alta energía propuesto por Metcalf y cols. (2002) podría deberse a una marcada estacionalidad.

El registro de ostrácodos reconstruye una salinidad variable (>500 ppm), sobre todo entre los 63 y 62 ka, debido a la dominancia de *L. plataforma* en el cm 705, que indica la persistencia de aguas diluidas y al cambio de dominancia para los 695 cm de *L. ceriotuberosa* indicador de alta salinidad (Chávez-Lara, *et al.*, 2012).

En relación al conjunto de hidrófitas aunque no son muy abundantes se detectó la presencia de *Typha*, *Cyperaceae*, *Plantago* y *Myriophyllum*. Los valores de acumulación de *Fraxinus* y *Juglans* del núcleo GF coinciden con la presencia de *Thypha* para la zona II.

Con base en el conjunto de indicadores se reconstruye un lago de características oligotróficas y profundo para el periodo de 66.9 y 59.9 ka con posibles fluctuaciones a niveles menores entre 78.3 y 66.9 ka; con mayores fluctuaciones en la productividad orgánica, sobre todo al final de la zona y una tendencia clara de su aumento y un mayor aporte orgánico del medio terrestre a lo largo del periodo.

Zona III de 59.9 a 50.5 ka

La vegetación dominante en el periodo es un bosque de *Pinus-Quercus*. La composición de las comunidades cambia ya que se registran taxa distintos a los de las zonas previas. Esta zona se desarrolla en el marco del MIS 3 (60-24 ka), estadio de grandes fluctuaciones en la temperatura mundial y gran variabilidad a escalas milenarias. Para la cuenca de Babícora se reconstruyen condiciones más secas con algunos episodios húmedos (Quiroz, 2012).

Hay una clara reducción de las tasas de acumulación de *Cupressaceae*, que desaparece del registro palinológico a los 55.2 ka (573 cm). Su desaparición en el registro reafirma la interpretación de que *Cupressaceae* es un indicador de humedad para la cuenca y difiere de los registros polínicos anteriores, donde se plantea que la presencia de *Juniperus* fue importante hasta hace 54.6 ka (Metcalf, *et. al.* 2002).

Otra de las evidencias, que apoya la hipótesis de una menor precipitación durante este periodo es el aumento en el porcentaje de *Quercus* y la presencia de pinos piñoneros, que como se mencionó anteriormente son taxa que se desarrollan en medios con menor humedad.

La presencia de *Picea* y *Abies* responden posiblemente a la disminución de las temperaturas por el crecimiento del casquete Laurentino, como lo indican su afinidad ecológica actual.

Si bien los indicadores geoquímicos indican condiciones secas desde los 58 ka, el registro polínico muestra pequeños episodios húmedos para la región, entre 57.5 y 56.4 ka (aumento de *Alnus* y *Fraxinus*) y a los 54 ka (aumento de *Alnus* y *Juglans*).

La presencia importante de *Thalictrum* en la zona II y III en las que se reconstruyeron condiciones distintas de humedad, la primera húmeda y la segunda con condiciones secas, hace pensar que el taxón no responde a los cambios de humedad en la cuenca, y que la temperatura es un factor importante para su presencia; indicando posiblemente una disminución en la misma. Durante la transición del MIS 4 y MIS 3 el casquete retrocede, pero recobra su posición original alrededor de los 50 ka. Entre los 60 y 55 ka el margen sur del casquete norteño alcanza su extensión mínima antes del UGM (Stokes, *et. al.*, 2012).

En cuanto a las comunidades lacustres, el periodo entre los 58.7 y 50.5 ka se caracteriza por una alta variabilidad en las concentraciones de microalgas, el aumento de la materia orgánica, la disminución en la entrada del material detrítico y un lago con condiciones más eutróficas.

Pediastrum presenta concentración muy bajas hace 58.7 ka y entre los 54 y 52.9 ka, sin embargo entre los 57.5 y 55.2 ka y 50.5 ka se observan valores de concentración altas. *Botryococcus* incrementa notablemente sus valores de concentración entre 57.7 y 50.5 ka.

El registro de las hidrófitas muestra la presencia en la mayor parte del periodo de Cyperaceae y *Myriophyllum*, mientras Liliaceae se encuentra hace 50.5 ka y *Typha* entre los 51.7 y 50.5 ka. *Gloetrichia* tiene el valor más alto de la secuencia a los 58.7 ka y parece estar relacionado con el máximo en el índice C/N (24.53) hace 59.7 ka y con las grandes variaciones en los valores de COT en la primer parte de este periodo, este pico puede estar relacionado además con el cambio a un lago más eutrófico y apoya la idea de *Gloetrichia* como un indicador de cambio en las condiciones tróficas del cuerpo de agua.

La información geoquímica revela un incremento significativo en la salinidad y la deposición de carbonatos (altos valores de Sr/Cu, CaCO₃, Ca, Sr) y una gran

preservación del material orgánico (COT) (Quiroz,2012). El incremento de los porcentajes de COT coincide con la presencia de sedimentos finamente intercalados que apoyan la hipótesis de un medio de depositación de baja energía y/o de baja oxigenación. Entre los 59 y 44 ka estos valores indican un aumento en la productividad y presentan grandes variaciones (Roy, *et. al.*, 2012). Así mismo entre los 60 y 45 ka, que corresponden al intervalo entre el evento H6 y H5, el COT presenta sus máximos valores para la secuencia.

Chávez y cols. (2012) reportan un alto contenido de ostrácodos entre los 57 y 49 ka con *Limnocythere plataforma* y *Cypridopsis vidua* como taxa dominantes y proponen que el cuerpo de agua se encontraba a no menos de 10 °C, con un incremento en la salinidad (100-1,000 ppm) y un lago con condiciones alcalinas (pH>7) basado en la gran abundancia de ostrácodos

Sin embargo, la información de diatomeas revela la presencia dominante de *Fragilaria construens* hace 57 ka, la cual indica un lago menos profundo. Así mismo los autores señalan que poco después *Cyclotella meneghiniana* se vuelve dominante y se reconstruye un lago más concentrado químicamente (Metcalfe, *et. al.*, 2002). Roy y cols. (2012) considerando los datos anteriores, reconstruyen un lago con condiciones más someras y un incremento en la salinidad y productividad orgánica para ese periodo, esta interpretación aunada a la información ecológica de los géneros de algas encontrados nos permiten pensar en un lago con condiciones más eutróficas respecto a los periodos anteriores.

Zona IV de 50.5 y 38.4 ka

La zona IV, que se desarrolla en el marco del MIS 3 (60-24 ka), se caracteriza por la presencia bosques de *Pinus-Quercus*, en la cual, *Pinus* tiene porcentajes más altos respecto a la zona anterior, *Quercus* mantiene valores similares y se observa un aumento en la tasa de acumulación de los pinos piñoneros, que son un indicador de condiciones más secas para la cuenca.

El bajo aporte detrítico pluvial registrado en Quiroz (2012) entre los 46 y 39 ka es interpretado como el periodo en el que la cuenca experimento las condiciones más

secas del registro estudiado. Aunque las fluctuaciones en los valores de TiO₂ indican condiciones hidrológicas variables.

La etapa seca registrada para Babícora alcanza un máximo a los 42 ka, y dicho evento se ve reflejado en la presencia de marcas de desecación y un posible hiato sedimentario. Sin embargo, las condiciones hidrológicas cambian entre los 41 y 39 ka, cuando la cuenca experimenta condiciones más húmedas, como lo indican los altos valores de TiO₂ y las estructuras lenticulares. El MIS 3 se caracteriza por marcadas fluctuaciones en la temperatura y una gran variabilidad a escala milenaria. Está fluctuación en las temperaturas posiblemente disminuyeron de forma general el aporte de humedad a la cuenca impidiendo en establecimiento de un régimen de hidrológico claro (lluvias de verano) debido a la marcada estacionalidad. (Quiroz, 2012).

Los datos polínicos pueden ser interpretados en términos de las fluctuaciones hidrológicas y en algunos casos por la disminución en la temperatura (*Picea* y *Abies*). Además pueden indicar, que si bien las condiciones son las más secas del registro, son más húmedas que en el presente. Ya que, aunque, hay un predominio de taxa de menor humedad, la acumulación de polen entre 49.4 y 42.8 ka alcanza valores muy altos, se observan taxa relacionados con condiciones húmedas como *Alnus*, *Picea*, *Abies* y *Juglans*, aunque en proporciones bajas y la acumulación total alcanza valores igualmente altos.

El episodio húmedo entre los 41 y 39 ka coincide con el aumento en la tasa de acumulación entre los 39.5 y 38.4 ka para la mayor parte de los taxa y la tasa de acumulación total más alta del registro. Los taxa arbóreos y herbáceos tienen afinidades ecológicas distintas y presentan valores altos en la acumulación durante este periodo (*Pinus*, pinos piñoneros, *Picea*, *Quercus*, Cupressaceae, *Alnus*, Betulaceae, Asteraceae, Poaceae, *Artemisia*, Amaranthaceae, Caryophyllaceae, Urticaceae, Brassicaceae y Loranthaceae), lo que sugiere en un alto dinamismo de los elementos de las comunidades vegetales en respuesta al cambio en el régimen de precipitación.

El periodo entre los 49.4 y 38.4 ka se caracteriza por las relativamente bajas concentraciones de *Pediastrum*, aunque mayores en términos generales a las de la

zona I y II. Este género presenta además un aumento en su concentración a los 49.4 ka. Las concentraciones de *Botryococcus* fluctúan pero son en general altas en comparación con las zonas previas. *Gloeotrichia* presenta concentraciones bajas y tiene un máximo a los 42.8 ka. El registro de las plantas hidrófitas revela la presencia de Cyperaceae y *Myriophyllum* en algunas de las muestras.

Los valores de C/N <10% sugieren que el aporte de materia orgánica es principalmente lacustre. Los valores de COT son altos entre los 47 y 45 ka y bajos entre 39.5 y 38.4 ka, aunque en general se caracteriza por una disminución en este periodo. El decremento en la cantidad de materia orgánica en el lago esta asociado al aumento en la salinidad (Roy *et. al.*, 2012). El intemperismo va de bajo a intenso y la salinidad es variable, reconstruyendo la presencia de una salmuera muy concentrada ~42 ka y una salmuera diluida a los 44 y 40 ka (Quiroz, 2012)

Los datos de los ostrácodos indican que entre los 49 y 29 ka se da la más alta abundancia de ostrácodos, por lo que se sugiere que en este periodo se presentaron las condiciones óptimas para su crecimiento. Se reconstruyó una temperatura del cuerpo de agua entre los 5-32 °C y una salinidad de 100-1,000 ppm. *L. bradbury* es dominante hasta los 29 ka y es muy abundante de los 43 a los 29 ka (Roy, *et al.*, 2012).

Al considerar las evidencias paleoecológicas para el lago en trabajos previos y la ecología de los géneros de algas encontradas en este estudio proponemos que entre los 49.4 y 38.4 ka el lago fue más somero y presento características de un cuerpo de agua oligotrófico con menor entrada de material orgánico, posiblemente por una disminución en los procesos de erosión.

6.3 Comparación con otros registros palinológicos del Pleistoceno

6.3.1 Comparación con el registro de San Felipe de los 44 a 38 ka

Uno de los estudios paleoambientales con mayor antigüedad para el norte de México fue realizado en la cuenca de San Felipe (31°08'N, 115° 15'O, 400 m.s.n.m) en el desierto de Sonora. La cuenca, que se encuentra en el estado de Baja California, está delimitada por las sierras de San Felipe (1,000 m.s.n.m.) y San Pedro Mártir (2,500 m.s.n.m.) (Roy, *et. al.*, 2012).

Lozano y cols. (2002) reconstruyen un bosque abierto de *Pinus* y *Juniperus* con una presencia importante de *Pinus*, altos porcentajes de pinos piñoneros, y la presencia de *Artemisia* y *Amaranthaceae* en el estrato herbáceo entre los ca. 44,000 y ca. 34,000 ¹⁴C años a.P. El transporte de los granos de polen encontrados en la secuencia lacustre de San Felipe se relacionó con un incremento en la precipitación y la fuerza del viento que permitieron que los granos de polen de la vegetación que crecía en la Sierra de San Felipe y San Pedro Mártir llegaran a la cuenca. Lozano y cols. (2002) proponen que los bosques se encontraban en rangos altitudes más bajos a los actuales como consecuencia de una mayor humedad disponible. Los estudios de mineralogía y elementos traza y mayores de la secuencia revelan que la precipitación en la zona pudo haber sido mayor entre los 48 y 40 ka (Roy, *et. al.*, 2012b).

La vegetación regional de la cuenca de Babícora (29°15' - 29°30'N, 107°45' - 180° O) entre los 49.4 y 38.7 ka se caracteriza por la presenta un bosque de *Pinus-Quercus* con tasas altas de acumulación de pinos piñoneros. Los indicadores geoquímicos indican un ambiente seco que cambia entre los 41 y 39 ka a un ambiente más húmedo (Quiroz, 2012). El registro de polen de San Felipe indica que las condiciones de humedad para esta zona han prevalecido desde al menos ca. 45.000 ¹⁴C años a.P. sin diferencias significativas durante el Último Máximo Glacial. El registro no identifica al Último Máximo Glacial como el momento de mayor humedad efectiva, como lo sugieren algunos registros sudoccidentales de Estados Unidos. Para este registro se propone que la expansión de los bosques durante el Wisconciano tardío está relacionada con veranos más fríos y un aumento de las lluvias de invierno (Lozano-García, *et. al.*, 2002).

Al hacer la comparación de los diagramas polínicos de ambos registros para el periodo de tiempo compartido encontramos que: el porcentaje de los pinos piñoneros es relativamente más bajo en la secuencia de Babícora, en ella los valores son <10% y en la secuencia de San Felipe fluctúan entre los 7-16%. El porcentajes de *Quercus* es mayor en Babícora; la presencia de *Picea* es compartida en ambas secuencias; en Babícora el estrato herbáceo equivale al 20 o 25 %, mientras que en San Felipe equivale a un 45%. En general los porcentajes de los taxa de hierbas

compartidas son menores para el registro de Babícora o muy similares, y el porcentaje de plantas acuáticas es bajo en ambas secuencias.

Las alturas similares de las cadenas montañosas que rodean ambas cuencas y que van de los 2,500 a los 3,000 m.s.n.m nos permiten pensar que en ambos sitios hubo una expansión de las comunidades vegetales hacia las partes más bajas de las montañas y que el clima en lo que actualmente es el desierto de Sonora y Chihuahua fue más húmedo y frío durante el Pleistoceno medio y tardío, aunque la fuente de humedad de las dos cuencas posiblemente no es la misma; para la cuenca de San Felipe se piensa que las lluvias de inviernos son la fuente principal de humedad en la zona hasta los 14 ka (Roy, *et. al.*, 2012b), mientras que en la Cuenca de Babícora se piensa que dominaron las lluvias Monzónicas de verano.

6.3.2 Trabajos previos en la cuenca de Babícora

Los trabajos de Metcalfe y colaboradores presentan el registro polínico obtenido de los núcleos B94/3a y B94/3b que abarcan en conjunto un registro de 65 a 2.5 ka. En Metcalfe y cols. (2002) se presentan los datos de la palinoflora de los 65 a los ~20.7 ka, coincidiendo cronológicamente con gran parte del presente estudio. Al comparar los diagramas polínicos obtenidos en ambos trabajos se observó una mayor diversidad polínica en la presente investigación, cambios en las unidades de los conteos de *Pediastrum* y *Myriophyllum*, y en las zonas polínicas establecidas. Estas diferencias y otras que se señalarán más a detalle en los siguientes párrafos pueden deberse a las diferencias en la cronología de los núcleos, al cambio en las unidades empleadas para los conteos de plantas acuáticas y algas, a la resolución del muestreo o al número de palinomorfos contados.

a) Diversidad palinológica

Los 39 palinomorfos (19 géneros y 17 familias) encontrados en el núcleo GF se dividieron en cinco conjuntos por el tipo de vida de los taxa. El trabajo de Metcalfe y cols. (2002) registra la presencia sólo de 10 taxa divididos igualmente en cinco conjuntos, que incluye al conjunto de los arbustos, el cuál no es compartido con la presente investigación.

En el conjunto de los árboles en Metcalfe y cols. (2002) se reportan tres géneros de árboles (*Quercus*, *Pinus* y *Picea*), los cuales también fueron encontrados en los conteos del núcleo GF, sin embargo, en el presente estudio se encontraron otras dos familias y seis géneros de hábito arbóreo. El trabajo de 2002 reporta la presencia del género *Juniperus*, en el grupo de los arbustos; en este trabajo, la información obtenida y las características morfológicas compartidas entre el género *Cupressus* y *Juniperus* que hacen imposible su identificación únicamente por caracteres morfológicos no permitieron la distinción del palinomorfo a nivel de género; clasificándose a nivel de familia. Además en el presente trabajo se realizó la separación entre los *Pinus* y los pinos piñoneros, utilizando como criterio de identificación el tamaño de los granos de polen.

En el estrato herbáceo, ambos trabajos también tienen diferencias. La presente investigación reporta 11 familias y tres géneros mientras que Metcalfe y cols. (2002) reporta la presencia de Poaceae, *Ambrosia* y Chenopodiaceae, éstas últimas asignadas a la familia Amaranthaceae en el presente trabajo. Los palinomorfos pertenecientes al género *Ambrosia*, por su parte, no fueron separados de la familia Asteraceae en esta investigación, sin embargo dicho género estaba presente en la secuencia estudiada junto con otros géneros que fueron reconocidos como parte de dicha familia.

Myriophyllum spicatum es la única planta acuática reportada en Metcalfe y cols. (2002). En el presente trabajo los palinomorfos relacionados con el género no fueron determinados hasta nivel de especie, aunque la diversidad morfológica observada en los granos de polen podría sugerir la presencia de más de una especie para el género. Se encontraron, otros tres géneros (*Rorippa*, *Typha* y *Plantago*) y dos familias (Cyperaceae y Liliaceae) de plantas hidrófitas y la presencia de dos géneros más de algas (*Gloeotrichia* y *Botryococcus*).

El trabajo realizado muestra una mayor diversidad de taxa polínicos para el registro de Babícora.

b) Zonación y eventos importantes en la paleovegetación

Metcalfe y cols.(2002) indica la división de cuatro zonas polínicas, de las cuales únicamente la zona B-1, que va de los 65 ka a los 29 ka es compartida cronológicamente con el presente trabajo. Se describe que entre los 65 y 57 ka la zona estaba cubierta por bosques abiertos de *Pinus* y *Quercus* con algunas *Picea*, dicho periodo coincide parcialmente con la Zona II (66.9-59.9 ka) y en ambos registros los elementos arbóreos dominantes son compartidos.

Metcalfe y cols. (2002) indican la desaparición de *Juniperus* a los 54.6 ka, fecha que coincide parcialmente con el último valor de Cupressaceae hace 55.2 ka en el presente trabajo, sin embargo desde 66.9 ka la presencia de este taxón es esporádica y no representa >5%. Además el porcentaje del estrato arbóreo para este periodo es mayor que el reporta para los núcleos B94/3a y B94/3b. Metcalfe y cols. (2002) menciona que después de los 54.6 ka Chenopodiaceae es >10%. En nuestro registro Amaranthaceae solo tiene un valor >10% en algunos momentos del intervalo de tiempo que va de los 76.3 a 66.9 ka y posteriormente solo se presenta en valores <10%.

Las comparaciones de los cambios en la abundancia de *Pediastrum* entre ambas secuencias se ve limitada por la diferencia en las unidades de medición empleadas puesto que esos autores no emplean una metodología que permita calcular concentraciones ni acumulaciones. Sin embargo, nuestro registro detecta una mayor variabilidad en las concentraciones del género, que las detectadas en términos del porcentaje.

En el presente estudio los conteos de la presencia de *Pediastrum* son excluidos de la suma polínica donde se incluyen a los taxa regionales. Dicha consideración es importante porque los procesos de depositación de la biota local y regional son distintos, por lo que se recomienda estudiarlos como dos sistemas independientes (Huntley y Webb,1988), además *Pediastrum* es un alga colonial (Barsanti y Gualtieri, 2006) que es susceptible a sufrir fragmentaciones durante el proceso de depositación y fosilización, haciendo el conteo de las mismas complicado.

6.4 Comparación con la flora actual

La comparación de la flora actual y el registro polínico del presente trabajo permitió detectar la presencia de distintas comunidades vegetales a través de la historia de la cuenca, y el establecimiento y desaparición de distintos taxa en sitios cercanos al área de estudio durante el último ciclo glacial-interglacial. Estos datos fortalecen la idea de que la distribución de las plantas está estrechamente relacionada con los cambios en el clima, aunque existen otros factores bióticos y abióticos que determinan la presencia de un taxón en un sitio determinado.

La comparación realizada reveló la ausencia en el sitio de estudio, y/o en el registro polínico, de las familias Salicaceae, Tamaricaceae y Ulmaceae en el estrato arbóreo y de Agavoideae, Cactaceae, Euphorbiaceae, Malvaceae, Nyctaginaceae, Scrophulariaceae, Solanaceae, Verbenaceae y Zygophyllaceae en el estrato de las hierbas y los arbustos. En contraparte, se observó la presencia de granos de polen de los géneros *Abies* y *Picea* entre los 76.3 y 38.4 ka. Este registro, fortalece la hipótesis de un ambiente más frío y húmedo para la zona durante el Pleistoceno medio y amplía el área de distribución de ambos géneros para el pasado.

Además, la información ecológica de algunas de las familias ausentes en el registro fósil y que se encuentran en la cuenca actualmente, como parte del estrato herbáceo o arbustivo, revelan que su presencia está asociada a ambientes más secos. Judd, *et al.* (2002) menciona que, la familia Zygophyllaceae se distribuye principalmente en las zonas tropicales y subtropicales en hábitats áridos. *Larrea tridentata*, es una de las especies más importantes de la vegetación natural de los desiertos mexicanos, aunque llega a encontrarse en los bosques tropicales caducifolios, bosques espinosos y matorrales xerófilos. Crece en terrenos planos, laderas, lomeríos bajos y en planicies aluviales. Se desarrolla en lugares con temperaturas de 14 a 28 °C y que presentan ocho meses de sequía con precipitaciones de 150 a 500 mm al año. Se ha observado que no prospera en sitios con climas isotérmicos. *Juniperus*, *Acacia*, *Yucca* y *Opuntia* son algunas de los géneros asociados a este taxón según información de CONABIO y SEMARNAT. Agavoideae se distribuyen en la región tropical del continente americano en hábitats áridos y semiáridos (Judd, *et al.*, 2002).

La familia Cactaceae tiene cerca de 2,000 especies, las cuales se encuentran distribuidas a lo largo del continente americano en ambientes áridos y semiáridos principalmente, aunque pueden crecer en ambientes diversos. Los sitios áridos donde se desarrollan suelen coincidir con latitudes cercanas a 25°, donde dominan las zonas de alta presión atmosférica con corrientes descendientes de aire seco y precipitaciones anuales menores a 600 mm, como ocurre en el desierto Chihuahuense (Jiménez, 2011). El desierto Chihuahuense es la región con mayor distribución de la flora cactológica de México y el más rico ensamblaje de cactáceas de tamaño pequeño en el mundo (Hernández-Oria, *et al.*, 2007)

Las Euphorbiaceae se encuentran en los principales tipos de vegetación reconocidos de México, con una mayor concentración de especies en las regiones de selva baja caducifolia y en los matorrales, aunque se encuentran en comunidades muy diversas (Gordillo, *et al.*, 2002). Solanaceae son altamente dispersas en los geotrópicos (Judd, *et al.*, 2002).

Por su parte, las familias que forman parte en el estrato arbóreo, suelen crecer bajo condiciones más diversas y algunas de ellas tienen afinidades a climas más húmedos a excepción de la familia Tamaricaceae. La cual, no es nativa del continente americano y se desarrolla principalmente en sitios secos y salinos en zonas subtropicales o templadas (Zouhar, 2003). Martínez y González (2002) mencionan que las plantas agrupadas en la familia Salicaceae son en su mayoría árboles y arbustos caducifolios, que se encuentran en los márgenes de ríos y arroyos. Son abundantes en ambientes templados en el hemisferio norte donde forman arboledas e incluso bosques, aunque la mayoría de las especies tiene una distribución muy amplia y se encuentran en muy diversas comunidades vegetales. *Populus tremuloides* es una de las especies con más amplia distribución en Norteamérica y aunque llega a encontrarse en los bosques de pinos y encinos, también forma parte de la flora de los matorrales xerófilos y puede llegar a formar bosques de galería con *Fraxinus* (Martínez y González, 2002). En la cuenca se registra la presencia de *Populus tremuloides* y *Salix lasiolepis* (Estrada, *et al.*, 1997), ambas especies tienen una amplia distribución en Norteamérica.

Ulmaceae se distribuye principalmente en las zonas templadas del hemisferio norte pero puede extenderse en las zonas tropicales y subtropicales del hemisferio sur (Judd, *et al.*, 2002), *Ulmus americana*, especie reportada para la cuenca (Estrada, *et al.*, 1997), se puede encontrar en sitios húmedos o en desiertos según la información del herbario Robert W. Freckman en Estados Unidos.

Es así que, la composición e información ecológica de las plantas y comunidades vegetales que se encuentran en la cuenca de Babícora o en sitios cercanos revelan que si bien los taxa son altamente plásticos para adaptarse a ambientes muy diversos su presencia en un sitio puede darnos información de la historia climática de la región. Las comunidades vegetales del noroeste de Chihuahua son el resultado de la prevalencia de condiciones más frías y húmedas durante el Pleistoceno y el establecimiento de condiciones cada vez más secas durante el Holoceno. Estas últimas, permitieron el establecimiento y dominancia de comunidades desérticas en el estado de Chihuahua y en gran parte del norte de México.

Además en la cuenca de Babícora, al igual que en otros sitios del país, la elevación de los picos montañosos, a permitido el desarrollo y permanencia de distintos tipos de bosques, que si bien, su presencia podría no ser entendida considerando únicamente su posición latitudinal, su desarrollo puede ser explicado considerando la altura de los lugares donde crecen y la historia del clima en la región.

6.5 Reconstrucción del paleoambiente

6.5.1 Preservación de los granos de polen sacados en el contexto de la energía en la cuenca

El análisis de preservación que consistió en los conteos de los granos de polen sacados de *Pinus*, *Picea* y *Abies* que se encontraban incompletos o fragmentados fueron comparados con el tipo de sedimentos en los que fueron depositados incluyendo los datos de la concentración de TiO_2 y del índice Zr/Al_2O_3 (Roy, *et al.*, 2012), y los datos de preservación de las secuencias de los núcleos B94/3a y B94/3b de Metcalfe y cols. (2002).

Dicho análisis se realizó considerando que los registros del norte de México en las zonas áridas se caracterizan por la mala preservación del material biológico (Metcalf, *et. al.*, 2006) y que para el Holoceno impiden el análisis palinológico en secuencias como las de las cuencas de Babícora y San Felipe y que han sido interpretados como eventos de desecación en los lagos (Metcalf, *et. al.*, 1997; Lozano, *et. al.*, 2002).

Las pocas investigaciones que han evaluado la preservación de los granos de polen revelan que, la corrosión que llegan a presentar puede deberse a distintos factores externos como son, los ataque de microorganismos; la oxidación de los granos; las fuerzas mecánicas que actúan en el medio de depósito y que pueden fragmentarlos; y las altas temperaturas que pueden llegarse a presentar en fenómenos como los incendios; además, de factores inherentes a los granos de polen que están relacionados con las características físicas y químicas de sus paredes, conllevando a una preservación diferencial según el ambiente de depósito y el tipo polínico (Havinga, 1967).

Havinga, (1967) documenta que los granos de polen de *Picea* y *Pinus* se auto-oxidan al estar expuestos al aire por largos periodos, y que este fenómeno los hace más susceptibles a los ataques microbianos. Se muestra una mala preservación en sedimentos arenosos y turberas, en donde las condiciones eutróficas ocurren con cierta frecuencia (Havinga, 1967). Campbell (1999) menciona que, el daño de los granos de polen puede deberse a coaliciones con los clastos del fondo del lago, sin embargo se ha probado, a través de estudios en el laboratorio, que dichos daños son mínimos y se piensa que la mayor afectación a los granos de polen se debe a las condiciones de oxidación y desecación.

El análisis de los granos sacados fragmentados en el núcleo GF del lago de Babícora muestra una mayor preservación de polen en la unidad V (933-903 cm) y IV (903-560 cm). La primera está conformada por limos arcillosos y la segunda está constituida por limos, algunos niveles de limos arenosos y una capa de arenas. En la Unidad III (560-330 cm), que presenta limos arenosos, capas de arena y limos arcillosos al final de la unidad, la concentración de granos fragmentados aumentó considerablemente. Entre los 450 y 385 cm (entre los 48 y 41.4 ka) cuando se presentan fisuras de

deseccación, la preservación es mala y se da uno de los valores más altos de granos fragmentados. En la parte final de la secuencia, donde se depositaron limos arcillosos se presenta el valor más alto de granos fragmentados.

El aumento en la concentración de granos rotos, después de los ~58 ka, coincide con el decremento gradual de la precipitación y el aumento en la actividad eólica para la región. Entre los 57-42 ka se reconstruye, además, un lago más somero, por la presencia de *Cyclotella meneghiniana* y *Fragilaria construens*, y un aumento en la salinidad, por el cambio de la dominancia de *Limnocythere plataforma* por la dominancia de *L. bradbury* (Roy, et al., 2012).

Las altas concentraciones de granos de polen sacados fragmentados que coincide con las marcas de desecación entre los 450 y 385 cm (48-41.4 ka) podrían apoyar la idea de un cuerpo de agua muy somero para ese periodo, en donde los granos de polen quedaron expuestos a diversos factores que los fragmentaron. El aumento en la actividad eólica podría haber propiciado la fragmentación de los granos de polen antes de su sedimentación, debido a un incremento del movimiento en la interfase sedimento-agua, que provocaría mayores coaliciones de los granos de polen con los sedimentos, los cuales, además, presentan una textura de limos arenosos que podría contribuir a la mala preservación. La desecación del cuerpo de agua y a la erosión de los sedimentos, también, pudieron propiciar la mayor concentración de granos de polen fragmentados.

La formación de las grietas de desecación y la prevalencia de las condiciones que fragmentaron a los granos de polen, pudieron haber sido posteriores al depósito de los mismos, permitiendo su alta acumulación, entre los 49.4 y 38.4 ka, y explicando a su vez la gran concentración de sacados rotos entre los 47 y 42.8 ka.

Alrededor de los 40 y 38 ka, cuando los valores de TiO_2 se encuentran por arriba de la media, reflejando un aumento en la precipitación (Roy, et al., 2012), se presentan dos de las concentración más alta de sacados fragmentados. Ésta alta concentración de granos rotos puede deberse ha su depositación en un ambiente de alta energía causado por la mayor entrada de detritos en el cuerpo de agua, que además

posiblemente estaba en una etapa de transición, de un lago muy somero a uno menos somero, por el aumento en la precipitación respecto al periodo de los 58 a 40 ka.

La comparación con los datos de preservación de polen en Metcalfe y cols. (2002) son limitados por la diferencia de las unidades en las que se presentan los datos, ya que, en el presente trabajo las mediciones se realizaron como la concentración de granos rotos en cada muestra, mientras que en el trabajo de 2002 se presentan en porcentajes. El registro de Metcalfe y colab. (2002) muestra que el porcentaje de granos rotos fluctúa entre el ~30 y 50%, los granos corrugados son $\leq 25\%$ y los granos corroídos son $\leq 10\%$. Al hacer la comparación visual de los datos para los granos rotos entre ambos registros parecen no coincidir. Metcalfe y cols. (2002) explican la baja preservación del registro palinológico (un alto número de granos fragmentados o plegados) en términos de la gran variabilidad de la profundidad del cuerpo de agua, idea que, podría explicar la mala preservación después de los 58 ka en el presente trabajo.

6.5.2 Procedencia de la materia orgánica en los sedimentos

La comparación de las interpretaciones de la fuente de procedencia de la materia orgánica en los sedimentos, usando el índice de aporte palinológico regional vs. local y el índice C/N, reveló que los indicadores coinciden en términos generales en la asignación de la principal fuente de procedencia de la materia orgánica entre los 76.3 y 58.7 ka, periodo que además, a sido caracterizado como el de mayor humedad para la cuenca (Roy, *et. al.*, 2012). Sin embargo, entre los 58.7 y 38.6 ka, periodo que coincide con condiciones más secas para la cuenca, aunque con variaciones, las interpretaciones que podrían realizarse con uno u otro indicador no coinciden para la mayor parte de los casos y muestran una tendencia distinta.

Entre los 933-911 cm (76.3-74.9 ka) ambos indicadores asignan como la principal fuente de procedencia de la materia orgánica al sistema lacustre, no obstante, con el índice C/N está tendencia continua hasta los 851 cm (71.4 ka) cuando el índice detecta una mayor entrada de material orgánico proveniente del sistema terrestre. Mientras que con el índice de aporte palinológico las muestras de los 893 cm (73.9 ka) y 873 cm (72.7 ka) no muestran una señal clara de la procedencia de la materia

orgánica y para los 853 cm (71.5 ka) muestra una tendencia a la depositación de materia orgánica terrestre. Posteriormente, entre los 831 y 551 cm (70.3-53.9 ka) con el índice C/N se observa una tendencia a la mayor influencia del sistema terrestre en la depositación de materia orgánica, aunque con variaciones. Sin embargo, con el índice de aporte palinológico, el sistema lacustre es la principal fuente de materia orgánica hasta los 573 cm (55.2 ka). Durante este periodo (70.3-55.2 ka), además, los valores más altos a lo largo de la secuencia del índice de C/N (con un valor de 24.5 a los 651 cm) y del índice de aporte palinológico (con un valor de 28.2 a los 653 cm) coinciden. Ésta coincidencia, alrededor de los 60 ka, podría representar la influencia más importante del medio terrestre en la depositación de materia orgánica en los sedimentos y el aumento más importante en la productividad de la cuenca. Dicho evento, coincide parcialmente con el valor más bajo de intemperismo hace ~62.2 ka (691 cm), que sugiere un aumento en la cobertura vegetal, que impidió altas tasas de intemperismo, como se mencionó anteriormente.

Entre los 531 y 351 cm (52.7- 38.2 ka) el índice de C/N detecta la procedencia lacustre de la materia orgánica, no obstante, el índice palinológico detecta una tendencia a la mayor entrada de materia orgánica del sistema terrestre, por lo que como se dijo anteriormente las interpretaciones con ambos indicadores se vuelven contradictorias.

De los casos donde el índice de aporte palinológico detecta la influencia de ambos sistemas en la depositación de materia orgánica solo en dos de ellos el índice de C/N presenta valores muy cercanos a 10, que podrían representar una influencia importante de ambos sistemas. Estos casos se dan en los 513 cm (51.7 ka) y 493 cm (50.5 ka) para el índice de aporte palinológico, con valores de 1.1 y 1.2, respectivamente, y con valores de 8.8 y 9.5 en el índice C/N a los 511 cm (51.6 ka) y 491 cm (50.4 ka). Sin embargo para los otros tres casos en donde el índice palinológico no puede asignar una fuente principal de materia orgánica, el índice C/N hace una asignación clara al sistema terrestre o acuático, es decir tienen valores alejados del 10.

Una de las principales razones de las diferencias entre ambos índices al asignar la fuente principal de materia orgánica puede deberse a la falta de coincidencia de la

profundidad donde fueron tomadas las muestras. Las muestras del análisis palinológico fueron tomadas cada 20 cm desde el centímetro 353 hasta el 933, mientras que las muestras de C/N consideradas en este trabajo fueron tomadas cada 10 cm desde el centímetro 351 hasta el 931. Por lo que las discrepancias observadas entre ambos índices puede deberse a que los cambios en la productividad de la cuenca se dieron en lapsos cortos y no pueden ser detectados por la resolución y diferencias del muestreo. Otra posibilidad es que, las diferencias se deban a los problemas intrínsecos de alguno de los índices, asociados posiblemente a la preservación diferencial de la materia orgánica durante los procesos de diagénesis y sedimentación.

La materia orgánica representa una fracción menor de los sedimentos de los cuerpos de agua, sin embargo, es clave en las reconstrucciones paleoambientales (Meyer, 1997). Este componente de los sedimentos, está fuertemente influenciado por la morfología del lago, la topografía de la cuenca y la abundancia relativa de los organismos fotosintéticos acuáticos y terrestres (Meyer e Ishiwatari, 1993). Es así que la información de los isótopos de Carbono y Nitrógeno, que se preserva en la materia, es el resultado de diversos procesos complejos que incluyen: la biosíntesis en la zona fótica, la entrada de materia alóctona, la degradación de la materia orgánica y el crecimiento bacteriano en la columna de agua y en los sedimentos (Lehmann, *et al.*, 2002).

Meyer (1997) menciona que, los valores del índice C/N suelen ser distintos dependiendo del tamaño del sedimento. En general, las tasa de C/N son más bajas en sedimentos de grano fino que en los gruesos debido a que la fracción fina contiene una gran proporción de minerales arcillosos, los cuales tienen una gran área de cargas superficiales negativas que pueden atraer al nitrógeno inorgánico, que, aunque se encuentra en una proporción muy pequeña comparado con el nitrógeno orgánico, puede tener efectos en el valor del índice. Por su parte, la fracción gruesa de los sedimentos contiene una mayor proporción de detritos de plantas terrestres intactos y suelen presentar una elevada tasa de C/N.

En los datos del índice de C/N se observa que, los cocientes más bajos a lo largo de la secuencia, con valores de 0.82 y 1.5 a los 911 y 371 cm, respectivamente, coinciden con la depositación de limos arcillosos. Dicha información, posiblemente indique la influencia del tipo de sedimentos en los bajos valores del índice C/N y explicaría la falta de coincidencia de ambos indicadores en el periodo que va de los 39.5 a 38.6 ka (373-353 cm), en el cual, el índice de C/N indica la procedencia de la materia orgánica al medio lacustre, mientras el índice de aporte de palinomorfos indica una mayor influencia del medio terrestre. Esta idea además, podría estar apoyada si consideramos los datos con los que fueron obtenidos los valores del índice C/N, ya que, dicha información consideró las concentraciones del COT entre la concentración del Nitrógeno Total (NT) para cada muestra (Roy, *et al.*, 2012).

Además, la idea anterior está sustentada en los resultados de algunos experimentos, en los cuales, se ha demostrado que si bien la materia orgánica más sensible (lacustre) es afectada de igual forma en condiciones óxicas y anóxicas, la materia orgánica más resistente de origen terrestre es más abundante bajo condiciones anóxicas (Lehmann, *et al.*, 2002). Estos experimentos, también, podrían explicar la falta de coincidencia entre ambos índices entre 58 a 38 ka, cuando la cuenca recibía una menor precipitación, el lago era más somero y la actividad eólica era más importante, dejando a la materia orgánica más expuesta a procesos de oxidación. Meyer (1997) también señala que, la productividad del lago es muy sensible a la magnitud de la superficie del agua que es mezclada por el viento y que existe una mayor degradación de la materia orgánica en las zonas menos profundas de los cuerpos de agua, debido a su degradación por parte de los microorganismos. Estos fenómenos, también podrían explicar la mayor acumulación de granos de polen sacados rotos para estas edades.

Sin embargo, Meyer y Ishiwatari (1993) sugieren que la materia orgánica de los organismos acuáticos es más sensible a la degradación respecto a la materia de origen terrestre, por lo que haría falta realizar más estudios que relacionen los valores del índice C/N con los sedimentos, las condiciones de oxidación y el nivel del tirante de agua.

El índice de aporte palinológico regional vs. local podría trabajar de la mano con los datos brindados por el índice de C/N, sin embargo, se sugiere realizar un muestreo más grande, que incluya diferentes lagos de características distintas (área del lago, origen de la cuenca, posición latitudinal, tipo de vegetación, entre otras), que permita describir la distribución de los datos y analizar si existe un patrón entre el cociente de la concentración de los palinomorfos regionales vs. concentración de microalgas, que pueda ser interpretado en términos de la fuente de procedencia de la materia orgánica en los sedimentos.

Capítulo 7: Conclusiones

1. El análisis palinológico de las muestras analizadas permitió detectar los cambios en las comunidades vegetales entre los 76.3 y 38.4 ka. El modelo de edad construido para la sección del núcleo analizada en el este trabajo y las reconstrucciones planteadas con base en los datos palinológicos son consistentes con las interpretaciones de los estudios previos para la cuenca (Metcalf, *et. al.*, 2002; Quiroz, 2012; Chávez-Lara, *et. al.*, 2012; Roy, *et. al.*, 2012).

2. La presente investigación indica ambientes más húmedos y fríos en el periodo analizado en comparación con el presente, que conllevó a la formación de un lago con mayores dimensiones y a la presencia de comunidades vegetales con elementos que requieren una mayor humedad y en algunos casos una menor temperatura. La diversidad vegetal para la cuenca de Babícora en este estudio basada en los datos palinológicos del núcleo aumentó, en comparación con las investigaciones previas encontrando dos familias (Betulaceae y Cupressaceae) y seis géneros más (*Abies*, *Alnus*, *Fraxinus*, *Ilex*, *Juglans* y Pinos piñoneros) que formaban parte del estrato arbóreo; once familias (Amaranthaceae, Asteraceae, Brassicaceae, Caryophyllaceae, Colvolvulaceae, Fabaceae, Loranthaceae, Ranunculaceae, Rosaceae, Rubiaceae y Urticaceae) y dos géneros (*Alternanthera* y *Thalictrum*) en el estrato de las hierbas; dos familias (Cyperaceae y Liliaceae) y tres géneros (*Plantago*, *Rorippa* y *Thypha*) para las plantas hidrófitas y dos géneros (*Botryococcus* y *Gloeotrichia*) más para las microalgas.

Entre 76.3 y 66.9 ka, se desarrolló bosques de *Pinus*-Cupressaceae, que coincide con un periodo de gran humedad en la cuenca. Esta comunidad se establece en la parte final del MIS 5a (92-74 ka) y el MIS 4 (74-60 ka). Cupressaceae, *Picea*, *Abies* e *Ilex* son considerados indicadores de humedad en la cuenca. Los taxa locales indican la presencia de un lago profundo con características oligotróficas, coincidiendo con las interpretaciones de los indicadores geoquímicos. El máximo de *Botryococcus* a los 75 ka indica temperaturas menos frías coincidiendo con lo señalado por los datos de ostrácodos.

Para el periodo 66.9 y 59.9 ka hay evidencias de bosques de *Pinus-Quercus* y *Picea*. Este periodo contiene elementos con distintas afinidades ecológicas que reflejan la transición de un ambiente húmedo a uno menos húmedo, que se desarrolla durante el MIS 4 (74-60 ka). Hay disminución en la precipitación y la presencia de pinos piñoneros, *Quercus* y esporádicamente de Cupressaceae. La gran diversidad de taxa durante los 65.7 y 61 ka, con la presencia de *Alnus*, *Juglans* y *Fraxinus* apoya la idea que aunque hay una menor precipitación respecto al periodo anterior, continuó siendo alta. Se reconstruye un lago con características oligotróficas profundo, aunque posiblemente menor al que se presentó entre 78.3 y 66.9 ka, con mayores fluctuaciones en la productividad orgánica. Estos cambios en las condiciones tróficas se reconstruyen con base en la concentración de *Gloetrichia* hace 64.5 ka y los altos valores de COT.

Bosques mixtos de *Pinus-Quercus* fue la vegetación dominante entre 58.7 y 50.5 ka. La presencia de *Quercus* y de pinos piñoneros reafirman la idea de una menor precipitación durante este periodo, aunque hay episodios húmedos entre 57.5-56.4 ka con un máximo de acumulación de *Alnus* y *Fraxinus* y hace 54 ka con *Alnus* y *Juglans*. *Picea* y *Abies* responden a la disminución de las temperaturas asociada al desarrollo casquete Laurentino. Se reconstruye una baja oxigenación del cuerpo de agua y hay un ambiente de baja energía. El lago, aunque permanente, disminuyó su extensión. Se presenta un aumento en su salinidad y una mayor concentración de nutrientes.

Entre 49.4 y 38.4 ka se reconstruye un bajo aporte detrítico pluvial, con bosques de *Pinus-Quercus* y la presencia de taxa con afinidades ecológicas distintas. Las condiciones más secas del registro entre los 46 y 41 ka coinciden con el aumento en la tasa de acumulación de pinos piñoneros. Entre los 41 y 39 ka la cuenca experimenta condiciones más húmedas, coincidente con el aumento en la tasa de acumulación entre los 39.5 y 38.4 ka para la mayor parte de los taxa y la tasa de acumulación total más alta del registro. Las distintas afinidades ecológicas de los taxa, sugieren un alto dinamismo de los elementos de las comunidades vegetales a este cambio en el régimen de precipitación. Aunque las condiciones que se infieren son las más secas del registro, se caracterizan por mayor humedad que en la

actualidad. El lago posiblemente fue muy somero, como lo indican los valores de COT y la presencia microalgas.

3. El análisis de los granos sacados fragmentados en el núcleo GF del lago de Babícora muestra una mayor preservación (bajas concentraciones de sacados rotos) en las unidades litológicas V y IV y una mala preservación en la unidad III. En las profundidades donde los limos son abundantes la preservación es buena, mientras que la preservación disminuye en las profundidades donde se depositan limos y limos arenosos. La preservación es mala en las profundidades donde hay limos arenosos y capas de arenas, y en los limos arcillosos de la parte final de la secuencia analizada. Después de los ~58 ka la preservación comenzó a ser menor. Este aumento en la concentración de granos rotos coincide de manera general con el decremento gradual en la precipitación y el aumento en la actividad eólica para la región. La fragmentación de los granos de polen puede deberse, principalmente, a la presencia de un ambiente seco con actividad eólica y un lago somero, donde los granos de polen quedaron expuestos al desgaste físico, causado por el choque con las partículas del sedimento, entre otros factores que afectaron su preservación.

4. La creación del índice de aporte palinológico regional vs. local es una nueva herramienta para la interpretación de la procedencia de la materia orgánica en los sedimentos, sin embargo, hace falta un estudio sistemático que evalúe su confiabilidad, alcances y limitaciones.

Los factores que podrían explicar la gran variación de los datos y la falta de concordancia entre el índice de aporte palinológico y de C/N son: 1) la resolución y falta de coincidencia en el muestreo para la obtención de los índices, debido a que, los cambios en la dinámica de la producción y depositación de la materia orgánica en la cuenca de Babícora se dan en periodos cortos y la resolución del estudio no alcanza a detectarlos. 2) Las diferencias se deben a los problemas intrínsecos de alguno de los índices, asociados posiblemente a la preservación diferencial de la materia orgánica durante los procesos de diagénesis y sedimentación.

4. Las comunidades vegetales del noroeste de Chihuahua son el resultado de la prevalencia de condiciones más frías y húmedas durante el Pleistoceno y el establecimiento de condiciones cada vez más secas durante el Holoceno.

El registro palinológico y geoquímico de la cuenca de Babícora indican que las lluvias de verano relacionadas con periodos cálidos durante el Pleistoceno medio fueron la principal fuente de humedad para la región, difiriendo de conclusiones previas en las que se suponía que los vientos del oeste eran la fuente principal de humedad en el noroeste de México durante los inviernos de los estadales fríos en el Último Glacial. La vegetación de la cuenca de Babícora es susceptible a los cambios en la temperatura global durante el MIS 5a, 4 y 3 y sus repercusiones en los regímenes de precipitación.

Bibliografía

- Armstrong Howard A. & Brasier Martin D., 2005. *Microfossils*. 2da. edición. Blackwell Publishing. Inglaterra. 287 pp.
- Barsanti Laura y Gualtieri Paolo. 2006. *Algae: Anatomy, Biochemistry and Biotechnology*. 2da. edición. CRC Press. Estados Unidos. 361 pp.
- Belliger Edward. G. y Sigeo Dave. C. 2010. *Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators*. Wiley-Backwell. UK. 284 pp.
- Bennett Keith David y Willis Katherine Jane. 2001. Pollen. en *Tracking environmental change using lake sediments*. Springer. Netherlands. 5-32 pp.
- Birks John. H. y Birks Hilary H. 1980. *Quaternary Palaeoecology*. The Blackburn Press. Estados Unidos. 289 pp.
- Birks Hilary H. y Birks John H. 2006. Multi-proxy Studies in palaeolimnology. *Vegetation History Archaeobotany*.15: 235-251.
- Bowen, D. Q., 2009. Pleistocene Climates. En *Encyclopedia of paleoclimatology and ancient environments*. Springer. Estados Unidos. pp. 798-803.
- Bradbury. J. P. 1997. A diatom record of climate and hidrology for the past 200 ka from Owens Lake, California whit comparison to other Great Basin records. *Quaternary Science Review*. 16: 203-219.
- Campbell I. D., 1999. Quaternary pollen taphonomy: examples of differential redeposition and differential preservation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 149. 245-256.
- Chávez-Lara C. M., Caballero. M.M., Cañero A. L., Lakshumanan C. 2012 Lacustrine ostracodes from the Chihuahuan Desert of Mexico and inferred Late Quaternary paleoecological conditions. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*. 29: 422-431.
- Chumura Gail L., Stone Peter A. y Ross Michael S. 2006. Non-pollen microfossils in Everglades sediments. *Review of Palaeobotany & Palynology*. 141:103-119.
- Cohen A. S. 2003. *Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*. Oxford University Press. Estados Unidos. 528 pp.
- CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. Servicio Meteorológico Nacional. 2010. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=176:chihuahua&catid=14:normales-por-estacion. Consultado en 2013.
- Emadzade Khatere, Gehrke Berit, Linder Peter H., Hörandl. 2010. The biogeographical history of the Cosmopolitan genus *Ranunculus* L. (*Ranunculaceae*) in the temperate to meridional zones. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 58: 4-21.
- Encina-Dominguez Juan A. Encina-Domínguez, Mta-Rocha Efrén, Valdes-Reyna. 2008. Aspectos estructurales, composición florística y caracterización ecológica del

- bosque de oyamel de la sierra de Zapalinamé, Coahuila, México. Boletín de la Sociedad Botánica de México. 83: 13-24.
- Erdtman G. 1972. Pollen morphology and plant Taxonomy. Angiosperms (an Introduction to Palinology I). Hafner Publishing Company. Estados Unidos. 553 pp.
 - Estrada A. E., Spellenberg R., Lebgue T., 1997. Flora vascular de la Laguna de Babícora, Chihuahua, México. Sida. 17(4): 809-827.
 - Estrada-Castillo Eduardo y Villarreal-Quintanilla, 2010. Flora del centro del estado de Chihuahua, México. Acta Botánica Mexicana. 92: 51-118.
 - Fagel Nathalie, Bertrand Sebastien, Mattielli Nadine, Gilson Delphine, Chirinos Gilles Lepoint y Urrutia Roberto. 2010. Geochemical evidence (C, N y Pb isotopes) of recent antropogenic impact in south-central Chile from two environmentally distinct lake sediment records. Journal of Quaternary Science 25(7): 1100-1112.
 - Ferrari Luca, Valencia-Moreno Martín, Bryan Scott. 2005. Magnetismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII. 3: 343-378.
 - Fægri K. & Iversen, 1989. Textbook of pollen analysis. 4ta. edición. John Wiley and Sons Ltd. Inglaterra. 328 pp.
 - Galizia Tundisi José y Matsumura-Tundisi Takako. 2012. Lymnology. CRC Press. Estados Unidos. 864 pp.
 - Gordon Alan G. 1968. Ecology of Picea Chihuahuana Martínez. Ecology. Vol 49. 5: 880-896.
 - González-Elizondo M. Socorro, González-Elizondo Martha, Tena-Flores J. A., Ruacho-González Lizeth y López-Enríquez Lorena I. 2012. Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. Acta Botánica Mexicana 100: 351-403.
 - Gibbard, P.L. 2007. Climastratigraphy en Elias, S.A. (ed.) *Encyclopedia of Quaternary Science*. Elsevier: Amsterdam. 2819-2825.
 - Gordillo Martínez Martha, Jiménez Ramírez Jaime, Cruz Duran Ramiro, Arriaga Juárez Edgar, García Roberto, Cervantes Angélica, Mejía Hernández Ricardo. 2002. Los géneros de la familia Euphorbiaceae en México. Anales del instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica 73 (2): 155-281.
 - Gucker Corey L. 2008. Typha latifolia: Infire Information System <http://www.fs.fed.us/database/feis/plants/graminoid/typlat/all.html>. Consultado en enero del 2014.
 - Harold C. Bold y Michael J. Wynne. 1978. Introduction to the ALGAE. Structure and Reproduction. Prentice-Hall. Estados Unidos. 706 pp.
 - Handiani, D., Paul A., DuPont L. 2012. Tropical climate and vegetation changes during Heinrich Event 1: a model-data comparison. Climate of the Past. 8: 37-57.

- Havinga A. J. 1967. Palynology and pollen preservation Review of Palaeobotany and Palynology. 2: 81-98.
- Hernández-Oria José Guadalupe, Chávez-Martínez y Sánchez-Martínez. 2007. Factores de riesgo en las cactaceae amenazadas de una región semiárida en el sur del desierto Chihuahuense, México. *Interciencia*. 32: 728-734.
- Hollen David. A; Anselmetti Flavio S.; Ariztegui Daniel; Brenner Mark; Curtis Jason H.; Gilli Adrian, Grzesik Dustin A., Guilderson Thomas J., Müller Andreas D. Bush Mark, Correa-Metrio Alexander y Kutterolf Steffen. 2008. An 85-ka record of climate change in lowland Central America. *Quaternary Science Reviews*. 27: 1152-1165.
- Holmgren, C. A., Betancourt, J.L., Rylander, K.A., 2006. A 36,000-yr vegetation history from the Peloncillo Mountains, southeastern Arizona, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 240: 405-422.
- Huntley, B. and T. Webb III (eds.). 1988. *Vegetation History*. Vol. 7 in *Handbook of Vegetation Science*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands. 803 pp.
- Jiménez-Moreno Gonzalo, Anderson Scott R., Desprat Stéphanie, Grigg Laurie D., Grimm Eric C., Heusser Linda E., Jacobs F., López-Martínez Constanca, Whitlock Cathy L. Willard Debra A. 2010. Millennial-scale variability during the last glacial in vegetation records from North America. *Quaternary Science Reviews*. 29: 2865-2881.
- Jiménez Sierra Leonor. 2011. Las Cactáceas Mexicanas y los riesgos que enfrentan. *Revista Universitaria*. Vol. 12, 1: 3-23.
- John David M., Whitton Brian A., Brook Alan J. 2011. *The Freshwater Algal Flora of the British Isles: An Identification: An Identification Guide to Freshwater and Terrestrial Algae*. 2da. ed. The Natural History Museum. Cambridge. U. K. 697 pp.
- Judd Walter S., Campbell Christopher S., Kellogg Elizabeth A., Stevens Peter F., Donoghue Michael J., 2002. *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach*. 3ra. edición. Sinauer Associates. Estados Unidos. 565 pp.
- Kapp Ronald O. 1969. *How to know Pollen and spores*. Brown Company Publishers. Estados Unidos. 249 pp.
- Kirby, M. E., Lund, S.P., Bird, B.W., 2006. Mid-Wisconsin sediment record from Baldwin Lake reveals hemispheric climate dynamics (Southern CA, USA). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 241: 267-283.
- Komárek, J., Jankovská, V. 2001. Review of Green Algal Genus *Pediastrum*: implications for Pollen-Analytical Research. J. Cramer. Stuttgart. Alemania. 127 pp.
- Kumazawa Masao. Pollen grain morphology in Ranunculaceae, Lardizabalaceae and Berberidaceae. *Japan Journal Botany* (1936) 8: 19:46.
- Lampert Winfried y Sommer Ulrich. 2007. *Lymnoecology: The Ecology of Lakes and Stream*. Oxford University Press. Inglaterra. 382 pp.

- Last William M., Smol John P., Birk H. J. 2001. Environmental Change Using Lake sediments: Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicator. Klumer academic publishers. Países Bajos. 371 pp.
- Lehmann Moritz F., Bernasconi Stefano M., Barbieri Alberto y McKenzie Judith. 2002. Preservation of organic matter and alteration of its carbon and nitrogen isotope composition. *Geochimica et Cosmochimica*. Vol. 66. 20: 3584-3584.
- Li Bo, Douglas, W. Nychka, Ammann Caspar M. 2010. The Value of Multiproxy Reconstruction of Past Climate. *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 105. 491: 883-895.
- Long John A. Stoy Paul C. 2013. Quantifying the periodicity of Heinrich and Dansgaard-Oeschger events during Marine Oxygen Isotopes Stage 3. *Quaternary Research*. Vol. 79. 3: 413-423.
- Lowe, J. J. Walker M. J. C. Porter S. C. 2007. *Understanding Quaternary Climate Change*. Elsevier B.V. 28-35.
- Lozano-García M.S., Ortega-Guerrero B., Sosa-Nájera S., 2002. Mid to Late Wisconsin pollen record of San Felipe Basin, Baja California. *Quaternary Research* 58: 84-92.
- Mackie Elizabeth A. V. Leng Melanie, Lloyd Jeremy M., Arrowsmith Carol. 2005. Bulk organic $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios as palaeosalinity indicators within a Scottish isolation basin. *Journal of Quaternary Science*. 20 (4): 303-312.
- Maher B. A. y Thomson R. (Editores). 2001. *Quaternary climates, environments and Magnetism*. Cambridge University Press. Reino Unido. 402 pp.
- Martínez González Rosa Elena, González Villarreal Luz María, 2002. La familia Salicaceae (*Populus*) en el estado de Jalisco, México. Universidad de Guadalajara. México. 20 pp.
- McAndrews John H, Berti Albert A., Norris Geoffrey. 1973. *Key to the Quaternary Pollen and Spores of the Great Lakes Region*. Toronto Press. Canada. 64 pp.
- Metcalfe S. E., Bim A., Courtice A. J., O'Hara S. L. & Taylor D. M. 1997. Climate change at the monsoon/Westerly in Northern Mexico. *Journal of Paleolimnology* 17: 155-171.
- Metcalfe S. E., Say, A., Black, S., McCulloch, R., O'Hara, S., 2002. Wet conditions during the Last Glaciation in the Chihuahuan Desert, Alta Babicora Basin, Mexico. *Quaternary Research* 58: 91-101.
- Metcalfe Sahra E. 2006. Late Quaternary environments of the northern Deserts and central Transvolcanic Belt of Mexico. *Annals of the Missouri Botanical Garden*. 93:258-273.
- Meyer Philip A. y Ishiwatari Ryoshi. 1993. Lacustrine organic geochemistry-an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake. *Organic Geochemistry*. Vol. 20. 7: 867-900.

- Meyer Philip A. 2003. Applications of organic geochemistry to Paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great lake. *Organic Geochemistry*. 34: 261-289.
- Molina Eustoquio (Editor). 2002. *Micropaleontología*. Ed. Colección de Textos Docentes. España. 643 pp.
- Moore, Webb, Collinson. 1991. *Pollen Analysis*. 2da. Edi. Blackwell Science. Gran Bretaña. 216 pp.
- Ortega-Ramírez J. 1995. Los paleoambientes Holocénicos de la Laguna de Babicora, Chihuahua, México. *Geofísica Internacional*. 34: 107-116.
- Ortega Ramírez J, Valiente Banet A, Urrutia Fucugauchi J, Motera Gutierrez C, Alvarado Valdez G, 1998. Paleoclimatic changes Turing Turing the Late Pleistocene-Holocene in Laguna Babicora, near Chihuahua Desert, Mexico. *Canadian Journal of Earth Science*. 35: 1,168-1,179.
- Palacios-Fest, M., Carreño, A. L., Ortega-Ramirez, J. R., Alvarado-Valdez, G., 2002. A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babicora, Chihuahua, Mexico based on ostracode paleoecology and trace element shell chemistry. *Journal of Paleolimnology* 27: 185-206.
- Palacios-Fest Manuel R., Carreño Ana Luisa, Ortega Ramírez José R. & Alvarado Valdez Guillermo. 2006. A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babicora, Chihuahua, Mexico based on ostracode paleoecology and trace element shell chemistry. *Journal of Paleolimnology* 27: 185-206.
- Palacios R. y Arreguín (Edit.). 1990. *M.L Palynologica et Plaeobotanica*. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas IPN. V2. N.1. 101 pp.
- Parker A. J., 1980. Site preferences and community characteristics of *Cupressus arizonica* Greene (Cupressaceae) in southeastern Arizona. *Southwestern Naturalist*. Vol 25. 1: 9-22.
- Passini Marie-Françoise, 1982. Los Pinos piñoneros del grupo "Cembroides" de México. Recursos Genéticos Forestales. <http://www.fao.org/docrep/006/p8760s/P8760S09.htm> consultado en febrero del 2014.
- Pérez-Cruz Ligia, 2013. Hydrological changes and paleoproductivity in the Gulf of California during middle and late Holocene and their relationship with ITCZ and North American Monsoon variability. *Quaternary Research*. 79: 138-151.
- Quiroz Jiménez David Jesús. 2012. Variabilidad climática de los últimos 80 ka cal aP en el norte de México con *Proxies* geoquímicos en sedimentos lacustres [Tesis de Maestría] México: UNAM.
- Rzedowski J. 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México. 431 pp.

- Rzedowski J. 2006. Vegetación de México. 1a. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 504 pp.
- Rodríguez Amenábar C. y Ottone E.G. 2003. La aplicación de *Botryococcus* (Chlorococcales) como indicador paleoambiental en el Triásico de Argentina. *Revista Española de Micropaleontología*. 35 (2): 161-169.
- Roy P. D., Caballero M., Lozano R., Pi T., Morton O., 2009. Late Pleistocene-Holocene geochemical history inferred from Lake Tecocomulco sediments, Basin of Mexico, Mexico. *Geochemical Journal*. 43: 49-64.
- Roy Priyadarsi D., Quiroz-Jiménez Jesús D., Pérez-Cruz Ligia, Lozano-García Socorro, Metcalfe Sarah E. Metcalfe, Lozano-Santacruz Rufino, López-Balbiaux Nayeli, Sánchez-Savala José Luis, Romero M. Francisco. 2012. Late Quaternary paleohydrological conditions in the drylands of northern Mexico: a summer precipitation proxy record of the last 80 cal ka BP. *Quaternary Science Reviews*. 1-13.
- Roy Priyadarsi D., Jonathan Muthuswamy P., Pérez-Cruz Ligia L., Sánchez-Córdova María M., Quiroz-Jiménez Jesús D., Romero Francisco M. 2012a. A millennial-scale Late Pleistocene-Holocene palaeoclimatic record from the western Chihuahua Desert, Mexico. *Boreas*. 41: 707-717.
- Roy P. D., Caballero M., Lozano S., Morton O., Lozano R., Jonathan M. P. Sánchez J. L., Macías M.C. 2012b. Provenance of sediments deposited at paleolake San Felipe, western Sonora Desert: Implications to regimes of summer and winter precipitation during last 50 cal kyr BP. *Journal of Arid Environments*. 81: 47-58.
- Roubik David W. y Moreno P. Jorge Enrique. 1991. Pollen and Spores of Barro Colorado Island. *Monographs in Systematic Botany*. Vol. 36. Estados Unidos. 268 pp.
- Saenz de Rivas Concepción. 1978. Polen y Esporas (Introducción a la palinología y Vocabulario palinológico). H. Blume Ediciones. España. 219 pp.
- Sánchez-Córdova M. M., 2012. Registro paleoclimático de los últimos 34,000 años cal. A.P., en la Laguna de Babícora, desierto de Chihuahua. [Tesis de Maestría] México: UNAM.
- Sanchez-Goñi, M. F., Harrison, S. P., 2010. Millennial-scale climate variability and vegetation changes during the last glacial: concepts and terminology. *Quaternary Science Reviews*. 29: 2823-2827.
- Sarmaja-Korjonen, K., Seppänen, Ole, B. 2006. *Pediastrum* algae from the classic late glacial Bolling So site, Denmark: Response of aquatic biota to climate change. *Review of Paleobotany and Palynology* 138: 95-107.
- Servicio Geológico Mexicano, 1998. Carta Geológico-Minera Buenaventura, Chihuahua, escala 1:250,000. H13-7.
- Shackleton, N. J., 1969. Oxygen Isotopes, Ice Volume and Sea Level. *Quaternary Science Reviews* 6: 183-190.

- Shih Jessica G., Finkelstein Sarah A., 2008. Range dynamics and invasive tendencies in *Thypha Latifolia* and *Thypha Angustifolia* in eastern North America derived from herbarium and pollen records. *Wetlands*. 28: 1-16.
- Smol John P., Birks H. John B., Last William M. (eds), 2001. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers. Estados Unidos. 371 pp.
- Smykatz-Kloss Werner, Roy Priyadarsi D. 2010. Evaporite mineralogy and major element geochemistry as tools for palaeoclimate investigations in arid regions: A synthesis. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol. 62. 3. 379-390.
- Sousa Susana 2013. El Holoceno Tardío en el Occidente de México: El registro palinológico y geoquímico del lago crater de Santa María del Oro, Nayarit. [Tesis de Doctorado] México: UNAM.
- Stokes Chris R., Tarasov Lev, Dyke Arthur S., 2012. Dynamics of the North American Ice Sheet Complex during its inception and build-up to the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*. 50: 86-104.
- Torres-Rodríguez Esperanza. 2010. Evidencias de cambio climático durante el Pleistoceno-Holoceno en la región occidental de México a través del análisis palinológico en sedimentos del lago de Zirahuén, Michoacán. [Tesis de maestría] México: UNAM.
- Torres-Rodríguez Esperanza, Lozano-García Socorro, Figueroa-Rangel Blanca. 2012. Cambio ambiental y respuestas de la vegetación de los últimos 17,000 años en el centro de México: el registro del lago Zirahuén. *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*. Vol. 29 3: 764-778.
- Traverse A. 1988. *Paleopalynology*. Unwin Hyman. Estados Unidos. 600 pp.
- Tseng- Chieng Huang. 1972. *Pollen Flora de Taiwan*. Nation Taiwan University. Botany Department Press. Taiwan. 297 pp.
- Universidad de Arizona. *Palinology*. <http://www.geo.arizona.edu/palynology/>. consultado en 2012.
- Urrutia-Fucugauchi J., Ortega-Ramírez J. y Cruz-Gartica R. 1997. Rock-magnetic study of Late Pleistocene-Holocene sediments from the Babícora lacustrine basin, chihuahua, Northern Mexico. *Geofísica International* Vol. 36. 2:77-86. Van Der Hammen (Editor). 1984. *The Quaternary of Colombia*. Vol.10. *Vegetational and Climate*. Alemania. 368 pp.
- Villarreal-Quintanilla José A y Encina-Domínguez. 2005. Plantas vasculares endémicas de Coahuila y algunas áreas adyacentes, México. *Acta Botánica Mexicana*. 70:1-46.
- Warner B.G. 1990. *Methods in Quaternary Ecology*. Geoscience Canada Reprint. Estados Unidos. 170 pp.

- Wehr John D. y Sheath G. Robert. (ed.). 2003. *Freshwater Algae of North America. Ecology and Classification*. Edi. Academic Press. EEUUA. 918 pp.
- Whitney Bronwen S. y Mayle Francis E. 2012. The potential of *Pediastrum* species as indicators of lake-level change in tropical South America. *Journal of Paleolimnology*. 147:601-6015.
- Wolff E.W., Barbante C., Becagli S., Bigler M., Boutron C.F., Castellano E., M. de Angelis, Federer U., Fischer H., Fundel F., Hansson M., Hutterli M., Jonsell U., Karlin T., Kaufmann P., Lambert F., Littot G.C., Mulvaney R., Rothlisberger R., Ruth U., Severi M., Siggaard-Andersen M.L., Sime L.C., Steffensen J.P., Stocker T.F., Traversi R., Twarloh B., Udisti R., Wagenbach D., Wegner A. 2010. Changes in environment over the last 800,000 years from chemical analysis of the EPICA Dome C ice core. *Quaternary Science Review* 29:285-295.
- Zouhar Kris. 2003. *Tamarix spp.* In: *Fire Effects Information System*, [Online]. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory (Producer). <http://www.fs.fed.us/database/feis/>. Consultado en agosto del 2014.