

# UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

PALEOAMBIENTES DEL PLEISTOCENO TARDIO  
(ca. 34 000 años BP) A PARTIR DE UN NUCLEO DE  
SEDIMENTO DE LA CUENCA EL AGUAJE DEL  
CABALLITO BLANCO, NW DE LA SIERRA MADRE  
OCCIDENTAL (MAYCOBA, SONORA, MÉXICO)

## TESIS

Que para obtener el Grado de:  
Geólogo

PRESENTA:

ANTONIA LOPEZ HIGUERA

Hermosillo, Sonora, Marzo de 2003



RIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



EL SABER DE MIS HIJOS  
 HARÁ MI GRANDEZA

**NOMBRE DE LA TESIS:**

**"PALEOAMBIENTES DEL PLEISTOCENO TARDIO (ca, 34,000 AÑOS BP)  
 A PARTIR DE UN NUCLEO DE SEDIMENTO DE LA CUENCA EL AGUAJE  
 DEL CABALLITO BLANCO, NW DE LA SIERRA MADRE  
 OCCIDENTAL MAYCOBA, SONORA, MEXICO"**

**NOMBRE DEL SUSTENTANTE:**

**ANTONIA LOPEZ HIGUERA**



BIBLIOTECA  
 DE CIENCIAS EXACTAS  
 Y NATURALES

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

**DR. FRANCISCO ABRAHAM PAZ MORENO**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

**DR. ROGELIO MONREAL SAAVEDRA**

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

**M.C. MARGARITA DE LA O VILLANUEVA**

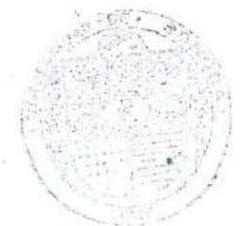
El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuada, como requerimiento parcial para obtener el Título de Geólogo en la Universidad de Sonora.

**DRA. MA. CRISTINA PEÑALBA GARMENDIA**

**ATENTAMENTE  
 "EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA"**

**GEOL. J. ISMAEL MINJAREZ SOSA  
 Jefe de Departamento**

**JIMS\*ag**



EL SABER DE MIS HIJOS  
 HARÁ MI GRANDEZA  
 DEPARTAMENTO DE  
 GEOLOGÍA

60 AÑOS GENERANDO FUTURO, GENERANDO SABER





*A mis padres a quienes amo, admiro y respeto.*

*A mis hermanos con todo mi cariño.*

*Gracias por ser mi familia.*

*Con todo mi amor a Hannes.*

## Agradecimientos



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

Mi mayor agradecimiento a mis asesores de tesis María Cristina Peñalba, por la constante ayuda que me ha brindado en todo momento a lo largo de mi trabajo, por sus críticas y comentarios que mejoraron mucho la calidad de mi trabajo y por enseñarme esta maravillosa área de "Palinología". Así mismo quiero agradecer Francisco A. Paz por su apoyo y los consejos que me ha dado a lo largo de mi carrera y de mi trabajo de tesis, que sin duda alguna me han servido muchísimo.

Mi agradecimiento a mi maestra y amiga Margarita de la O por sus sugerencias, sus comentarios, por darme parte de su tiempo cuando la he necesitado y su ayuda en el análisis granulométrico que fue muy importante para mi trabajo de tesis, muchas gracias.

Al maestro Carlos Duarte por su ayuda en el análisis de difracción, por sus consejos, su amistad y su interés en mis estudios siempre y por facilitarme el laboratorio de Cristalografía y Geoquímica del Departamento de Geología para realizar este análisis.

Agradezco al maestro Saúl Herrera por su amistad, su ayuda en el trabajo de campo y sus momentos de diversión.

A Hannes Löser muchas gracias por tu ayuda en campo y en mi trabajo, por tus críticas y sugerencias y por tu apoyo en todo momento.

Gracias a Tom Van Devender y Ana Lilia Reina quienes descubrieron el sitio de estudio y nos acompañaron a conocerlo, también por su valiosa información sobre la vegetación del área.

A Ronaldo Herrera por facilitarme el acceso al laboratorio de Metalurgia para el tratamiento con Laser Coulter.

A Michel Thinon por la determinación de los fragmentos de carbón.

A Jorge Ledesma por proporcionarme información sobre Difracción de Rayos-X.

La datación  $^{14}\text{C}$  fue financiada por el Instituto de Ecología de la UNAM.

La extracción del polen de los sedimentos se llevó a cabo en el laboratorio químico del Instituto de Geología. UNAM, Estación Regional del Noroeste.

Gracias a los miembros del jurado Rogelio Monreal y Margarita de la O por aceptar la revisión del trabajo, por sus comentarios y sus sugerencias.

A mis amigas: Lizeth Larios por su ayuda en el laboratorio, Marielos Quintana por los datos que me proporcionaste sobre la vegetación del sitio, Anabel Díaz, Elizabeth Vázquez y Fernanda Solís gracias por estar al pendiente de mi trabajo.

A Francisco Molina y a Clara Tinoco por la ayuda que brindaron siempre.

Gracias a la familia Coronel Higuera por su cariño e interés en mis estudios.

A mi tía Margarita por su ayuda y su apoyo a lo largo de mi carrera.

A Marianne y Hermann Löser por estar al pendiente de mi trabajo y por la confianza que me han brindado.

Gracias a mis padres y a mis hermanos por su apoyo, su confianza y su amor incondicional.

Y a todas aquellas personas que de alguna manera intervinieron en mi formación profesional.



<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>3</b>
<b>Lista de Tablas.....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPITULO 1 – Introducción.....</b>	<b>6</b>
1.1 OBJETIVOS .....	7
1.2 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
<b>CAPITULO 2 - Aspectos generales.....</b>	<b>10</b>
2.1 PALEOECOLOGÍA .....	10
2.2 VARIACIONES PALEOAMBIENTALES DEL CUATERNARIO .....	10
2.3 ESTUDIOS PALEOECOLÓGICOS Y PALEOAMBIENTALES SOBRE EL WISCONSIN EN EL NOROESTE DE MÉXICO Y EL SUROESTE DE E.U.A. ....	13
2.3.1 <i>Centro de México</i> .....	14
2.3.2 <i>Norte y noroeste de México</i> .....	14
2.3.3 <i>Suroeste de E.U.A.</i> .....	15
2.4 PALINOLOGÍA.....	16
2.5 FUNCIÓN Y MORFOLOGÍA DEL POLEN.....	17
<b>CAPITULO 3 - Area de estudio.....</b>	<b>21</b>
3.2 GEOLOGÍA.....	21
3.3 CLIMA.....	23
3.4 VEGETACIÓN REGIONAL Y LOCAL.....	23
<b>CAPITULO 4 - Metodología.....</b>	<b>25</b>
4.1 TRABAJO DE CAMPO .....	25
4.1.1 <i>Extracción del núcleo</i> .....	26
4.2 TRABAJO DE LABORATORIO .....	27
4.2.1 <i>Obtención de muestras para los diferentes análisis</i> .....	27
4.2.1.1 Muestreo para polen.....	27
4.2.1.2 Muestreo para Análisis Granulométrico .....	29
4.2.1.3 Muestreo para el Porcentaje de Materia Orgánica.....	30
4.2.1.4 Muestreo para Difracción de Rayos X.....	30
4.2.2 <i>Desarrollo de métodos</i> .....	31
4.2.2.1 Tratamiento Químico para extracción de polen.....	31

4.2.2.2 Montaje de Muestras.....	33
4.2.2.3 Cuento y determinación de granos de polen y esporas al microscopio óptico.....	34
4.2.2.4 Tratamiento de datos de polen.....	37
4.2.2.5 Interpretación del diagrama polínico.....	37
4.2.3 Análisis granulométrico mediante láser Coulter.....	38
4.2.4 Análisis de arcillas por difracción de rayos-X.....	39
4.2.4.1 Preparación de muestras de arcillas para el análisis por difracción de rayos-X.....	39
4.2.4.2 Preparación en portaobjetos.....	41
4.2.4.3 Tratamiento de arcillas durante el análisis.....	42
4.2.4.4 Descripción de difractogramas.....	42
4.2.4.4 Interpretación de Difractogramas.....	43
4.2.5 Contenido de materia orgánica por el método de ignición.....	45
4.3 DATACIÓN DEL NÚCLEO.....	46
<b>CAPITULO 5 - Resultados.....</b>	<b>47</b>
5.1 ESTRATIGRAFÍA DEL NÚCLEO.....	47
5.2 ANÁLISIS POLÍNICO.....	49
5.2.1 Descripción del diagrama.....	49
5.2.2 Interpretación del diagrama.....	51
5.3 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (LASER COULTER).....	54
5.4 ANÁLISIS DE ARCILLAS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X E INTERPRETACIÓN DE DIFRACTOGRAMAS.....	58
5.5 CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA.....	62
<b>CAPITULO 6 - Discusión.....</b>	<b>66</b>
6.1 EVOLUCIÓN DEL PAISAJE VEGETAL.....	66
6.1.1 El bosque de pino-encino ( <i>Pinus-Quercus</i> ).....	66
6.1.2 Poblaciones de Pinabete ( <i>Picea</i> ) y abeto ( <i>Abies</i> ) en el Wisconsin medio.....	67
6.1.3 Árboles del bosque mesófilo de montaña: <i>Ostrya</i> y <i>Tilia</i> .....	69
6.1.4 Sabinos y Táscales (familia de las Cupresáceas).....	71
6.1.5 Pastos ( <i>Poaceae</i> ).....	71
6.2 EVOLUCIÓN DE LA CUENCA.....	72
<b>CAPITULO 7 – Conclusiones.....</b>	<b>76</b>
<b>BILIOGRAFIA.....</b>	<b>79</b>
<b>LAMINA 1.....</b>	<b>86</b>



## Lista de Figuras

<b>Figura 1a.</b> El Cuaternario en la escala de tiempo geológico (modificado de Lowe y Walker, 1997). * El registro terrestre es muy fragmentario, particularmente para América del Norte y corresponde principalmente a los últimos 0.35 Ma. ....	11
<b>Figura 1b.</b> Perfil isotópico ( $\delta^{18}\text{O}$ ) de los pasados 2.6 Ma. obtenido de Foraminíferos bentónicos (Fig. tomada de Lowe y Walker, 1997). ....	11
<b>Figura 2.</b> Registro isotópico marino y unidades climato-estratigráficas terrestres para los últimos 150,000 años (modificado de Lowe y Walker, 1997). ....	12
<b>Figura 3.</b> Localización de la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco en el estado de Sonora. ...	9
<b>Figura 4.</b> Mapa geológico de la región de El Kípor, Este de Sonora. ....	22
<b>Figura 5.</b> Estratigrafía del núcleo CB2 tomado de la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco. ....	48
<b>Figura 6.</b> Diagrama polínico (frecuencias polínicas relativas) del núcleo CB2 del sitio El Aguaje del Caballito Blanco. ....	50
<b>Figura 7.</b> Relación entre la media y desviación estándar del tamaño de grano de las muestras del núcleo CB2 analizadas por Laser Coulter. ....	56
<b>Figura 8.</b> Media y desviación estándar en unidades ( $\phi$ ) del tamaño de grano de las muestras del núcleo CB2 analizadas por Laser Coulter. ....	57
<b>Figura 9a, 9b y 9c.</b> Difractogramas obtenidos para la clasificación de arcillas. ....	59
<b>Figura 10.</b> Porcentajes de materia orgánica y humedad obtenidos por pérdida por ignición en las muestras del núcleo CB2. ....	65
<b>Figura 11.</b> Mapa de distribución de la vegetación en la región de El Kípor. ....	68
<b>Figura 12.</b> Perfiles geológico y de vegetación (A-B-C) de la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco. a. Actual. b. ca. 34,000 años. Ver fig.3 para localización. ....	70
<b>Figura 13.</b> Diagrama polínico sintético, contenido de materia orgánica, humedad y tamaño de grano (media y desviación estándar) del núcleo CB2 de El Aguaje del Caballito Blanco. ....	73



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

## Lista de Tablas

Tabla 1. Muestras obtenidas del núcleo CB2 para el análisis polínico. ....	28
Tabla 2. Muestras obtenidas del núcleo CB2 para el análisis granulométrico con Laser Coulter. .....	29
Tabla 3. Muestras obtenidas del núcleo CB2 para análisis de materia orgánica y humedad. .	30
Tabla 4. Muestras obtenidas del núcleo CB2 para el análisis de difracción de rayos-X. ....	31
Tabla 5. Ejemplos de secuencias de espaciamiento por orden para minerales arcillosos comunes en la interpretación de difractogramas. ....	43
Tabla 6. Grado de clasificación del sedimento mediante los parámetros estadísticos media (M), desviación estándar ( $\sigma$ ) y sesgo (SK) de las muestras del núcleo CB2 analizadas por Laser Coulter. ....	55
Tabla 7a. Contenido de materia orgánica y humedad por el método de pérdida por ignición, para las muestras CB2 – HH, 1, 2. ....	62
Tabla 7b. Contenido de materia orgánica y humedad por el método de pérdida por ignición, para las muestras CB2 – 3, 4, 5. ....	63
Tabla 7c. Contenido de materia orgánica y humedad por el método de pérdida por ignición, para las muestras CB2 – 6, 7, 8. ....	63





Se realizó un estudio multidisciplinario con un enfoque geológico-ecológico en una pequeña cuenca del Cuaternario superior llamada "El Aguaje del Caballito Blanco", situada en la porción noroeste de la Sierra Madre Occidental, Sonora, con el objeto de determinar los paleoambientes geológicos y biológicos asociados a su formación. Esta es una cuenca cerrada enclavada en rocas volcánicas terciarias de edad Oligoceno. El trabajo se basó en la aplicación de distintos análisis (polen, granulometría, contenido de materia orgánica y humedad, y difracción de rayos-X) en un núcleo de sedimento denominado CB2 de 1 metro de potencia, cuya parte superior registró una edad de radiocarbono de  $34,500 \pm 700$  BP (Beta - 170379). Es la primera referencia continental del Wisconsin medio en Sonora y en la Sierra Madre Occidental.

Se identificaron cuatro fases que traducen variaciones en el aporte sedimentario y en la vegetación de la cuenca anteriores a 34 ka BP, y reflejan ambientes climáticos diferentes. La cuenca estuvo cubierta por una tirante de agua continua pero con oscilaciones en el nivel de agua. El sedimento presenta variaciones de tamaño de grano (arenas y limos) y de su clasificación (muy mal clasificado y mal clasificado), tendiendo hacia una menor energía hacia los niveles más recientes, donde la acumulación orgánica es máxima así como el nivel de agua.

Un bosque de pino (*Pinus*) con pinabete (*Picea*) rodeaba la cuenca hoy poblada por encino (*Quercus*) y pino, por lo que se estima que ese tipo de vegetación se extendió en elevaciones al menos 400 metros inferiores a las actuales, lo que fue posible bajo un clima más húmedo y frío que el actual en toda la secuencia y particularmente en las fases primera y tercera. La segunda fase fue relativamente más cálida y seca que las demás, lo que ocasionó un ligero ascenso en los límites altitudinales de distribución del encino (aunque siempre por debajo del límite actual) y la ocurrencia de incendios forestales registrados por fragmentos de carbón y de roca. La fase más reciente es la más húmeda y templado-fría, donde la cuenca logra la mayor estabilidad.

**Palabras clave:** Paleoambientes, Cuaternario, Sierra Madre Occidental, México, Wisconsin medio, polen, granulometría, radiocarbono.

## CAPITULO 1 – Introducción

El Cuaternario representa el período geológico más reciente, que comprende poco menos que los últimos dos millones de años. En consecuencia, su registro es *a priori* el mejor conservado y el que mejor puede compararse con el medio ambiente actual. Por eso cada vez es mayor el interés que le confiere la comunidad científica, y son cada vez más las disciplinas que se incorporan a su estudio.

El interés creciente sobre el Cuaternario se fundamenta además en la posibilidad que confiere su estudio, de estimar y analizar las variaciones climáticas ocurridas en el pasado reciente. Con ello se pueden validar los modelos climáticos diseñados en los estudios de Cambio Global y precisar hipótesis sobre cambios climáticos a futuro.

Se sabe que el Cuaternario incluye una larga sucesión de períodos fríos y calientes que se han denominado períodos glaciares e interglaciares (Lowe y Walker, 1997) y que actualmente se resumen en una cronología isotópica definida por las variaciones climáticas experimentadas en medios oceánicos (Shackleton et al., 1990). El registro continental sin embargo es muy fragmentario y lo es particularmente para el noroeste de México, donde casi se restringe al final del último período glacial y al Holoceno (Van Devender, 1990; Van Devender y Hall, 1994; Anderson y Van Devender, 1995; Ortega Guerrero et al., 1999; Ortega Rosas, 2000; Davis et al., 2002; Lozano García et al., 2002; Rhode, 2002; Ortiz Acosta, 2003, entre otros). La única referencia para la parte media del último glacial (Wisconsin medio) corresponde a Baja California (Ortega Guerrero et al., 1999; Lozano García et al., 2002) y los registros cuaternarios anteriores a dicho período son escasos y restringidos a la zona costera (Ortlieb, 1986).

El presente trabajo muestra el estudio detallado de una secuencia sedimentaria continental de 1 metro de espesor que data del Wisconsin medio y constituye el primer registro para este período en Sonora y en la Sierra Madre Occidental. El sitio de estudio es una pequeña cuenca cuaternaria enclavada en un marco geológico de volcanismo oligocénico. Se pretende dar un enfoque multidisciplinario geológico – ecológico, mediante la aplicación de diferentes metodologías: cartografía geológica y de la vegetación, análisis polínico, granulométrico, del contenido de materia orgánica y

humedad, y análisis de difracción de rayos-X. Se persigue como objetivo la presentación de una metodología de trabajo para los estudios de Cuaternario y la obtención de los primeros datos del Wisconsin medio para la región.

### **1.1 Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es establecer la morfología, los límites y la génesis de la "cuenca" del Aguaje del Caballito Blanco, así como determinar los paleoambientes asociados a algunos depósitos orgánicos que afloran en ella.

Para los procesos de reconstrucción paleoambiental es necesario primero, establecer una estratigrafía para cada localidad con el fin de desarrollar un sistema o estructura geológica para la investigación; segundo, el análisis de datos proxy de estas secuencias estratigráficas para producir información básica paleoambiental; tercero, establecer una cronología de eventos que incluyen el desarrollo de un sistema de datación; cuarto, la conexión de secuencias individuales de diferentes localidades por correlación; y finalmente la integración de las diferentes líneas de evidencia para generar una síntesis de paleoambientes en general.

Dentro de este objetivo general se tienen varios objetivos específicos a desarrollar, como son:

- Reconstruir la historia geológica de la cuenca tanto a nivel regional como local, a partir de la fotointerpretación y cartografía geológica en campo.
- Establecer el origen de los sedimentos, caracterización y clasificación.
- Precisar el tiempo de depositación de los sedimentos de la ciénega El Aguaje del Caballito Blanco (EACB).
- Determinar mediante el análisis polínico los cambios ocurridos en la vegetación de la "cuenca" El Aguaje del Caballito Blanco, desde la formación de la ciénega hasta la actualidad.
- Conocer los ambientes sucesivos de depositación asociados a la formación de los niveles orgánicos, inorgánicos y suelo suprayacente en la cuenca EACB.

- Definir los paleoambientes asociados a la formación de la ciénega y de la cuenca en un contexto regional.

### **1.2 Localización del área de estudio**

El estudio se realizó en una pequeña cuenca llamada El Aguaje del Caballito Blanco, situada en la porción sonorenses, al noroeste de la Sierra Madre Occidental (SMO), con coordenadas geográficas 28° 24' 14" latitud norte y 108° 36' 00" longitud oeste (Fig. 3). El acceso principal es por la carretera México 16 al este de Yécora hasta llegar al kilómetro 334 donde se encuentra la localidad de "El Kípor" (Maycoba, municipio de Yécora), con una altitud de 1594 msnm, en la cual se localiza el aguaje.

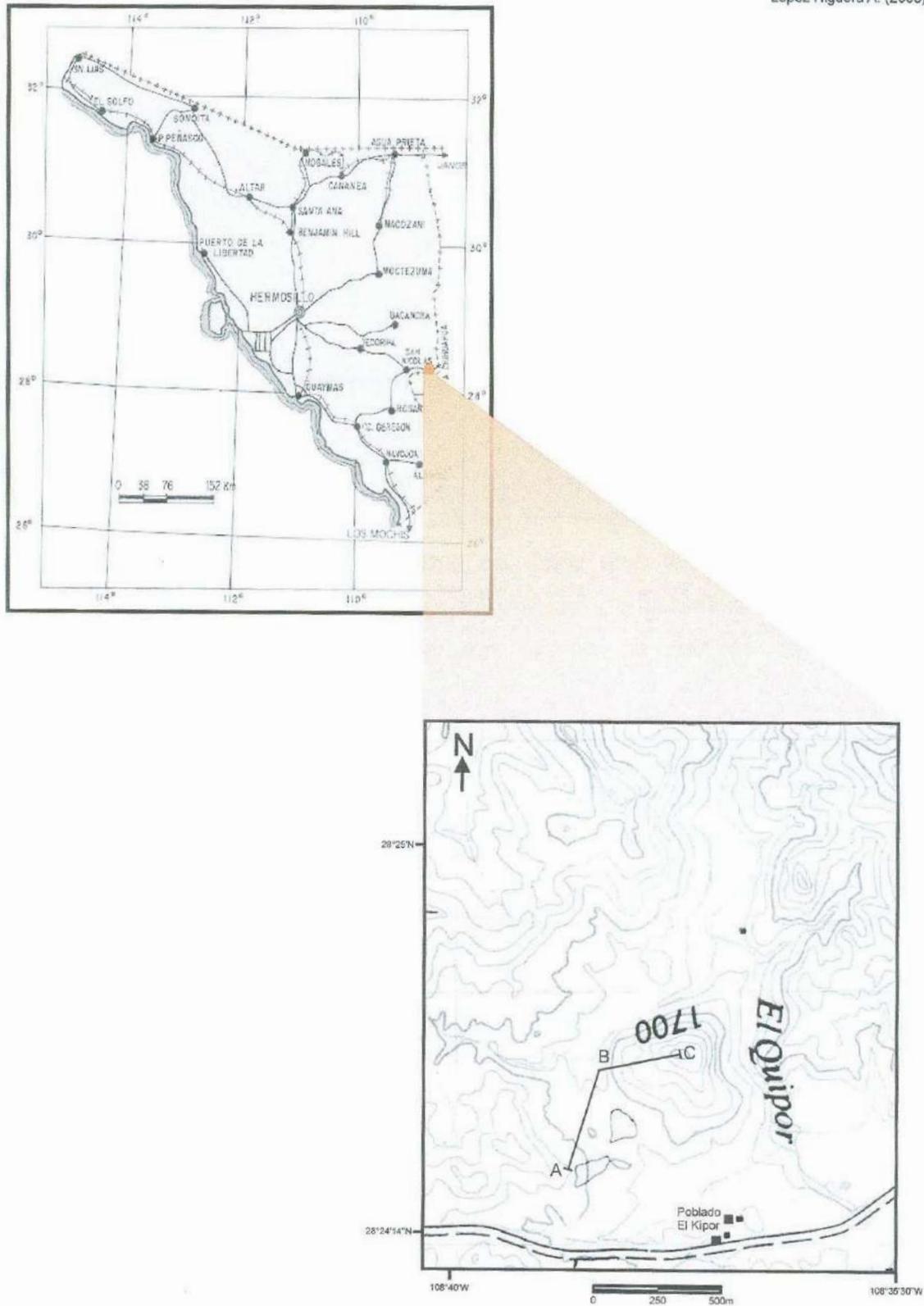


Figura 3. Localización de la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco en el estado de Sonora.

El Cuaternario se ha caracterizado como un periodo de inestabilidad climática y ha sido considerado como un sinónimo de la "Edad de Hielo". Durante el Cuaternario han ocurrido cambios climáticos fuertes como sucesiones de periodos fríos (glaciares),

## **CAPITULO 2 - Aspectos generales**

### **2.1 Paleoecología**

La paleoecología es el estudio de plantas y animales que vivieron en el pasado, así como las interacciones y respuestas de éstos ante los cambios ambientales (Delcourt y Delcourt, 1991). Remanentes de plantas y animales son también usados para subdividir el registro geológico, un campo de estudio conocido como bioestratigrafía.

La evidencia fósil en la cual los estudios paleoecológicos del Cuaternario son basados, se agrupa en dos categorías: evidencia macrofósil, en la cual restos grandes de esqueletos de vertebrados a pequeños fragmentos de plantas o restos animales, pueden ser identificados a simple vista o con bajo poder de magnificación; y la evidencia microfósil, consistiendo de restos diminutos menores de 1mm en tamaño. Estos microfósiles como el polen, diatomeas, otras algas, esporas de hongos y zooplancton sólo pueden ser observados con la utilización de microscopio.

### **2.2 Variaciones paleoambientales del Cuaternario**

El Cuaternario es la subdivisión ó periodo más reciente del registro geológico, que abarca aproximadamente 1.77 millones de años (Lowe & Walker, 1997). En la escala de tiempo geológico, los periodos son convencionalmente divididos en épocas, y el Cuaternario incluye dos intervalos formalmente designados épocas (Hedberg, 1976): el Pleistoceno (significando originalmente la más reciente), el cual finalizó alrededor de aproximadamente 10,000 años (Lowe & Walker, 1997) y el Holoceno (completamente reciente), que comenzó hace alrededor de 10,000 años que es el periodo cálido dentro del cual nosotros vivimos, (Figs. 1a, 1b y 2).

El Cuaternario se ha caracterizado como un periodo de inestabilidad climática y ha sido considerado como un sinónimo de la "Edad de Hielo". Durante el Cuaternario han ocurrido cambios climáticos fuertes como sucesiones de periodos fríos (glaciares),

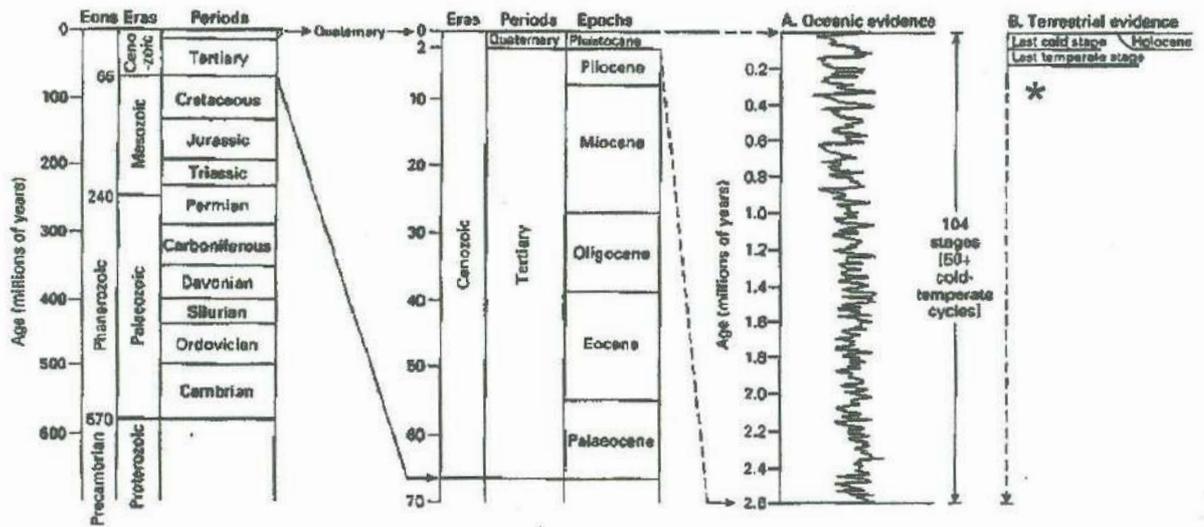


Figura 1a. El Cuaternario en la escala de tiempo geológico (Figura modificada de Lowe y Walker, 1997). \* El registro terrestre es muy fragmentario, particularmente para América del Norte y corresponde principalmente a los últimos 0.35 Ma.

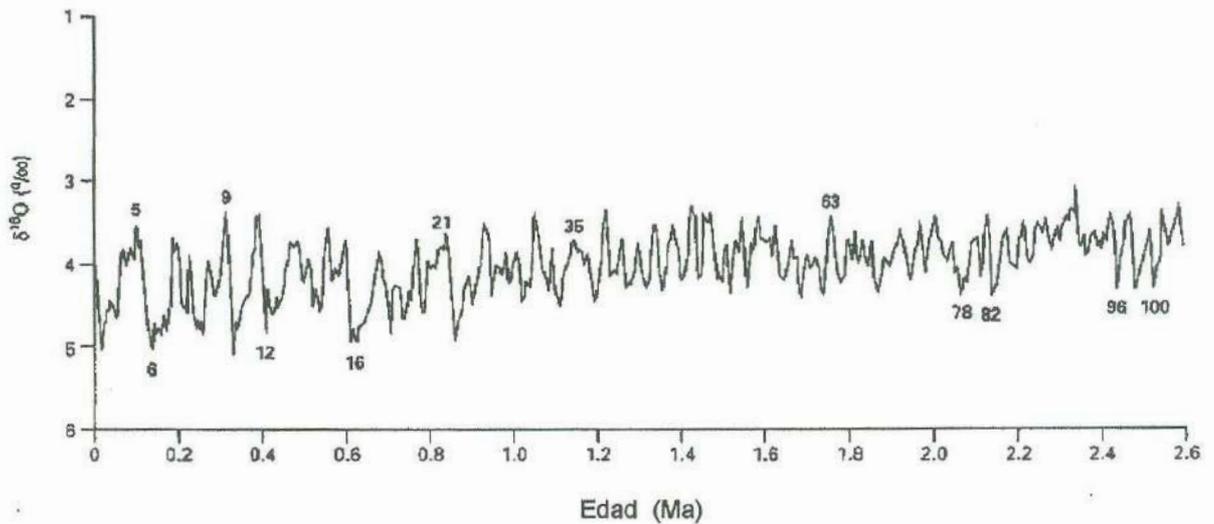
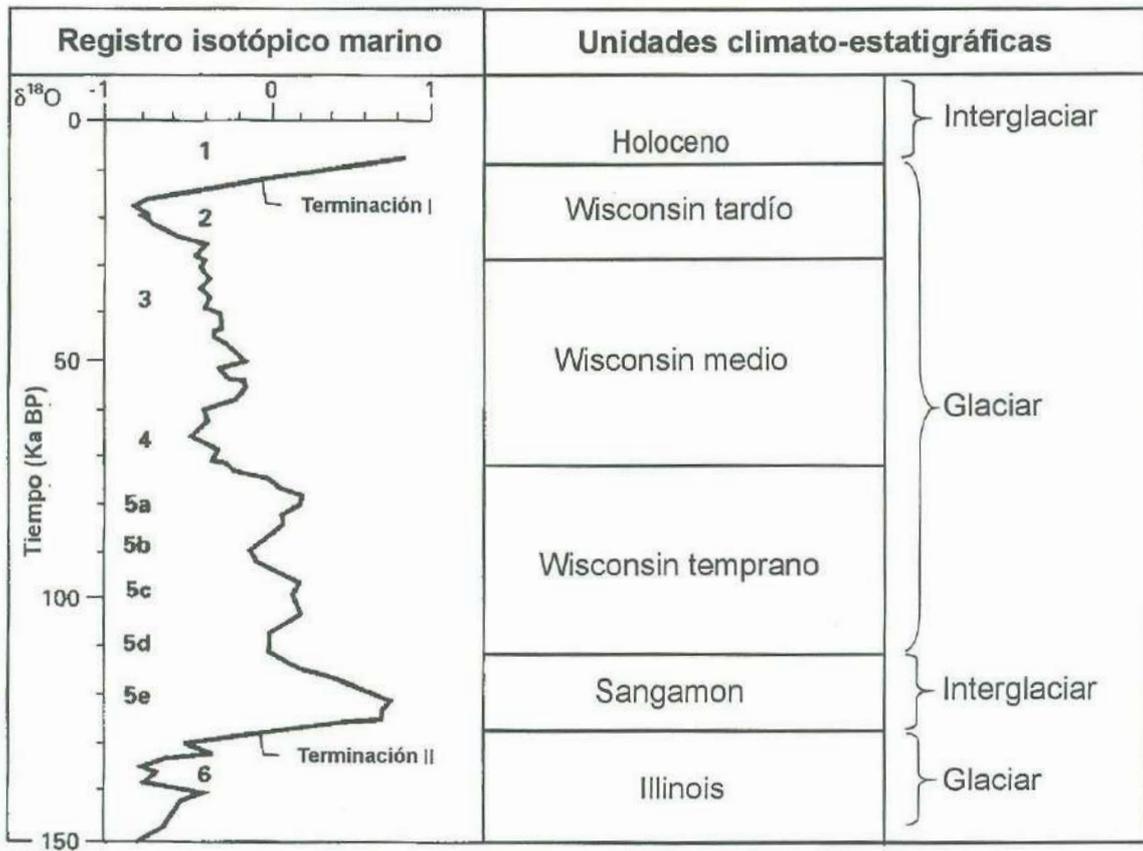


Figura 1b. Perfil isotópico ( $\delta^{18}O$ ) de los pasados 2.6 Ma. obtenido de Foraminíferos bentónicos (Figura tomada de Lowe y Walker, 1997).



**Figura 2.** Registro isotópico marino y unidades climato-estratigráficas terrestres para los últimos 150,000 años (modificado de Lowe y Walker, 1997).

seguidos por periodos cálidos (interglaciares), los cuales dieron origen a la modelación del paisaje y a cambios en la distribución geográfica de las especies de plantas. Estos cambios fueron particularmente intensos en las regiones montañosas y en latitudes altas, donde los periodos glaciares ocasionaron la expansión de hielos en diferentes partes del mundo. Durante los interglaciares, en las regiones de latitudes medias y altas las temperaturas fueron ocasionalmente más altas que en los días presentes.

En este periodo de tiempo (1.77 M.a.) se han registrado alrededor de 70 pulsaciones frías y calientes (Figs.1a, 1b y 2), correspondientes a otros tantos estadíos isotópicos. Las variaciones en la órbita de la Tierra, entre ellas el cambio a una dominancia de la periodicidad de su excentricidad de 100,000 años a partir del Pleistoceno medio (se inicia hace 1 Ma., pero se acentúa desde hace 750,000 años), y constituye un marcapaso de las edades de hielo. Subsecuentemente, la evidencia de variables astronómicas puede ser detectada en un amplio rango de datos proxy incluyendo secuencias de arrecifes de coral, registros de polen, secuencias de loess, núcleos de hielo y sedimentos de lagos tropicales, entre otros.

En las fases frías del Cuaternario, el nivel del mar disminuyó, mientras que sobre la tierra, los árboles de las montañas se desplazaron a elevaciones menores; el hielo y los pastos reemplazaron a los bosques en altitud. En las fases cálidas sucedió el fenómeno inverso. La repetición de cambios climáticos que han ocurrido a través de la historia de la tierra ha ocasionado múltiples cambios biogeográficos con expansiones y regresiones de las áreas de distribución de las especies, con la creación, modificación y desaparición de ecosistemas.

### ***2.3 Estudios paleoecológicos y paleoambientales sobre el Wisconsin en el noroeste de México y el suroeste de E.U.A.***

Los estudios paleoecológicos y paleoambientales del Cuaternario en México se han venido enfocando esencialmente hacia la parte central del país, siendo muy escasos para la parte norte de México, los cuales abarcan el Pleistoceno tardío y Holoceno. Estudios de este tipo se han llevado a cabo también en el SW de Estados

Unidos, la mayoría de ellos presentando grandes similitudes con los realizados en México.

### **2.3.1 Centro de México**

Registros palinológicos enfocados a la parte central de México muestran una reconstrucción de ambientes y observan que el final del Pleistoceno estaba caracterizado por un incremento de humedad entre 35,000 - 21,000 años (Lozano García y Ortega Guerrero, 1998; Ortega Guerrero et al., 2002). Entre 24,000 y 21,000 años, el clima fue cambiando a condiciones más secas y frías. Sin embargo, otro estudio realizado en el lago Chalco centro de México (Caballero Miranda y Ortega Guerrero, 1998) sugiere que entre 30,000 - 14,000 años las condiciones para este tiempo determinadas por las variaciones en el nivel del lago fueron más secas, pero no está claro si este nivel fue determinado por el clima o por condiciones locales.

### **2.3.2 Norte y noroeste de México**

Así mismo, se tienen registros paleoecológicos procedentes de sedimentos de los desiertos Sonorense y Chihuahuense en el norte de México, dos de ellos realizados en el desierto de Chihuahua (Ortega Ramírez et al., 1998; Metcalfe et al., 2002), en Laguna Babícora. Registros de incremento de humedad son obtenidos por la variación del nivel del lago al final del Pleistoceno tardío y Holoceno temprano (18,000 - 8,900 años), seguidos por un periodo más árido en el Holoceno medio. Basándose en estudios sedimentológicos, geoquímicos y estratigráficos, Ortega Guerrero et al. (1999) realizan un estudio para el Desierto Sonorense en la Laguna San Felipe, Baja California, donde el análisis de diatomeas, propiedades magnéticas y sedimentología para los últimos 70,000 años, indican condiciones contrastantes entre el último glacial del Pleistoceno y el Holoceno. Se infieren condiciones secas entre 70,000 y 45,000 años y se caracterizan condiciones húmedas con mayor acumulación de materia orgánica para el periodo entre 34,000 y 19,000 años y que prevalecieron hasta hace 12,000 años. El estudio polínico del mismo sitio (Lozano García et al., 2002) muestra la reconstrucción del Wisconsin medio al tardío (44,000 - 13,000 años), registrándose para el Wisconsin medio un bosque más abierto de tipo chaparral interpretado como una

reducción en los rangos altitudinales de estos bosques abiertos, indicando condiciones húmedas en el área. Para el Wisconsin tardío (a partir de 23,000 años) se registró una dominancia del bosque de *Juniperus*, interpretándose como una expansión del bosque a menores elevaciones durante el último glacial. Esta fluctuación de condiciones climáticas durante el Wisconsin registrada por el análisis polínico, es también reportada por estudios de madrigueras de ratón (packrat middens) que indican un clima más seco para el Wisconsin medio que para el Wisconsin tardío (Van Devender, 1990). Existen contradicciones en la interpretación de los distintos estudios, sin embargo si comparamos la parte centro con la parte norte del país, encontramos que la mayoría de ellos llegan a conclusiones muy similares.

### 2.3.3 Suroeste de E.U.A.

El suroeste de Estados Unidos presenta grandes similitudes con la región de estudio (noroeste de México) en cuanto a geografía, geología y biología, y cuenta con un gran número de trabajos paleoecológicos provenientes del análisis de sedimentos. Un estudio realizado en Arizona (Jacobs, 1985) para el Wisconsin medio alrededor de 65,000 a 23,000 años, determina que los pinos de tipo piñonero en este tiempo tuvieron una mayor dispersión a bajas elevaciones lo que sugiere que el clima para este tiempo fue más frío que el actual, marcado por un periodo de humedad que permitió que los pinos piñones se desarrollaran a más bajas elevaciones. Sin embargo otro estudio realizado también en Arizona (Hevly, 1985) que abarca los últimos 50,000 años infiere que el clima fue más seco entre 41,000 y 35,000 años. Los registros más antiguos que 12,000 años sugieren ambientes mucho más húmedos e indican que muchas especies de elevaciones medias y altas aparentemente fueron desplazadas a más bajas elevaciones. Anderson (1993) concuerda con Jacobs y determina que durante el Wisconsin medio (35,000 - 21,000 años aproximadamente) muchas especies de clima frío y de altas elevaciones como *Picea* y otras coníferas tuvieron una depresión de 460 m en altitud y las temperaturas fueron 5°C más frías durante el verano que el presente. Durante el Wisconsin tardío (21,000 - 10,400 años) se registra que las temperaturas fueron 7°C más frías que el presente, con una depresión en la elevación de la vegetación de 800 m aproximadamente. El clima parece haber sido más fresco y



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

húmedo en el Wisconsin medio, pero mucho más frío y húmedo durante el Wisconsin tardío.

Otros registros que proveen una excelente información sobre la historia climática del suroeste de E.U. y la parte norte de México son los nidos de ratón (packrat middens), los cuales permiten la conservación de restos de plantas durante miles de años (Thompson, 1985; Betancourt et al., 1990). Muchos de ellos indican que durante el Pleistoceno el clima fue más húmedo y las temperaturas fueron más bajas, y que entre 12,000 y 11,000 años fueron apareciendo especies de clima más cálido, por lo que la humedad ambiental fue disminuyendo. Se marca así el comienzo del Holoceno (10,000 años).

#### **2.4 Palinología**

La paleoecología vegetal es la disciplina que estudia los cambios en la cobertura vegetal a través del tiempo, basándose en el estudio de restos fósiles de plantas. Una de las técnicas más utilizadas en estudios de paleoecología ligados a la reconstrucción de ambientes del Cuaternario (Moore et al., 1991; Lowe y Walker, 1997), es la Palinología (Faegri e Iversen, 1989), que estudia el polen y las esporas contenidos en sedimentos. Los estudios de Palinología del Cuaternario nos permiten entender la historia climática y ambiental, haciendo una comparación de la vegetación moderna y la vegetación antigua, ayudando a entender los límites ecológicos modernos de las plantas y comunidades de plantas basándose en el estudio de granos de polen fósil.

La palinología es el estudio de granos de polen (producido por plantas con semillas, angiospermas y gimnospermas) y esporas (producidas por helechos, musgos, algas y hongos) (Moore et al., 1991). Tanto el polen como las esporas necesitan ser transportados para realizar sus funciones adecuadamente, se dispersan en el aire y se depositan en los sedimentos, formando parte de ellos e integrándose a los estratos.

Los sitios idóneos para el estudio paleopalínológico generalmente deben presentar ciertas características particulares para su localización, por ejemplo, humedad ambiental alta, buena acumulación de sedimentos y tipo de vegetación o especies

características. Estos sitios pueden localizarse en mapas topográficos, geológicos, climáticos, o bien, con la ayuda de gente local.

Si la humedad ambiental de la región es alta, se pueden encontrar sitios adecuados de muestreo. Algunas características geomorfológicas permiten la acumulación de agua y sedimentos, y la humedad constante en un sedimento permite la preservación del polen, de lo contrario la oxidación lo degradaría. Los depósitos que presentan buena acumulación de sedimentos en medios ácido-reductores que favorecen la preservación de los granos de polen fósil son depósitos como: ciénegas, lagos, marismas, turberas, etc. Otro indicativo óptimo para el muestreo son especies de hábitat restringido que sólo se encuentran en pantanos, humedales, o especies características de turberas.

El sitio de muestreo debe estar libre de alteración antropogénica, ya que la influencia de humanos o del ganado puede alterar la estratigrafía al desplazarse en el sedimento; estar alejado de la corriente de agua, la cual no permitiría la retención del polen en los sedimentos y presentar buena acumulación de los sedimentos pues tendríamos mayor resolución en el tiempo.

## ***2.5 Función y Morfología del Polen***

Muchas plantas angiospermas y gimnospermas (coníferas) producen grandes cantidades de polen y esporas en las anteras de las flores. Los granos de polen constituyen los gametos masculinos de estas plantas y su función es la fecundación y transferencia del material genético a las flores femeninas para lograr posteriormente la producción de semillas. Para los helechos y otras plantas inferiores en donde la unidad de reproducción son las esporas, éstas dan salida directamente a la siguiente generación (Williams et al., 1994), sin necesidad de fusionar con otra célula.

Cada planta productora de polen o esporas está restringida en su distribución por condiciones ecológicas como la humedad, temperatura y tipo de suelo. Por ello, cada especie se desarrolla mejor en las áreas que mejor llenan las necesidades de la planta.

Los granos de polen y esporas son frecuentemente dispersados en grandes cantidades para maximizar las oportunidades de polinización o crecimiento del gametofito (conjunto de células con la mitad de cromosomas del huevo fecundado, contenidas en el grano de polen), permitiendo mayor acumulación en la superficie del suelo o en cuerpos de agua. Algunos subsecuentemente empezarán a incorporarse y fosilizarse en sedimentos y es la extracción, identificación y determinación del contenido de granos fósiles preservados la que forma las bases de la técnica del análisis de polen (Lowe & Walker, 1997).

Existe gran variedad de medios de transporte para el polen y esporas. Usualmente se transportan por agua, viento ó por aves, insectos u otros animales (incluyendo a humanos). Las plantas angiospermas que producen polen de tamaño pequeño y en grandes cantidades lo dispersan por viento principalmente, en cambio el polen de coníferas es de mayor tamaño pero posee dos sacos o bolsas aéreas que facilitan su dispersión por viento y el transporte a largas distancias (Moore et al., 1991). En plantas en que el polen es transportado por insectos u otros animales, éste a menudo posee en la superficie de sus granos espinas prominentes y material pegajoso que causa adhesión entre el polen y el cuerpo del animal. Generalmente la mayoría de los granos de polen de plantas con polinización aérea tienden a caer a la superficie de la tierra en un pequeño radio de aproximadamente 50 a 100 km de su lugar de dispersión.

Muchos granos de polen y esporas son extremadamente pequeños, pocos sobrepasan un diámetro de 80 a 100  $\mu\text{m}$ , con la mayoría cayendo en un rango de tamaño de 25 a 35  $\mu\text{m}$  (Lowe & Walker, 1997). Un típico grano de polen debido a su función esta equipado con aberturas y superficies esculpturadas con formas distintas. Para entender esta función es necesario conocer las características morfológicas y estructurales de los granos de polen, los cuales se componen de la siguiente manera: la porción central es la célula viva, que es rodeada por una cubierta de celulosa conocida como la **intina**. Ninguna parte de esta porción sobrevive en la forma fósil. La capa externa o **exina** consiste de un saco de material encerado de una notable resistencia, llamado **esporopolenina**, una sustancia cuya composición y estructura todavía no está completamente entendida. La (exina) esporopolenina, permite su identificación después

de la fosilización de los granos de polen, ya que conserva sus propiedades y sus características morfológicas. Consiste predominantemente de monómeros y polímeros de carotenos y ésteres carotenoides ( $C_{90}H_{13}O_3$ ). La primera función de esta pared externa, es la protección del gametofito joven de la desecación y del ataque microbial.

La **pared** o **exina** es caracterizada por una variedad de rasgos morfológicos y estructurales los cuales, junto con el número y distribución de aberturas germinales, el tamaño y forma del grano en general, forman las bases para la identificación del polen y esporas.

Su **estructura** está constituida por una capa basal y una combinación de columnillas o báculos los cuales pueden sostener en un extremo una estructura continua o perforada denominada **téctum**. El téctum puede o no presentar discontinuidades; si las presenta se le conoce como semitectado. Si no existe téctum a los granos de polen se les conoce como intectados.

La **escultura** y la **ornamentación** del grano de polen en términos palinológicos son sinónimas. Se refieren a la superficie del téctum y los elementos suprategmales (elementos encontrados encima del téctum). La cubierta de esporopolenina que recubre al grano, cuando se observa al microscopio, revela no ser lisa y sencilla, sino que presenta espesamientos en forma de arrugas ó crestas paralelas o divergentes; o entrecruzamientos formando retículos, o bien presenta tubérculos salientes más o menos gruesos, puntas, espinas cortas o largas, entre otras (Del Baño Breis, 1990). Las combinaciones de todos estos caracteres morfológicos esculturales del polen y las esporas permanecen constantes dentro de cada especie, y así cada especie diferente produce un único y particular tipo o forma (Von Post, 1916).

Las **aberturas** son áreas en la exina de pólenes y esporas a menudo poco resistentes que permiten la salida del tubo polínico en la germinación y la regulación del volumen hídrico de los granos en función de la humedad ambiente. Los escasos tipos polínicos que carecen de aberturas se llaman inaperturados. La estructura de una abertura se define por los estratos de la exina (o pared polínica que protege al grano contra la sequedad, radiación ultravioleta, etc.), por las alteraciones y modificaciones

que sufran éstos y, por particularidades de sus bordes y superficies (Del Baño Breis, 1990).

Las aberturas son las primeras características notables al microscopio óptico. Hay dos tipos distintivos denominados poros y colpos. Los poros son aberturas isodiamétricas, con terminaciones normalmente redondeadas, mientras que los colpos son aberturas largas con terminaciones puntiagudas. Los granos que presentan poros se denominan porados y con colpos colpados; con ambos componentes se denominan colporados. Dependiendo de la cantidad y la posición de las aberturas se define la terminología.

## CAPITULO 3 - Area de estudio

### 3.2 Geología

Situada en el borde oeste de México, la Sierra Madre Occidental (SMO) representa una extensa cobertura de rocas volcánicas terciarias que se extienden más allá de su límite fisiográfico, de este a oeste, en "sierras y valles" limitados por fallas. Hacia el NW de la SMO, en la región de Yécora-Yepachic, Sonora ocurre una extensiva formación oligocena-miocena (35 a 22 m.a.) de tobas riolíticas y basaltos que fueron depositados sobre los granitoides Laramídicos (90 a 40 m.a.). Esta formación tiene un espesor de 2 km y consiste principalmente de riolitas, en las que se intercalan basaltos andesíticos, formando las modernas mesetas altas de la SMO (Swanson y Walk, 1988; Cochemé y Demant, 1991 y Roldán y Clark, 1992). Dentro de este contexto volcánico Terciario y en las inmediaciones de El Kípor (Fig. 3), se encuentra enclavada la pequeña cuenca pleistocénica El Aguaje del Caballito Blanco.

La geología local consiste principalmente de ignimbritas y basaltos, domos riolíticos y dacíticos de edad Oligoceno (Cochemé, 1985; Delpretti, 1987) (Fig. 4). La fuente principal del aporte de sedimentos son las riolitas silicificadas que constituyen el borde NE de la cuenca (Fig. 4). Estas rocas presentan un hidrotermalismo penetrativo muy intenso que pudo haber ocurrido en la fase terminal de su formación o haber sido producido por el efecto de los eventos volcánicos posteriores los cuales no presentan esta alteración.

El poblado El Kípor se encuentra ubicado en la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco. Esta es una cuenca cerrada que cubre una superficie aproximada de 1.5 km<sup>2</sup>. Existe una acumulación de sedimentos detríticos con un espesor máximo de 6 m que descansan discordantemente sobre las rocas volcánicas ácidas: domos e ignimbritas. El aporte de sedimentos detríticos proviene de la degradación de las rocas volcánicas del entorno y por lo tanto es local, al parecer el aporte externo del sedimento es nulo. En un escarpe del aguaje afloran niveles orgánicos bajo una capa areno-arcillosa de 3 m de espesor. Subyacen otros sedimentos, que no afloran, de los que se extrajo el núcleo CB2 y cuya base descansa directamente sobre la roca firme. El núcleo CB2 consta de

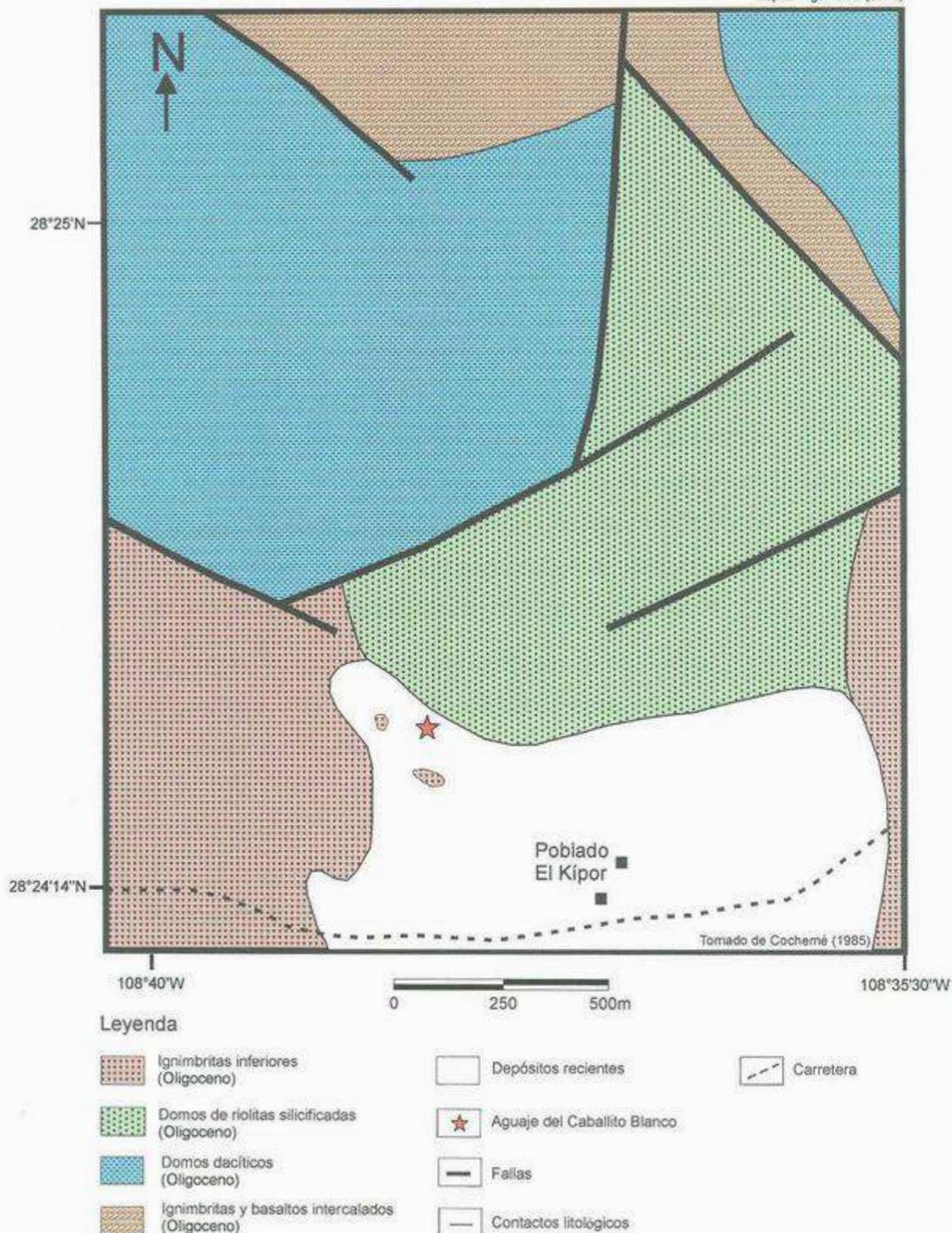


Figura 4. Mapa geológico de la región de El Kípor, Este de Sonora.

especies y es el mayor centro de origen de la flora de la nación (Rzedowski, 1994). Se considera que a elevaciones más altas y en las laderas norte alrededor de los 2300 m

tres niveles: el nivel inferior, formado por arenas muy finas orgánicas de color gris claro, con pequeñas laminillas de carbón intercaladas de 4mm de espesor aproximado. El nivel medio muestra arenas muy finas y limos (hacia la superficie) de color gris-verdoso, con pequeños fragmentos de carbón (0.5 a 4 mm de diámetro) y de roca de (0.5mm hasta 1cm), estos fragmentos de roca son producto de la degradación de rocas volcánicas que afloran en el entorno y sobre las que reposa la secuencia. Finalmente, el nivel superior incluye limos negros muy orgánicos con pequeños fragmentos de carbón de 1 a 3mm, estos mismos limos afloran también en el escarpe.

Los depósitos en la cuenca no se encuentran consolidados y presentan una estratificación subhorizontal. Actualmente la cuenca se encuentra inactiva, disectada y cortada al este y oeste por los cauces de dos arroyos.

### **3.3 Clima**

Según García (1988) de manera general, en la porción de la SMO que comprende a Yécora, Maycoba y parte de Chihuahua se presenta un clima templado lluvioso (Cw), con temperatura media anual de 14.4°C. Las temperaturas más bajas (< -15°C), indicadoras de inviernos pronunciados, sólo se registran en la parte septentrional de la SMO y en algunas regiones adyacentes del Altiplano, en Chihuahua (Rzedowski, 1994). El largo periodo libre de heladas es un factor climático de fundamental importancia para la vida vegetal. En la sierra las primeras lluvias de verano pueden empezar a finales de Mayo y terminar hasta Octubre. El invierno en la sierra también es húmedo presentando algunas precipitaciones y heladas de febrero a marzo. Para el municipio de Yécora se calcula una precipitación media anual de 913 mm (datos de 1962 a 1991, INEGI).

### **3.4 Vegetación regional y local**

En las partes altas al norte de la SMO el tipo de vegetación más extensivo es el bosque de pino-encino. Este tipo de bosque en México es el que posee más riqueza de especies y es el mayor centro de origen de la flora de la nación (Rzedowski, 1994). Se considera que a elevaciones más altas y en las laderas norte alrededor de los 2300 m

de altitud en la SMO aparece un bosque mixto de coníferas como: *Abies*, *Pinus*, *Picea* y *Pseudotsuga*.

En las elevaciones que van desde 1400 a 1900 m es donde encontramos el tipo de vegetación de bosque de pino-encino y bosque de encino, en donde la mayoría de los árboles se encuentra con alturas por debajo de los 8 m (Búrquez et al., 1992). Para la SMO, exceptuando donde hay suelos ácidos alterados en elevaciones bajas (1000 a 1300 m) el bosque de pino-encino decae impredeciblemente dentro de un bosque de encino. Esto es distinguible no sólo en el bosque de pinos; los cuales a bajas elevaciones tienden a ser pequeños y esparcidos; su tamaño, su diversidad y dominancia comparativa incrementa con la elevación; sino que también por especies de encino en particular, por la alta estatura de los árboles, y seguido por la densidad de las poblaciones (Búrquez et al., 1992).

En la región de "El Kípor" la vegetación dominante es el bosque de encino y bosque de encino y pino. De manera general, en el municipio de Yécora el bosque de encino y pino incluye alrededor de 19 especies de *Quercus* y 14 especies de *Pinus*. Dentro de las especies más importantes están: *Quercus chihuahuensis* asociado a *Q. albocincta* y *Q. tuberculata* en elevaciones bajas, y *Q. hypoleucoides*, *Q. oblongifolia* en elevaciones medias, además de *Q. durifolia*, *Q. mcvaughii*, *Q. arizonica*, *Q. toumeyii*, *Q. tarahumara*, *Q. coccolobifolia*, *Q. viminea*. Algunos pinos aparecen en parches dispersos, como *Pinus arizonica*, *P. engelmannii*, *P. herrerae*, *P. lumholtzii*, *P. Maximinoi*, *P. Chihuahuana*, *P. discolor* y *P. yecorensis*, siendo este último junto con *P. engelmannii* una de las especies que sólo predominan en los bosques de encino. Además hay especies de *Juniperus* como *J. coahuilensis* (*J. monosperma*), *J. deppeana*, *J. durangensis*, *J. scopulorum*, *J. flaccida* y *Cupressus lusitanica* (T. R. Van Devender y A. L. Reina G., datos no publicados).

En los bosques de encino y pino las herbáceas dominantes son las compuestas (*Asteraceae*) y los pastos (*Poaceae*). Destacan otras especies arbóreas como: *Alnus*, *Ostrya*, *Acer*, *Arbutus*, *Juglans*, entre otros. T. R. Van Devender y A. L. Reina G. (datos no publicados) presentan un listado exhaustivo de la flora del municipio de Yécora.

## CAPITULO 4 - Metodología



El presente trabajo forma parte de un ensayo de estudio multidisciplinario que pretende tener una perspectiva geológica, apoyada por el análisis polínico. Consistió de trabajo de campo y de laboratorio, aplicándose diferentes metodologías para analizar el sedimento. Se requirió de una serie de técnicas desde la localización del punto apropiado para la extracción del sedimento hasta su análisis detallado en el laboratorio. Los diferentes análisis se describirán detenidamente más adelante.

### **4.1 Trabajo de campo**

Los sitios de estudio idóneos para la realización de trabajos sobre paleopolinología deben ser áreas con gran acumulación de sedimentos y con una humedad constante que permita la preservación de los granos de polen. Además de estas características deben estar libres de alteración antropogénica, de la influencia de humanos y animales, ya que éstos alterarían las características originales de los sedimentos. Como ya se había mencionado antes en el apartado 2.4 estos sitios pueden ser localizados en mapas geológicos, topográficos, climáticos, de vegetación o con la ayuda de gente local. En nuestro caso el sitio fue localizado por Thomas R. Van Devender y Ana Lilia Reina Guerrero, investigadores del ASDM (Arizona Sonora Desert Museum) de Tucson, con la ayuda de Luis Coyote, jefe de la comunidad indígena Pima de El Kípor y se encuentra en las afueras del poblado de El Kípor.

La Sierra Madre Occidental posee una gran diversidad biológica, debido a su elevación, a su relieve variado y a la gran variedad de ambientes y climas que presenta y que la rodean; muestra características idóneas "a priori" para la existencia de sitios de muestreo aptos para el análisis paleoecológico. Dentro de ella, la pequeña cuenca cuaternaria conocida como "El Aguaje del Caballito" que se ha elegido para este estudio reveló características muy favorables, ya que presenta muy buena acumulación de sedimentos y la humedad edáfica local es constante.

Se realizó en campo una cartografía general para verificar la litología y la vegetación de la región de estudio a escala 1:10,000. La localización exacta de la zona se hizo con la ayuda de un GPS, también se recurrió a las cartas INEGI, para obtener la

altitud del lugar y algunos datos fisiográficos. Se tomó como base el plano geológico realizado por Cochemé (1985) y Delpretti (1987) a escala 1:50,000 para tener una idea de la geología y estimar detalles. Posteriormente se cartografió la vegetación, para determinar la cobertura arbórea y la de pastizal actuales, y conocer la repartición geográfica de los géneros *Pinus*, *Quercus* y *Juniperus*.

#### **4.1.1 Extracción del núcleo**

Se buscó en el afloramiento el punto de máxima potencia en los sedimentos, y se vio la posibilidad de sondeo y obtención de sedimentos subyacentes que no afloran. El objetivo de este trabajo fue la obtención de los sedimentos más antiguos del relleno cuaternario, por lo que se sondeó. La extracción del sedimento se hizo con un nucleador manual tipo Livingstone (Wright, 1991), que consiste de un tubo cilíndrico hueco de 1 m de largo y 5 cm de diámetro, con un pistón interno en la base y un manubrio o soporte en el extremo opuesto. El tubo hueco del nucleador es dirigido verticalmente hacia abajo penetrando los sedimentos al mismo tiempo que el pistón queda arriba en el interior del tubo creando una presión negativa lo cual previene la compresión y distorsión de la columna de sedimentos. Después de ser retirada la sonda para recuperar el núcleo de sedimento, se extrae éste del nucleador y se guarda en un tubo de PVC, previamente cortado longitudinalmente a la mitad. Posteriormente se envuelve en una funda de plástico negro para su conservación en el laboratorio fuera del alcance de la luz y conservando su humedad. Una vez extraído el sedimento se anotó la estratigrafía, se guardó nuevamente en el tubo de PVC, se rotuló, se selló con cinta adhesiva y por último se envolvió en bolsas de plástico oscuro grueso, esto para evitar contaminación y preservar la humedad de los sedimentos. Para orientar la secuencia estratigráfica se marcó el lugar de la base y la parte superior del núcleo. Con el nucleador se penetró hasta llegar a una profundidad de 101.2 cm dentro del sedimento. Al extraer el sedimento del nucleador se comprimió a 46 cm. El núcleo obtenido fue denominado Caballito Blanco 2 (CB2), por ser el segundo núcleo que se tomó en dicho sitio.

## **4.2 Trabajo de laboratorio**

El trabajo de laboratorio consistió de varios análisis: de polen, granulométrico, de arcillas por difracción de rayos-X y contenido de materia orgánica por ignición; para esto se aplicaron distintas metodologías. El primer paso en el laboratorio fue hacer una descripción clara y precisa de los sedimentos obtenidos y su secuencia estratigráfica; el segundo, la toma de submuestras para los distintos análisis y el tercero, la realización de los mismos siguiendo la metodología adecuada para cada uno de ellos.

Se realizaron varios submuestreos para los distintos análisis. A continuación se desarrollarán más detenidamente los pasos a seguir para cada submuestreo:

### **4.2.1 Obtención de muestras para los diferentes análisis**

#### **4.2.1.1 Muestreo para polen**

Para el polen, fue necesario asegurarse de que el lugar de trabajo estuviera completamente cerrado, de tal manera que no permitiera la infiltración del polen atmosférico en las muestras, ya que de haber contaminación sería muy difícil de diferenciar un polen contaminante del original. Una vez tomadas las medidas necesarias en el laboratorio, se prosiguió a realizar el submuestreo.

Se hizo un submuestreo a intervalos irregulares en el núcleo, tomando en cuenta los cambios estratigráficos de los sedimentos. Debido a esto se trató de submuestrear lo más a detalle posible en los niveles que contuvieran mayor porcentaje de materia orgánica, ya que en estos niveles se conservan mejor los granos de polen y en los niveles que mostraban menos probabilidad de contener polen se submuestreó a intervalos más espaciados.

El núcleo **CB2** se divide en 3 niveles. El nivel inferior orgánico de 7.6 cm, el nivel medio inorgánico de 29.4 cm y el superior muy orgánico de 9.0 cm. Del nivel inferior se tomaron 5 muestras equidistantes; para el nivel medio se tomaron 5 muestras siendo el intervalo de muestreo variado (de 1, 2.5, 4, 5 y 11 cm) pues este nivel fue el más inorgánico; y por último del nivel superior se tomaron 6 muestras equidistantes.

A continuación se presenta el total de muestras analizadas para este estudio:

**Tabla 1.** Muestras obtenidas del núcleo CB2 para el análisis polínico. Los centímetros indican la profundidad de cada muestra analizada.

Nivel	Número de muestra	Muestras CB2 (profundidad en cm del núcleo extraído)	Profundidad real (cm)
Superior	1	1 - 2	2 - 4
	2	2.5 - 3.5	5.5 - 7
	3	4 - 5	8.8 - 11
	4	5.5 - 6.5	12 - 14
	5	7 - 8	15.4 - 18
	6	8.5 - 9.5	18.7 - 21
Medio	7	12 - 13	26.4 - 29
	8	16 - 17	35 - 37
	9	21 - 22	46 - 48
	10	22 - 23	48 - 51
	11	34 - 35	74.8 - 77
Inferior	12	39 - 40	85.8 - 88
	13	40 - 41	88 - 90
	14	41 - 42	90 - 92
	15	42 - 43	92.4 - 95
	16	43 - 44	95 - 97

Antes del submuestreo se limpió cuidadosamente la superficie del núcleo, evitando así cualquier posible contaminación de la parte expuesta en las muestras antes de aplicar el tratamiento químico.

Para la extracción del polen fósil, con la ayuda de una espátula se cortaron las submuestras de 1 cm<sup>3</sup>, las cuales se pesaron en una balanza granatoria y se guardaron en bolsas de plástico. Para tomar el cm<sup>3</sup> de sedimento se utilizó un muestreador volumétrico, el cual consiste de un tubo cilíndrico que en su interior ocupa 1 cm<sup>3</sup> de sedimento.

#### 4.2.1.2 Muestreo para Análisis Granulométrico

Para este análisis se tomaron 9 muestras de sedimento a distintos intervalos, de tal manera que abarcaran todo el núcleo tomando en cuenta los cambios en la estratigrafía.

**Tabla 2.** Muestras obtenidas del núcleo CB2 para el análisis granulométrico con Laser Coulter. Los centímetros indican la profundidad de cada muestra analizada.

Número De muestra	Muestras CB2 (profundidad real en cm)
1	0 - 1
2	7 - 8
3	14 - 15
4	21 - 22
5	37 - 38
6	51 - 52
7	77 - 78
8	90 - 91
9	95 - 96

Se limpió la superficie del núcleo y con la ayuda de una espátula muy delgada, se tomaron las muestras de sedimento de 1 cm<sup>3</sup>, después se colocaron en pequeños frascos de plástico transparente. Para este análisis es necesario que la muestra esté completamente disgregada, por lo cual se agregó agua destilada a cada una de las muestras una vez en el frasco y se dejaron reposar por toda una noche. Al día siguiente se pasaron las muestras por un agitador, de tal manera que el sedimento que hubiera quedado agrumado, se separa completamente. Una vez desmembrado el sedimento quedó listo para llevar a cabo el análisis.

#### 4.2.1.3 Muestreo para el Porcentaje de Materia Orgánica

Al igual que para el análisis granulométrico se tomaron 9 muestras para analizar el porcentaje de materia orgánica. Se realizó la misma metodología que en los submuestreos anteriores. Primeramente se limpió el núcleo, se cortaron las muestras de sedimento con la ayuda de una espátula y se guardaron en aluminio, para después ser analizadas. La cantidad de sedimento para cada una de las muestras fue de 1 cm<sup>3</sup>.

**Tabla 3.** Muestras obtenidas del núcleo CB2 para análisis de materia orgánica y humedad. Los centímetros indican la profundidad de cada muestra analizada.

Número de muestra	Muestras CB2 (profundidad real en cm)
1	0 – 1
2	7 – 8
3	14 – 15
4	21 – 22
5	37 – 38
6	51 – 52
7	77 – 78
8	90 – 91
9	95 – 96

#### 4.2.1.4 Muestreo para Difracción de Rayos X

Para este análisis se tomaron 3 muestras de sedimento para ser analizado, de las cuales dos pertenecen al núcleo **CB2** y una muestra tomada del perfil de 3 m de espesor, justamente la capa siguiente a la cima del núcleo que aflora en superficie; esta capa conforma los primeros 10 cm de espesor (Tabla 4).

Para tomar cada una de las muestras se limpió como en los casos anteriores la superficie del núcleo y con la ayuda de una espátula se cortaron las muestras de sedimento. La cantidad de muestra que se tomó para este análisis fue aproximadamente de 2 cm<sup>3</sup>. Generalmente la cantidad de material necesaria para este tipo de análisis, es aproximadamente el tamaño de una pelota de golf, con el fin de

tener material suficiente para hacer varias láminas en caso necesario. Sin embargo, para este caso se tomó muy poca cantidad debido a que el núcleo fue pequeño y no permitió extraer más sedimento.

Cada muestra se guardó en un vaso graduado de plástico transparente de 250 ml y se dejaron remojando en agua desionizada durante toda la noche para disgregar la muestra.

**Tabla 4.** Muestras obtenidas del núcleo CB2 para el análisis de difracción de rayos-X. Los centímetros indican la profundidad de cada muestra analizada.

Número	Muestra
1	14 – 15 cm núcleo CB2
2	32 – 33 cm núcleo CB2
3	9 – 10 cm perfil

#### 4.2.2 Desarrollo de métodos

Una vez llevado a cabo el submuestreo, se realizan los distintos análisis, aplicándose la metodología adecuada para cada uno de ellos. A continuación se desarrollarán a detalle:

##### 4.2.2.1 Tratamiento Químico para extracción de polen

El trabajo en el laboratorio es una de las partes que más tiempo consume del total de procesos para esta investigación. Comprende la preparación de muestras de sedimento para el montaje de láminas, mismas que después serán observadas al microscopio y se realizarán conteos de los granos de polen identificados.

Todas las técnicas utilizadas para este fin se basan en el tamaño pequeño de los granos de polen o esporas (en el rango de 8 a 200  $\mu\text{m}$ ). El polen es resistente a cualquier ataque ácido, incluidos ácidos muy fuertes. Sin embargo se degrada en un medio básico.

El tratamiento químico consiste básicamente en desintegrar o disolver la matriz de la muestra de sedimento diferente del polen, para extraer este último. Se necesita eliminar toda la fracción inorgánica y orgánica diferente del polen, de manera que el residuo del tratamiento contenga en lo posible únicamente granos de polen.

La extracción de polen se llevó a cabo por medio de un procedimiento clásico en palinología que consiste de un tratamiento con ácidos fuertes y la utilización de líquidos pesados (Erdtman, 1969; Faegri e Iversen, 1989). Esta técnica tiene como objetivo concentrar el polen y esporas del sedimento de tal manera que se presenten de la mejor forma posible para ser observados al microscopio. Para las 16 muestras se llevó a cabo el mismo procedimiento.

Antes de realizar el tratamiento químico las muestras se dejaron remojando en vasos de precipitado de 250 ml con agua destilada (hasta cubrir la muestra) durante toda la noche. Al día siguiente las muestras de sedimento se tamizaron con un tamiz de 250  $\mu\text{m}$  de malla (No. 35), con el fin de eliminar material mayor como fragmentos de roca, arena y restos vegetales y conservar la mayor parte de polen. El material mayor que 250  $\mu\text{m}$  que quedó en el filtrado, se desechó y la recuperación del material filtrado fue centrifugada a 3000 r.p.m. durante 5 minutos y después se decantó el sobrenadante. Se utilizaron tubos de polietileno de 50 ml de fondo redondo para centrifuga para todo el tratamiento químico.

Básicamente el tratamiento consiste en centrifugaciones, decantaciones y lavados; todas las centrifugaciones se realizaron durante 5 minutos a 3000 rpm. Este tratamiento se describe con más detalle a continuación:

1. Se centrifugaron y decantaron las muestras después de haberlas tamizado.
2. Se agregaron 2 tabletas de *Lycopodium clavatum* con número de lote 938934 para cada muestra. Como se conoce que se pierden bastantes esporas durante el tratamiento (por ejemplo en el filtrado), es preferible agregar una cantidad de esporas mayor que garantice la presencia de esporas en los residuos finales de tratamiento y así, al observarlas al microscopio poderlas contar junto con los diferentes granos de polen de las muestras fósiles. Se bañaron las muestras con

ácido clorhídrico (HCL) al 35 % en frío, aproximadamente 10 ml. El HCL elimina los posibles carbonatos contenidos en la muestra, y fácilmente disuelve las tabletas de *Lycopodium*, pues están compuestas esencialmente de carbonatos. Se centrifugó y decantó, desechando el sobrenadante.

3. Se dio un lavado con agua destilada a cada muestra para eliminar los residuos de HCL. Se centrifugó y decantó.
4. Separación por líquidos pesados. Se agregó politungstato de sodio a una densidad de 1.95 gr/ml. Para controlar la densidad se utilizó un hidrómetro, graduado entre 1.8 y 2 gr/ml. La densidad de 1.95 es muy importante de mantener debido a que esta densidad es más alta que la de los granos de polen, lo que permite que se mantengan en flotación durante este proceso, e inferior a la de la materia inorgánica.
5. Se sellaron los tubos de cada muestra y se agitaron con un agitador eléctrico durante 5 min, con el fin de que la muestra quedara bien mezclada con el politungstato. Se centrifugó y decantó.
6. Se recuperó en otro tubo el sobrenadante y se diluyó con agua destilada bajando así su densidad. Se centrifugó para concentrar el polen en el residuo. El precipitado se conservó.
7. Al residuo de cada muestra se le dió un tratamiento con ácido fluorhídrico en frío (HF) dejándolas reposar durante 1 día. Se centrifugó y se decantó. El HF diluye la sílice contenida en el sedimento.
8. Se dió un lavado con agua destilada. Se centrifugó y decantó.
9. El residuo de cada muestra se pasó a un microtubo de 1.5 ml y se añadió alcohol etílico (dilución 99.9 %). Se centrifugó y se decantó, obteniendo así el residuo final que posteriormente se montó en una lámina delgada y se observó al microscopio.

#### **4.2.2.2 Montaje de Muestras**

El residuo final que queda en el microtubo durante el tratamiento químico, el cual contiene la concentración de polen y esporas, para ser observado al microscopio se

monta en placas. Se utilizaron portaobjetos de 25 x 75 mm y cubreobjetos de 22 x 30 mm. Para el montaje de muestras se siguieron los siguientes pasos:

1. Una vez obtenido el residuo en los microtubos después de haber centrifugado y decantado el alcohol, se dejan reposar las muestras para que el alcohol que haya quedado en el residuo se evapore.
2. Como medio de montaje se utilizó glicerina, debido a que su consistencia semi-líquida proporciona grandes ventajas al momento de observación al microscopio óptico, permitiendo que los granos de polen y esporas puedan girar y regresar a su misma posición las veces que así se requiera, facilitando una mejor identificación de taxones. La cantidad de glicerina que se agregó a cada muestra fue el doble de su volumen, por ejemplo, si el residuo fue de 0.5 ml se agregó 1 ml de glicerina y se mezcló bien hasta obtener un residuo homogéneo.
3. En un portaobjetos se agregó una gota del residuo final una vez mezclado con la glicerina, la cual se distribuyó en el portaobjetos y se colocó el cubreobjetos presionando muy suavemente evitando la formación de burbujas de aire. Se etiquetó el portaobjetos con la profundidad de la muestra o nivel y su origen (CB2).
4. El paso final fue sellar las láminas, para lo cual se utilizó un esmalte de uñas cristalino colocándolo en las orillas de la lámina y se dejaron secar, para después ser vistas al microscopio.

#### **4.2.2.3 Conteo y determinación de granos de polen y esporas al microscopio óptico**

Para el conteo y determinación de granos de polen y esporas, se utilizó un microscopio de luz o microscopio óptico Leica Galen III, con un rango de amplificación de 100 a 1000 (objetivos de 10x, 40x y 100x; y oculares de 10x). El microscopio óptico es el más adecuado para la identificación de polen fósil, ya que es el más fácil de utilizar y más accesible. Existen otros instrumentos ópticos con resoluciones o magnificaciones mayores a las de un microscopio de luz, éstos son los microscopios electrónicos, sin embargo su costo es elevado y la preparación de muestras es más complicada por lo tanto no es muy utilizado en los conteos polínicos fósiles ordinarios.

Antes de comenzar con el conteo se hizo un barrido general de toda la lámina para lo cual se utilizó un objetivo de 10x. Paso a seguir se realizó el conteo y observación de los granos utilizándose el objetivo de 40x. En los casos en donde los granos de polen eran difíciles de identificar fue necesario verlos a una resolución mayor, es decir con un objetivo de 100x a inmersión (1000 aumentos). Para poder utilizar este objetivo es necesario colocar una gota de aceite de inmersión en la zona de la lámina que se está observando. Esta resolución permite ver muy a detalle la escultura y estructura de los granos de polen.

El análisis polínico se basa en la observación de láminas al microscopio óptico para analizar su contenido polínico en cada una de las muestras. Para realizar el conteo de granos de polen y esporas por cada muestra o nivel se hace un barrido de la lámina siguiendo líneas horizontales de izquierda a derecha y de derecha a izquierda utilizando el objetivo de 40 X. El proceso de conteo e identificación de granos de polen se llevó a cabo realizando los siguientes pasos:

1. Se comenzó el conteo en la esquina superior izquierda en cada una de las láminas y se hizo el barrido hacia la derecha y hacia abajo. El microscopio utilizado estaba graduado en el eje X y en el eje Y, por lo cual se pudo llevar un sistema de coordenadas de los transectos o barridos en cada una de las láminas; en cada una de las muestras se inició en la posición 34 del eje X en cada lámina, el segundo nivel fue en la posición 33 en el eje X y así se sigue hasta terminar la lámina. Aproximadamente en cada lámina fueron alrededor de 14 ó 16 líneas barridas, debido a que con ese número se abarcaba la cantidad mínima establecida 500 granos de polen por muestra. En algunas muestras en donde el contenido de polen fue muy pobre, fue necesario contar dos láminas hasta completar la cantidad mínima establecida de granos de polen por muestra.
2. En cada lámina se incluyeron en el conteo los granos de polen y esporas, al igual que las esporas de licopodios agregadas.



3. En una libreta de registro se anotaron los tipos de polen encontrados una vez identificados y la frecuencia ó el número de veces en que aparecía cada taxón en cada una de las muestras.
4. Para la identificación de los granos de polen se utilizaron distintos atlas de polen y catálogos de referencia (Markgraf y D'Antoni, 1978; Martínez Hernández y Ludlow Wiechers, 1978; Lozano-García, 1979; Moore et al. 1991; Martínez Hernández et al., 1993; Jones et al. 1995; Saa Otero et al. 1996; Reille, 1992; 1995; 1998; Peñalba y Búrquez, en revisión; entre otros) así como la colección de láminas de referencia de polen actual del Instituto de Ecología UNAM-ERNO. En los casos en donde no se logró una identificación inmediata, se tomaron las coordenadas (X, Y) de la posición del grano de polen no identificado para un posterior análisis más detallado.

Faegri e Iversen (1989), en experimentos anteriores realizaron gráficas indicando en el eje X el número de granos de polen contados y en el eje Y los diferentes taxones encontrados y se llegó a la conclusión después de varias repeticiones del experimento, que al contar 300 granos de polen y esporas se empezaba a estabilizar la curva lo que indicaba una proporción similar entre el número de granos contados y los taxones encontrados. En otras palabras, se concluyó que al contar más de 300 granos de polen para esas muestras no se observaban cambios en el número de taxones. En nuestro caso el número mínimo establecido fue de 500 granos de polen debido a que la diversidad de taxones fue muy pobre al contar 300 granos de polen.

Otro método o técnica que se siguió para contar los granos de polen y esporas presentes en las muestras fue el de conteos absolutos o frecuencias absolutas, el cual se pudo llevar a cabo gracias a la utilización de marcadores. El principio de esta técnica, como ya se indicó anteriormente, es agregar un número conocido de esporas (marcadores) de *Lycopodium clavatum* a un volumen de material conocido. Durante el conteo de los granos de polen y esporas al microscopio óptico, las esporas exóticas adicionadas fueron contabilizadas al igual que el polen y las esporas originarias en la muestra. Debido a que se conoce la cantidad de licopodios agregados (página 24), el número total de granos de polen fósil por volumen de muestra o nivel se puede obtener por medio de la siguiente fórmula:

$$\text{Polen fósil total} = \frac{\text{No. Total de polen y esporas fósiles contados} \times \text{No. Total de licopodios agregados}}{\text{No. de licopodios contados}}$$

#### 4.2.2.4 Tratamiento de datos de polen

Una vez obtenidos todos los conteos de granos de polen y esporas por muestra al microscopio óptico, son tratados con un programa experto diseñado para el procesamiento de datos polínicos, denominado GPALWIN (Goeury, 1998). Este programa produce gráficas en la forma de diagramas polínicos.

#### 4.2.2.5 Interpretación del diagrama polínico

Los conteos totales para cada nivel o muestra constituyen el espectro polínico. El análisis de una serie de horizontes o niveles puede mostrar cambios en el contenido de polen de uno a otro, los cuales pueden ser interpretados indicando cambios temporales en la cobertura de vegetación en el área de estudio. Estos cambios son representados en los diagramas polínicos, que se expresan generalmente en función de los porcentajes de la suma total de polen y esporas. Se componen básicamente de las siguientes partes:

**Presentación:** el eje vertical representa la profundidad (muestras analizadas) y el eje horizontal la abundancia de los taxones de polen o esporas en términos proporcionales (porcentaje con respecto al total determinado) o absolutos (números de elementos por volumen ó peso de muestra inicial). El núcleo de sedimentos se encuentra estratificado verticalmente en el tiempo, a mayor profundidad tenemos las muestras de mayor edad.

**Curvas polínicas:** las proporciones de los varios tipos polínicos en los diferentes niveles se indican para cada taxón por una curva continua, lo cual permite visualizar con mejor claridad los cambios de vegetación a lo largo del tiempo en forma continua. Aquellos taxones que se presentan en un porcentaje menor al 1%, son representados en el diagrama polínico con un pequeño círculo.

**Orden de los taxones:** generalmente el diagrama polínico es arreglado en grupos de taxones. En nuestro caso en el diagrama que se obtuvo se agruparon los taxones en

tres grupos: al lado izquierdo del diagrama se encuentra el grupo 1, compuesto por plantas del tipo arbóreo; la parte media del diagrama incluye a los arbustos y hierbas que conforman el grupo 2; y hacia el lado derecho se encuentra el grupo 3, el cual incluye las esporas de helechos. Por último en el extremo final derecho se presentan los marcadores (*Lycopodium clavatum*), grupo 4 que nos indica la concentración de polen por nivel de sedimento.

**Diagrama sintético:** al diagrama polínico se agrega también el diagrama sintético, ya que es de gran utilidad porque nos indica la suma de polen de tipo arbóreo (AP), representado por el grupo 1 en relación con la suma de polen no arbóreo (NAP) representado por el grupo 2; esto nos permite tener una visión más clara de los cambios que experimente el paisaje en función de la mayor o menor cobertura arbórea.

Los diagramas polínicos permiten interpretar los cambios de un taxón a lo largo del tiempo y los cambios generales de un espectro a otro. La ventaja que nos brindan los diagramas polínicos es que la información obtenida del análisis de polen es presentada de una forma más clara y compacta.

#### **4.2.3 Análisis granulométrico mediante láser Coulter**

Se realizó el análisis granulométrico, con el fin de determinar la distribución del tamaño de partículas. Para nuestro estudio se analizaron 9 muestras (4.2.1.2 Muestreo para Análisis Granulométrico; p. 29) utilizando el **COULTER LS SERIES CONTROL PROGRAM VERSIÓN 2.11 SUPPLEMENT**, el cual consta de una cámara que hace que las partículas estén girando para que el láser pueda detectarlas.

Antes de llevar a cabo el análisis se hizo una previa preparación de las muestras como se menciona en el apartado 4.4.2, y una vez lista la preparación se comenzó con el análisis siguiendo los siguientes pasos:

1. Se lavó y drenó la cámara del aparato perfectamente, por si acaso contenía residuos de muestras anteriores, y una vez lista la cámara se estabilizó el láser.
2. Después de haber limpiado la cámara y haber estabilizado el láser se agregó la primera muestra. Con una pequeña pipeta se agregaron 3 gotas de muestra a la

cámara. Se hizo la lectura de la muestra y se obtuvo una gráfica de volumen contra el diámetro de la partícula.

3. Se apagó el aparato después de haber analizado la primera muestra. Se lavó y drenó nuevamente hasta quedar completamente limpio, se checó que estuviera bien alineado y después se agregó una segunda muestra. Al igual que la primera se agregaron 3 gotas de muestra.
4. De esta misma manera se fueron analizando cada una de las muestras hasta completar las 9 muestras, obteniendo sus respectivas gráficas. Una vez terminado el análisis se lavó y drenó nuevamente el aparato y se apagó.

El tamaño de grano es una propiedad física fundamental para rocas sedimentarias, porque el tamaño y clasificación de granos sedimentarios pueden reflejar mecanismos de sedimentación y condiciones de depósito. El estudio de datos sobre el tamaño de grano puede ser útil para la interpretación de ambientes de depósito de rocas sedimentarias antiguas.

#### **4.2.4 Análisis de arcillas por difracción de rayos-X**

(Documentación proporcionada por el Dr. Jorge Ledesma-Vázquez; UABC, Ensenada, B.C. y tomada de Moore y Reynolds, 1989).

Los minerales arcillosos son muy sensibles a la temperatura, presión y condiciones químicas dentro del laboratorio. Por ello es conveniente mantener a un mínimo cualquier tratamiento para evitar cambios no deseados a la muestra originalmente colectada.

##### **4.2.4.1 Preparación de muestras de arcillas para el análisis por difracción de rayos-X**

En general para llevar a cabo el análisis por difracción de rayos-X en arcillas es necesario que las muestras tengan una previa preparación realizando los siguientes pasos según las condiciones que requiera el trabajo que se esté realizando:

1. **Disgregación:** las partículas individuales de arcillas son característicamente pequeñas, con diámetros de unas pocas micras, por lo tanto, es importante que las

muestras estén completamente disgregadas antes de intentar concentrar los minerales arcillosos basándose en su tamaño. Aquellas muestras que no se disgreguen fácilmente pueden ser molidas sin ser trituradas, antes de ser colocadas en agua, pues el triturado puede alterar los planos de clivaje de las arcillas, ya que las comprime y produce cizallamiento.

2. **Dispersión:** el tratamiento consiste en lavar la muestra repetidamente con agua destilada o desionizada. La muestra una vez disgregada no necesariamente permanecerá en ese estado, ya que algunas arcillas tenderán a flocularse.
3. **Separación de la fracción por tamaño de arcilla:** La técnica más sencilla y eficiente para separar por tamaño a las partículas es la utilización de la velocidad final de asentamiento en agua, dependiendo de la gravedad específica de minerales arcillosos y el coeficiente de esfericidad que presenta la partícula. El uso de una centrífuga puede acelerar el proceso de asentamiento de las partículas y reducir el tiempo. Es muy común esta técnica para las fracciones más finas.
4. **Deshidratación** de la fracción de tamaño de arcilla: es ideal cuando se tiene un volumen pequeño de suspensión a tratar y se dispone de poco tiempo. Se puede tratar una proporción de la suspensión total, colocándola en tubos para centrífuga y centrifugando a velocidades y tiempos que permitan obtener la porción superior del fluido como una suspensión clara, la cual se decanta y el residuo que queda en el tubo es el contenido de arcillas.

Para nuestro análisis se tomaron 3 muestras (Tabla 4) llevando a cabo la siguiente metodología:

1. Se disgregaron las muestras perfectamente agregando agua desionizada con una pipeta, eliminando grumos grandes de arcilla o minerales arcillosos adheridos a granos de cuarzo (tamaño de arena). La disgregación se realizó de manera manual en un vaso de precipitado de 250 ml pues la consistencia del material lo permitió fácilmente, sin necesidad de utilizar un mortero o técnicas mecánicas como una licuadora o la utilización de un dispersor sónico.

2. Una vez disgregada cada una de las muestras, se lavaron repetidamente con agua desionizada para dispersar el material. Debido a que los materiales arcillosos a altas concentraciones tienden a flocularse, se subdividieron las muestras y se les añadió más agua.
3. Después de obtener el resultado deseado en cada una de las muestras dispersas, se tamizaron con un tamiz de 20 $\mu$ m de acero inoxidable y el material filtrado se tamizó nuevamente con un tamiz de 7 $\mu$ m (malla de nylon NYTEX). El material así filtrado se pasó a microtubos, se centrifugó y se decantó el material flotante. El precipitado que quedó en el microtubo es el contenido de arcillas. Esta pasta de arcillas que quedó en el microtubo es la que se colocó en el portaobjetos.

#### 4.2.4.2 Preparación en portaobjetos

Se pueden utilizar tres técnicas para la preparación de muestras en portaobjetos: **técnica por untado**, **técnica por sedimentación** y **técnica por succión**. En nuestro caso se utilizó la primera técnica, que es la que se describe a continuación:

Esta técnica requiere que las arcillas adquieran una consistencia similar a la de una pasta de dientes o ligeramente menos sólida durante la preparación. Una vez que se obtuvo esta consistencia se colocó una porción del tamaño de un chicharo en un portaobjeto; es importante que el vidrio del portaobjeto sea de alta calidad y que conserve su forma cuando la muestra requiera calentarse. Después se colocó un segundo portaobjeto y suavemente se distribuyó la muestra hasta que su distribución fuera uniforme, asegurando que no se formaran burbujas de aire. Se separaron las láminas lateralmente, con lo cual se generaron dos muestras con pasta de arcilla; la pasta que queda untada en las láminas no deberá tener un grosor mayor que ½ milímetro. Finalmente las láminas que se obtuvieron se dejaron secar por aireación.

Esta técnica presenta ventajas y desventajas; la primera ventaja es que los minerales arcillosos se presentan suficientemente mezclados y por lo tanto son representativos de toda la muestra; la segunda es que las láminas de arcillas mejoran su orientación paralela entre sí durante el untado; y la tercera ventaja es que el proceso de elaboración de las láminas es rápido. Una de las desventajas que presenta es que

durante el untado se genera una orientación paralela de las láminas de arcilla entre si, y por ello puede que las crestas de difracción de rayos-X no sean tan intensas y nítidas.

#### **4.2.4.3 Tratamiento de arcillas durante el análisis**

Una vez que las muestras en los portaobjetos se han secado perfectamente, se encuentra lista para ser analizada por rayos-X. Varios tratamientos químicos y físicos están disponibles, pero el tratamiento de glicol y de calentamiento son los únicos utilizados. Cabe mencionar que los tratamientos pueden aplicarse en forma secuencial en la misma lámina cubierta por arcilla.

Así, se analizaron las láminas o muestras primeramente por rayos-X después de secarse (sin tratamiento). A la misma lámina se le aplicó glicol y se analizó por rayos-X otra vez. Después la misma lámina se calentó a 550°C y fue analizada por rayos-X. Para cada análisis se obtuvo un difractograma.

El hecho de analizar láminas glicolizadas proporciona datos más limpios para el reconocimiento de cuarzo y crestas de feldespato. La glicolización es mayormente utilizada cuando los minerales arcillosos expansibles (comúnmente montmorillonita, una variedad de esmectita) son expandidos a varios grados gracias a las moléculas de agua en muestras de aire seco. El tratamiento por calor logra dos cosas: que el agua y el glicol sean expulsados de las regiones interestratificadas, pudiendo generar cambios detectables en las estructuras de los minerales.

#### **4.2.4.4 Descripción de difractogramas**

Los difractogramas se componen de dos ejes: el eje vertical representa las cuentas por segundo (concentración mineral) en el difractograma, es decir, son los planos cristalinos al difractarse en determinado ángulo. El eje horizontal está representado por la escala 2-Theta que es el ángulo donde comienza a dispararse el rayo o también podemos llamarlo contra ángulo de reflexión. La altura de los picos o crestas en la gráfica va a estar en función de la concentración de la fase mineral. Para poder interpretar con mayor facilidad los difractogramas, es importante conocer los órdenes de crestas de difracción; las crestas más intensas son generadas muy comúnmente por minerales de primer orden. Cuando un mineral arcilloso está bien

cristalizado se presentan crestas de mayor orden de difracción en el padrón del difractograma. Estas crestas presentan una disminución regular progresiva en sus espaciamentos en ángstrom. Con la excepción de la clorita, las crestas presentan generalmente una reducción sistemática en intensidad a un orden mayor. Ejemplos de secuencias de espaciamento por orden hasta el cuarto orden (en unidades de ángstrom) para minerales arcillosos comunes se presentan a continuación (Tabla 5):

<b>Tabla 5.</b> Ejemplos de secuencias de espaciamento por orden para minerales arcillosos comunes en la interpretación de difractogramas.				
<b>Caolinita</b>	1er orden <b>7</b>	2do orden <b>3.5</b>	3er orden <b>2.3</b>	<b>4to orden 1.75</b>
<b>Illita</b>	1er orden <b>10</b>	2do orden <b>5</b>	3er orden <b>3.3</b>	4to orden <b>2.5</b>
<b>Clorita</b>	1er orden <b>14</b>	2do orden <b>7</b>	3er orden <b>4.67</b>	4to orden <b>3.5</b>
<b>Esmectita (montmorillonita)</b>	<b>El espaciamento por orden variará con las posibles variaciones en la posición de la cresta de primer orden.</b>			

El valor de las crestas cambia ligeramente por variaciones en la composición química de los minerales de arcilla individuales.

#### **4.2.4.4 Interpretación de Difractogramas**

Se inicia con el **difractograma glicolizado** tomado después de la glicolización. Primero se busca una cresta que se encuentre entre los 14 y 17 ángstrom. Está será el primer orden de crestas para los minerales arcillosos expansibles (montmorillonita si la cresta es de 17 ángstrom). Después se observa si existe un orden de cresta de clorita a 14 ángstrom (algunas veces es difícil de identificarse, pues la cresta del mineral expansible es tan amplia que se traslapa a la cresta de 14 ángstrom). Se observa si estas crestas están presentes o ausentes. Para verificar el resto de las crestas de

difracción, se realizan dos etapas: se busca las crestas asociadas a cuarzo y feldespatos y después se buscan órdenes mayores de crestas de minerales arcillosos principales. Todas las crestas han sido relacionadas a un mineral, debido a que la radiación secundaria no es perfectamente uniforme, algunas crestas falsas son creadas, siendo generalmente muy pequeñas. La mayoría de las crestas amplias y de baja intensidad no identificadas pueden ser ignoradas.

En la interpretación del **difractograma de tratamiento de calor a 550°C** cualquier cresta que aparece en el difractograma glicolizado a valores de 15 ángstrom deben de haber desaparecido. Si estas crestas siguen presentes, se verifica que la muestra haya sido calentada a la temperatura apropiada. La cresta de clorita (si hay una) debe revelarse claramente. Si está presente, se anota su intensidad. Esto va a reflejar la abundancia de la clorita. La cresta de 10 ángstrom debe ser más larga que en el difractograma glicolizado porque ahora refleja a ambos, la illita y los constituyentes de minerales expansibles colapsados. Se anota la intensidad de la cresta y se resta la intensidad de la cresta de la illita (glicolizada). La diferencia refleja el tipo de los constituyentes de los minerales expansibles y se les puede referir como "delta 10 ángstrom". Este valor se escoge para reflejar a los constituyentes expansibles en vez de la cresta glicolizada de 17 ángstrom, porque el agua y/o moléculas de glicol no contribuyen a la intensidad.

La cresta de 7 ángstrom (si existe una) está relacionada con la caolinita. Si una cresta de 7 ángstrom está presente puede existir una contribución de la cresta de clorita de segundo orden. Entre más rica en Mg sea la clorita, menos contribuirá a la cresta de 7 ángstrom tratada por calentamiento. Estas crestas reflejan la abundancia de sus minerales arcillosos asociados pero no directamente. Cada mineral difracta los rayos-X con diferente intensidad por su única estructura y composición química. Si la cresta de la illita presenta el doble de intensidad que la cresta de la clorita, no necesariamente significa que existe el doble de illita que de clorita en la muestra. No existen estándares confiables para calibrar los valores de intensidad.

Los minerales arcillosos son muy sensibles a las condiciones ambientales del entorno y cambiarán para manifestar esos cambios. Por esta razón es que los

minerales arcillosos son de utilidad para los geólogos o para quien estudia los suelos, al poder describir cambios climáticos a través del tiempo y reconocer las condiciones diagenéticas de temperatura, presión y condiciones químicas que generaron las asociaciones de minerales arcillosos presentes en sedimentos y rocas sedimentarias.

#### 4.2.5 Contenido de materia orgánica por el método de ignición

Para determinar el porcentaje o contenido de materia orgánica en los sedimentos se recurrió a utilizar el método de pérdida por ignición, ya que es una técnica rápida, precisa, sencilla y requiere de equipo normalmente establecido en muchos laboratorios.

Basándonos en Dean (1974) que presenta una modificación del procedimiento descrito por Galle y Runnels (1960) se analizaron 9 muestras, procurando que fueran las de mayor contenido de materia orgánica y se realizó la siguiente metodología:

1. Se metió un crisol de cerámica a una mufla a  $1000^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora, esto con el fin de eliminar toda la humedad o cualquier partícula que tuviera adherida al crisol.
2. Una vez pasada la hora se sacó el crisol de la mufla y se metió a un desecador, para que se enfriara y no pudiera agarrar humedad del medio.
3. Ya frío se pesa el crisol en una balanza bien estable, con cuatro decimales, para determinar el peso total de la muestra al momento de ser pesada.
4. Después se pesó aproximadamente 1gr de muestra con mucha precisión y la balanza bien estable.
5. Una vez que se pesó la muestra en el crisol, se metió al horno a  $100^{\circ}\text{C}$  por toda una noche para eliminar toda humedad.
6. Pasado ese tiempo se sacó del horno y se pasó al desecador para enfriarse. Una vez que se enfrió la muestra se volvió a pesar.
7. Nuevamente se metió al horno a  $550^{\circ}\text{C}$  durante 3 hrs. Después se sacó la muestra, se pasó al desecador para que se enfriara y nuevamente se volvió a pesar.
8. En función de la diferencia de pesos se obtuvo el porcentaje, tanto de materia orgánica como el porcentaje de humedad de cada una de las muestras.



### **4.3 Datación del núcleo**

Existen diferentes técnicas para fechar sedimentos, fósiles ó rocas, como son los métodos radiométricos que se basan en las propiedades radioactivas de ciertos isótopos inestables, que presentan cambios espontáneos en su organización atómica de tal manera que adquieren una forma atómica más estable (Lowe & Walker, 1997). Las edades se establecen en años antes del presente (yr BP), o en miles de años antes del presente (Ka BP). Un método basado en dataciones radiométricas es el de datación por radiocarbono.

Para nuestros fines, la técnica que fue empleada es la de fechamiento por radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ), ya que esta técnica de datación es aplicable y es la más utilizada para materiales pertenecientes al Cuaternario (Lowe & Walker, 1997). Esta técnica puede ser desarrollada mediante dos métodos: el método convencional y el método de espectrómetro de masas. En nuestro caso se utilizó este último. Una muestra de 2.32 gr de sedimento extraída del núcleo CB2 a una profundidad de 6.6 cm fue enviada al laboratorio Beta-Analytic de Florida, Estados Unidos, para su análisis.

## CAPITULO 5 - Resultados

Dentro de un contexto volcánico terciario se encuentra la pequeña cuenca cuaternaria llamada **El Aguaje del Caballito Blanco**, la cual es producto de la degradación de las rocas volcánicas circundantes. Está ubicada en la localidad de El Kípor (Maycoba, municipio de Yécora, Sonora). La vegetación dominante para la región de "El Kípor" está representada por bosque de encino, y bosque de encino y pino. De manera general para el municipio de Yécora la vegetación predominante es el bosque de encino y pino, que incluye además especies de los géneros *Juniperus*, *Alnus*, *Ostrya*, *Acer*, *Arbutus*, *Juglans*, entre otros.

Para realizar el presente estudio se extrajo de la cuenca un núcleo de sedimentos denominado **CB2** cuya base descansa directamente sobre la roca firme y su composición estratigráfica se observará más adelante en una columna esquemática (Fig. 5)

### 5.1 Estratigrafía del núcleo

El núcleo CB2 tuvo una profundidad de 101.2 cm, pero fue comprimido al ser extraído, teniendo una longitud de 46 cm. Prácticamente la secuencia estratigráfica está representada por tres niveles, los cuales se describen a continuación:

**101.2-65.6 cm:** el nivel inferior (intervalo de 46-29.4 cm del núcleo comprimido) formado por arenas muy finas orgánicas de color gris claro, con pequeñas laminillas de carbón intercaladas de 4mm de espesor aproximado.

**65.6-23.3 cm:** el nivel medio (intervalo de 29.4-9.6 cm del núcleo comprimido) constituido por arenas muy finas y limos de color gris-verdoso, con fragmentos de carbón de 0.5 a 4mm y de roca de 0.5mm hasta 1cm: estos fragmentos de roca son producto de la degradación de rocas volcánicas que afloran en el entorno y sobre las que reposa la secuencia.

**23.3-0 cm:** el nivel superior (representa los últimos 9.6 cm de la parte superior del núcleo comprimido) incluye limos negros muy orgánicos con pequeños fragmentos de carbón de 1 a 3mm aproximadamente.

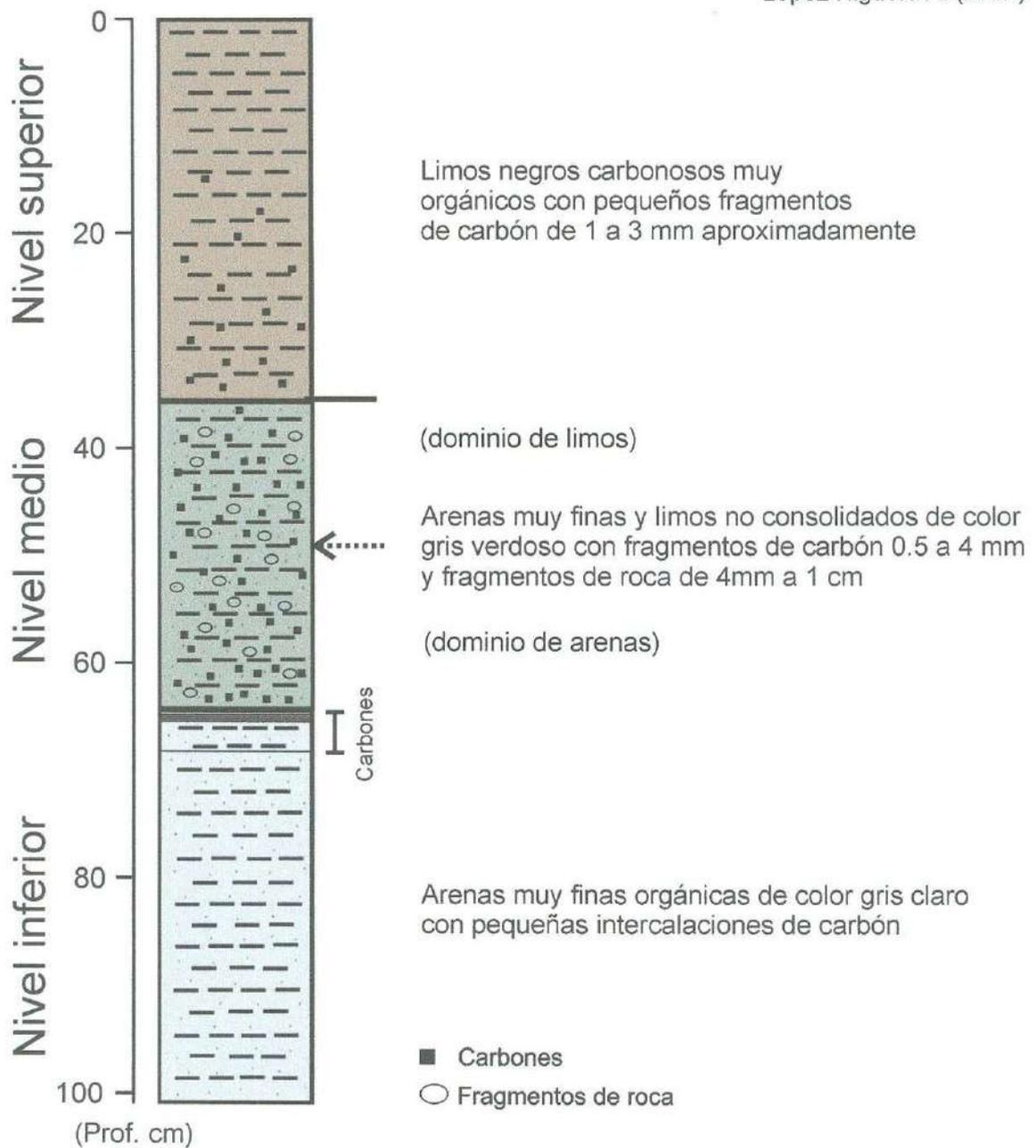


Figura 5. Estratigrafía del núcleo CB2 tomado de la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco.

## 5.2 Análisis polínico

### 5.2.1 Descripción del diagrama

La profundidad del núcleo de sedimentos está representada en el eje vertical en el diagrama. A mayor profundidad se tienen las muestras de mayor edad o de edad más antigua y hacia la parte superior tenemos las muestras de edad más reciente o más jóvenes. En total se observan 16 niveles que corresponden a diferentes profundidades en el núcleo CB2 de 0 a 101.2 cm. (Fig. 6)

En el eje horizontal superior se representan los diferentes taxones de plantas identificados mediante el polen fósil. En el eje horizontal inferior se indica el porcentaje por nivel de los taxones determinados. La identificación del polen se hizo al máximo nivel de determinación posible, que fue en algunos casos a nivel de familia y en otros a nivel de género. Con el propósito de mostrar los cambios en las diferentes formas de crecimiento la lista de taxones fue ordenada, en diferentes grupos de taxones; así obtuvimos el siguiente orden:

**Grupo 1:** compuesto por árboles y arbustos altos sin importar asociación de plantas, ni tipos de vegetación que representan. Así entonces, tenemos para el primer grupo los siguientes taxones: *Abies*, *Alnus*, *Celtis*, *Cupressaceae*, *Juglans*, *Ostrya*, *Picea*, *Pinus*, *Quercus*, *Rhamnaceae*, *Rosaceae*, *Salix*, *Tilia* y cf *Ulmaceae*. Este grupo se localiza en la parte izquierda en el diagrama.

**Grupo 2:** este segundo grupo está constituido por arbustos de menor tamaño, hierbas y algunas especies acuáticas y se localiza en la parte media del diagrama, después del diagrama sintético (AP/NAP).

**Grupo 3:** el tercer grupo lo constituyen las esporas de helechos (Pteridophyta), y se localiza en el diagrama en el extremo derecho.

El diagrama sintético ocupa una columna en la parte media del diagrama, que muestra la relación del grupo 1 (polen arbóreo ó AP) con el grupo 2 (polen no arbóreo ó NAP), indicándose como AP/NAP.

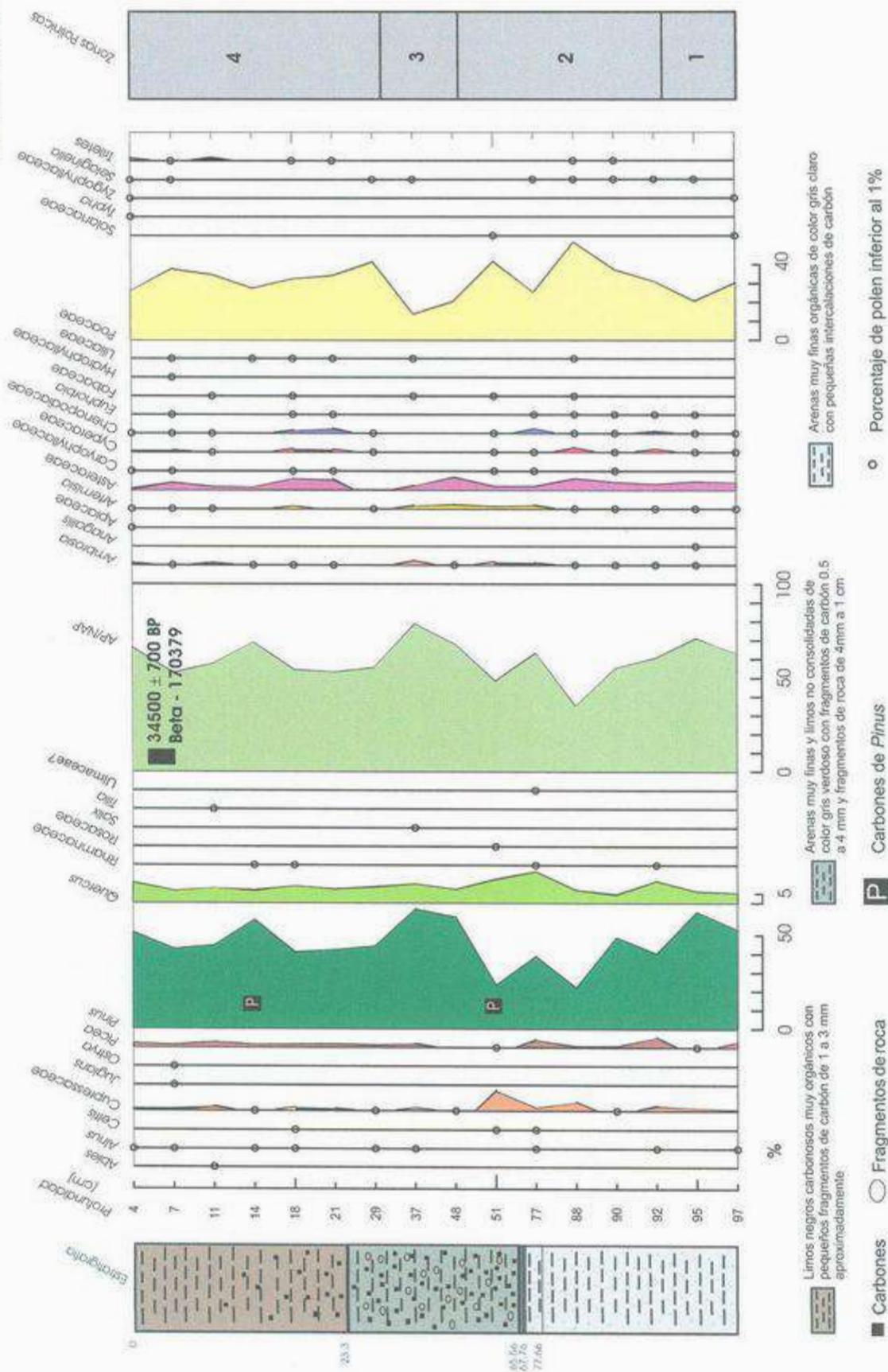


Figura 6. Diagrama polínico (frecuencias polínicas relativas) del núcleo CB2 del sitio El Aguaje del Caballito Blanco.

### 5.2.2 Interpretación del diagrama

El diagrama muestra tres taxones dominantes, con frecuencias superiores al 10%. Estos taxones son: *Pinus*, *Quercus* y *Poaceae*. Tanto *Pinus* como *Poaceae* presentan frecuencias que superan el 40% en algunos niveles.

Otros tipos polínicos que se presentan con porcentajes entre 5 y 10% del total son: Cupressaceae, Asteraceae y *Picea*, este último actualmente no se encuentra en Sonora. En la Lámina 1 se presentan algunos de los principales tipos polínicos determinados para este estudio.

Los taxones que presentan frecuencias inferiores a 1 y 2% del total de granos de polen, pero que aparecen en algunos niveles son: *Abies*, *Alnus*, *Celtis*, Rhamnaceae, *Ambrosia*, *Artemisia*, Caryophyllaceae, Cyperaceae, Chenopodiaceae, *Euphorbia*, Fabaceae, Liliaceae, Solanaceae, Zygophyllaceae, *Selaginella* y *Trilete*. Y como taxones con porcentajes menores al 1% y que aparecen sólo en un nivel se encuentran, *Juglans*, *Ostrya*, Rosaceae, *Salix*, *Tilia*, cf Ulmaceae, *Anagallis*, Apiaceae, Hydrophyllaceae y *Typha*. La similitud entre diferentes niveles ó espectros polínicos contiguos nos indujo a agruparlos para su descripción.

La suma de polen arbóreo (AP) en relación con la del polen del tipo no arbóreo (NAP) en el diagrama sintético, muestra la tendencia en general de que el AP domina en el diagrama con un porcentaje mayor al 60% en algunos niveles, aunque en otros disminuyen las frecuencias pero se mantienen en un rango aproximado de 40 a 60%.

El análisis del diagrama polínico registró cuatro periodos antiguos. Todos ellos reflejan la existencia de praderas locales (abundancia de *Poaceae*), aunque ninguno reflejó la vegetación actual de bosque de encino-pino (la proporción de *Quercus* es muy baja). A continuación se describirán por separado cada uno de estos cuatros periodos que se denominaron zonas polínicas:

**Zona 1:** (101.2-93 cm) este intervalo se caracteriza porque las frecuencias polínicas de *Quercus* (encino) son inferiores a las de *Pinus* (pino). Hacia los 95 cm el pino alcanza un porcentaje mayor al 50%, mientras que el encino presenta un porcentaje de 6% y el porcentaje de *Poaceae* disminuye de 30% a un 20%. Dentro de los

taxones menos representados con un porcentaje menor al 3% se encuentran Cupressaceae y Asteraceae, así como *Picea* que aparece a los 97cm con un porcentaje de 2% y disminuye a los 95 cm a una proporción menor al 1%. Los taxones con porcentajes inferiores al 1% se representan como pequeños círculos en el diagrama. En esta zona 1 se encuentran *Alnus*, *Ambrosia*, *Anagallis*, *Artemisia*, Cyperaceae, Chenopodiaceae, *Euphorbia*, Solanaceae, Zygophyllaceae y algunas esporas como *Selaginella* y *Triletes*.

**Zona 2:** (93-49 cm) a los 92 cm el porcentaje de pino es de 40% y a 90 cm aumenta a 50%, a 88 y 51 cm disminuye alcanzando el 20% y a 77 cm aumenta nuevamente a 35%. Los máximos porcentajes que alcanza el polen de pino son de 35 y 50% en esta zona. Mientras que el polen de pino tiene una disminución del 30% a los 88 cm, Poaceae a ese mismo nivel alcanza su mayor porcentaje de 50% el mayor que obtiene en la zona 2. A 77 cm el porcentaje de Poaceae disminuye a 20%. El encino a los 92 y 77 cm tiene sus máximas frecuencias de 10 y 15 % respectivamente, y un mínimo de 5% en el intervalo de 90 a 88 cm; en estos mismos niveles (92 y 77 cm) *Picea* presenta su mayor valor de 6 y 4% y disminuye a partir de los 51 cm a un porcentaje menor de 1%. La familia Cupressaceae tiene su máxima frecuencia del 15% a los 51 cm, a los 92 y 88 cm presenta pequeños máximos de 2 y 5%. El polen de Asteraceae se presenta casi de manera continua con un porcentaje del 5% en esta zona, pero presenta una disminución de 4% en el intervalo de 77 a 51 cm. Con un porcentaje de 2% a los 92 y 88 cm aparece Cyperaceae y a los 92 y 77 cm Chenopodiaceae. Así también a partir de los 88 cm inician curvas polínicas los taxones *Ambrosia* y *Artemisia* con un porcentaje menor e igual al 2% respectivamente. En esta zona 2 los taxones que se observan de manera puntual con valores menores al 1% son *Alnus*, Rhamnaceae, Rosaceae, cf Ulmaceae, Caryophyllaceae, *Euphorbia*, Fabaceae, el tipo Liliaceae, Solanaceae, así como esporas de *Selaginella* y *Triletes*.

**Zona 3:** (49-30 cm) este es otro intervalo al igual que en la zona 1, donde *Pinus* alcanza un frecuencia mayor de 70% hacia 37 cm. *Quercus* tiene un porcentaje constante del 10% a lo largo de la secuencia. Por otro lado las *Poaceae* disminuyen

a un 12% el mínimo valor en la secuencia hacia los 37 cm y en ese mismo nivel, Cupressaceae casi desaparecen con un porcentaje menor a 2% lo que indica que tuvo una disminución de un 14% aproximadamente en comparación con el porcentaje que obtuvo en la zona 2. El porcentaje de Asteraceae hacia los 48 cm alcanza un 7% disminuyendo a valores menores del 1% hacia menor profundidad a los 32 cm. Los taxones Cupressaceae, *Ambrosia* y *Artemisia* alcanzan un porcentaje de 1% y disminuyen a un porcentaje menor de 1% al igual que Asteraceae a los 32 cm. A los 44 cm la curva de *Picea* aumenta a un 2%. De manera puntal con un porcentaje menor a 1% aparecen *Alnus*, *Salix*, Fabaceae, el tipo Liliaceae y *Selaginella*.

**Zona 4:** (30-0 cm) La parte superior de esta zona está fechada en  $34\ 500 \pm 700$  BP (Beta-170379). En la parte media de este intervalo se observa que el pino se extiende alcanzando una máxima frecuencia con un porcentaje de 65% a los 14 cm y una disminución de Poaceae a este mismo nivel con un porcentaje del 30%, pero con máximos de 40 y 35 % en los 29 y 7 cm. En esta zona se detecta el único grano de polen de *Abies* de toda la secuencia. El encino presenta frecuencias constantes con un 10% en esta zona (32-0 cm), al igual que *Picea* con un porcentaje de 2%. Las Asteraceae tiene un máximo a los 25 cm alcanzando un porcentaje de 7% en el intervalo (21 a 18 cm), después disminuyen a un 2% en el intervalo (14 a 11 cm) volviendo a extenderse un poco más a los 7 cm a un 3%. Los taxones Cupressaceae, Cyperaceae y Chenopodiaceae aumentan a un 2% a los 25 cm y disminuyen a porcentajes menores de 1% a los 16 cm, a los 11 cm y 7 cm respectivamente Cupressaceae y Cyperaceae aumentan su porcentaje a un 3 y 2%. Otros taxones como *Ambrosia* y las esporas (Triletes) aumentan su curva a los 15, 12 y 10 cm con un porcentaje inferior al 2%. En el intervalo de 20 a 16 cm *Artemisia* presenta un porcentaje del 1% y disminuye a los 11, 7 y 4 cm a un valor menor del 1%. Así también los taxones como *Alnus*, *Celtis*, *Juglans*, *Ostrya*, Rhamnaceae, *Tilia*, Apiaceae, Caryophyllaceae, *Euphorbia*, Fabaceae, Hydrophyllaceae, el tipo Liliaceae, Solanaceae, *Typha*, Zygophyllaceae y esporas de *Selaginella* presentan porcentajes menores al 1%.

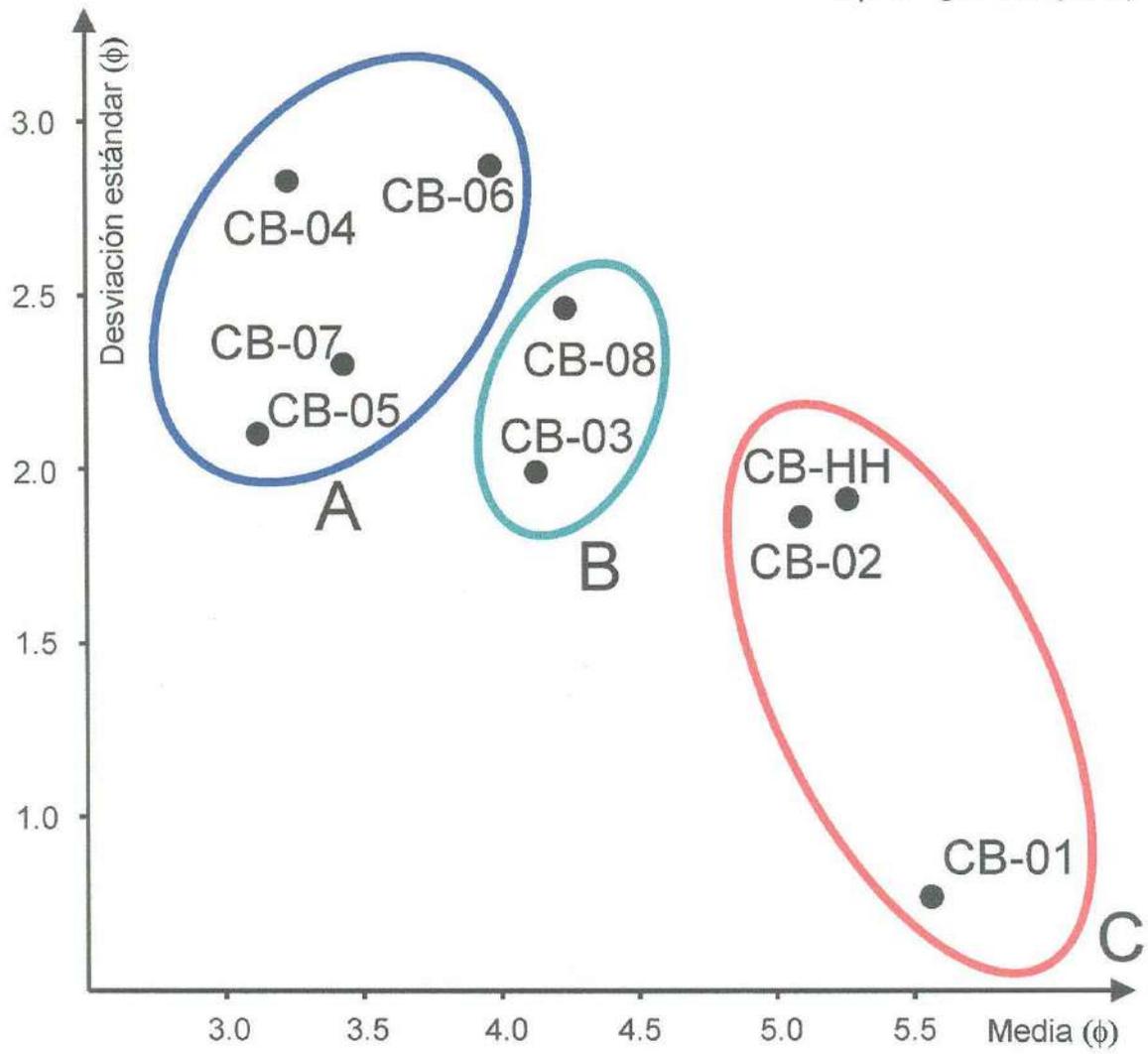
Lo que nos muestran *grosso modo* los resultados obtenidos en el diagrama, es que las frecuencias polínicas de *Quercus* son inferiores a las de *Pinus*, lo que supone que el pinar fue dominante y el rol de los encinos, secundario; que se sucedieron bosques de pino más o menos abiertos (zona 4 y zonas 3 y 1 respectivamente), y un periodo de bosque muy abierto de pino con Cupresáceas y quizá también encino (zona 2). *Picea* estaba continuamente presente en los alrededores.

### **5.3 Análisis granulométrico (Laser Coulter)**

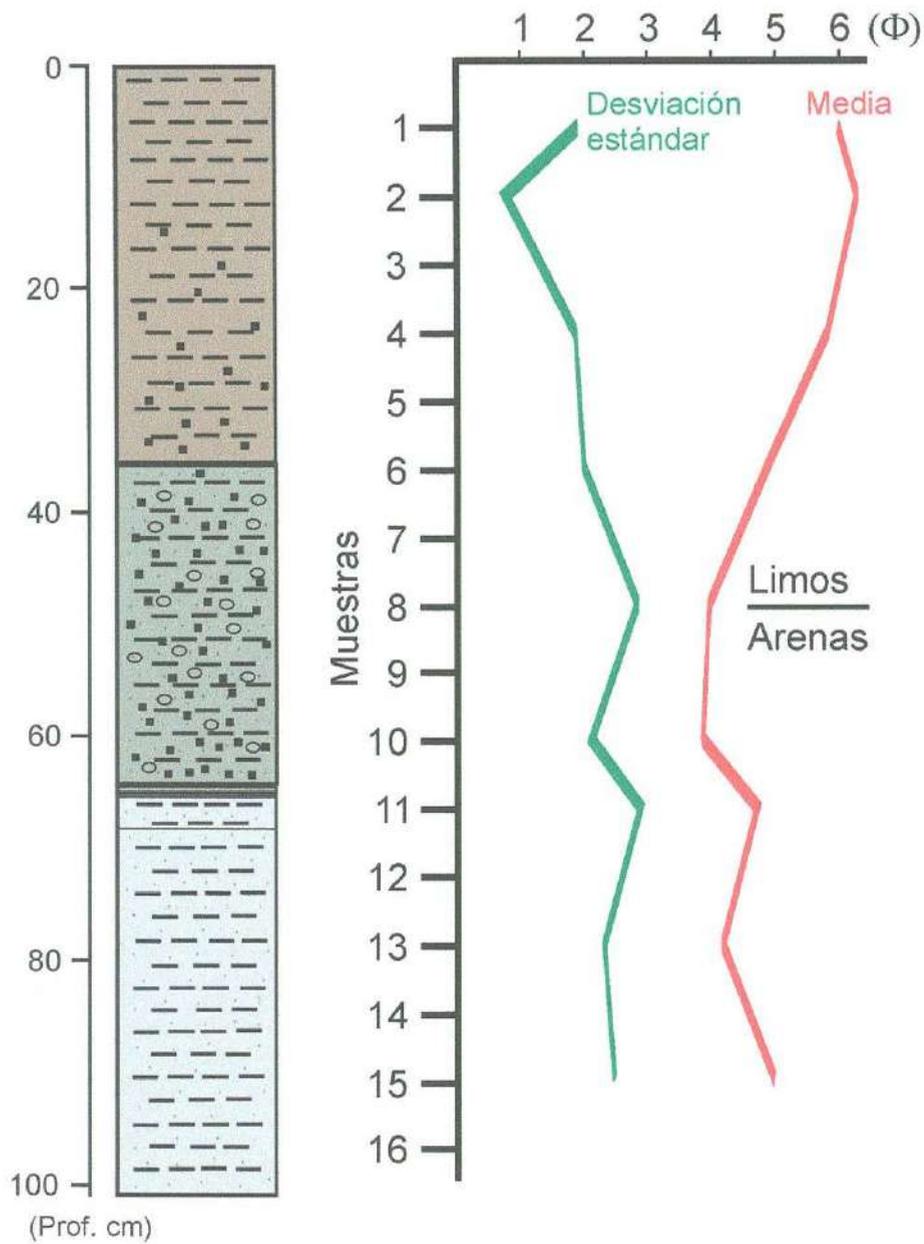
Se efectuó el análisis sedimentológico por medio de un equipo Laser Coulter, para clasificar los sedimentos. Se calculó el tamaño de grano obteniendo los parámetros estadísticos **media (M)**, **desviación estándar ( $\sigma$ )** y **sesgo (SK)** por métodos gráficos (Folk & Ward, 1957) Tabla 6. Tomando como base la tabla de clases de tamaños según Udden-Wentworth (Wentworth, 1922) se obtuvo el grado de clasificación del sedimento y se graficaron los valores obtenidos de desviación estándar (eje Y) contra la media (eje X) (Fig. 7). El equivalente de escala phi ( $\phi$ ) nos indica que se trata de limo medio de mal clasificado (muestras 14 y 0cm de profundidad) a moderadamente clasificado (a 7 cm de profundidad); limo grueso de muy mal clasificado a mal clasificado (95 y 21 cm respectivamente); y arena muy fina, muy mal clasificada (90 a 37 cm de profundidad). El grado de clasificación del sedimento y el tamaño de grano están en función de la variación en el nivel de la energía, siendo mayor la energía cuando el tamaño es mayor. En la Figura 8 se observa cómo el tamaño de grano oscila entre arenas muy finas y limos gruesos en la parte inferior de la secuencia, mientras que en la parte superior se presentan limos medios. Por otra parte el grado de clasificación del sedimento es variable en toda la secuencia y oscila entre moderado, mal y muy mal clasificado. Todo lo anterior sugiere que hubo variaciones de energía durante la formación de la cuenca.

**Tabla 6.** Grado de clasificación del sedimento mediante los parámetros estadísticos media (M), desviación estándar ( $\sigma$ ) y sesgo (SK) de las muestras del núcleo CB2 analizadas por Laser Coulter.

Profundidad (cm)	Muestra		Media phi ( $\phi$ )	Desviación estandar phi ( $\phi$ )	Sesgo phi ( $\phi$ )	Interpretación sedimentológica
	Análisis Granulométrico	Análisis Polínico				
0	CB-HH	(1)	5.26	1.91	0.14	Limo mediano, mal clasificado. Sesgado hacia los finos
7	CB-01	(2)	5.56	0.77	-0.98	Limo mediano, moderadamente clasificado. Muy sesgado hacia los gruesos
14	CB-02	(4)	5.09	1.86	-0.01	Limo mediano, mal clasificado. Simétrico
21	CB-03	(6)	4.13	1.99	0.19	Limo grueso, mal clasificado. Sesgado hacia los finos
37	CB-04	(8)	3.23	2.83	-0.12	Arena muy fina, muy mal clasificada. Extremadamente sesgado hacia los gruesos
51	CB-05	(10)	3.12	2.10	0.53	Arena muy fina, muy mal clasificada. Extremadamente sesgado hacia los finos
77	CB-06	(11)	3.97	2.87	-0.09	Arena muy fina, muy mal clasificada. Simétrico
90	CB-07	(13)	3.43	2.30	0.44	Arena muy fina, muy mal clasificada. Sesgado hacia los finos
95	CB-08	(15)	4.24	2.46	0.03	Limo grueso, muy mal clasificado. Simétrico



**Figura 7.** Relación entre la media y desviación estándar del tamaño de grano de la muestras del núcleo CB2 analizadas por Laser Coulter. Los círculos A, B y C agrupan las muestras con valores semejantes de media y desviación estándar. A=arenas muy finas, B=limos gruesos y C=limos medios.



**Figura 8.** Estratigrafía del núcleo, Media y desviación estándar en unidades ( $\phi$ ) del tamaño de grano de las muestras del núcleo CB2 analizadas por Laser Coulter.

#### **5.4 Análisis de arcillas por difracción de rayos X e interpretación de difractogramas**

Para la interpretación de difractogramas es necesario remarcar que la identificación de minerales arcillosos comienza con los espaciamentos basales (capa atómica) de los minerales y grupos de minerales de arcillas descritos a continuación:

**Caolinita**, que muestra un espaciamiento basal de 7 ángstrom (Å).

**Illita**, es un mineral arcilloso no expansible que presenta un espaciamiento basal de 10 Å.

**Clorita**, es un mineral arcilloso no expansible que presenta un espaciamiento basal de 14 Å.

**Esmectita**, es un grupo de minerales arcillosos que contiene varios minerales individuales que se expanden arbitrariamente a más del espaciamiento basal de 10 Å. Diferentes volúmenes de agua o fluidos orgánicos se acomodan entre las capas basales de la esmectita, resultando espacios basales alrededor de los 17 Å.

Teniendo en cuenta lo anterior y siguiendo la metodología usada para el tratamiento de arcilla (pag. 42) se inició con la interpretación del difractograma glicolizado, tomado después de la glicolización. Primero se buscó una cresta que se encontrara entre los 14 y 17 ángstrom. Esta cresta fue el primer orden de crestas para los minerales arcillosos expansibles, siendo montmorillonita pues la cresta de mayor intensidad en el difractograma fue de 17 Å. Después se buscó un orden de cresta de clorita a 14 Å. Y así sucesivamente se fue buscando el orden de cresta para cada difractograma.

En las figuras 9a, 9b y 9c las crestas más altas que se obtuvieron en cada uno de los difractogramas glicolizados de las tres muestras analizadas fueron alrededor de los 17 ángstrom, las cuales desaparecen en los difractogramas de las muestras calentadas a 550°C. En los difractogramas obtenidos de las muestras normales las crestas más altas que se obtuvieron alcanzaron los 15 ángstrom. Todo lo anterior indica que la arcilla resultante es "**montmorillonita**" (grupo de la esmectita). Este tipo de arcilla

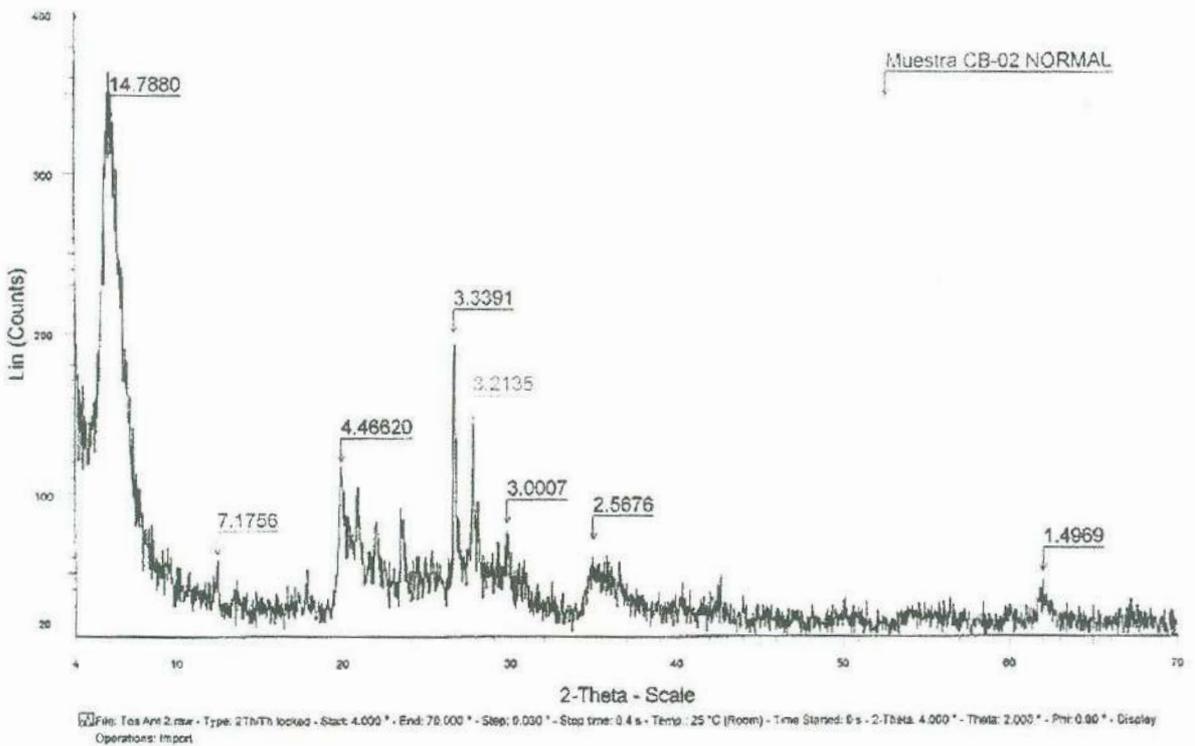
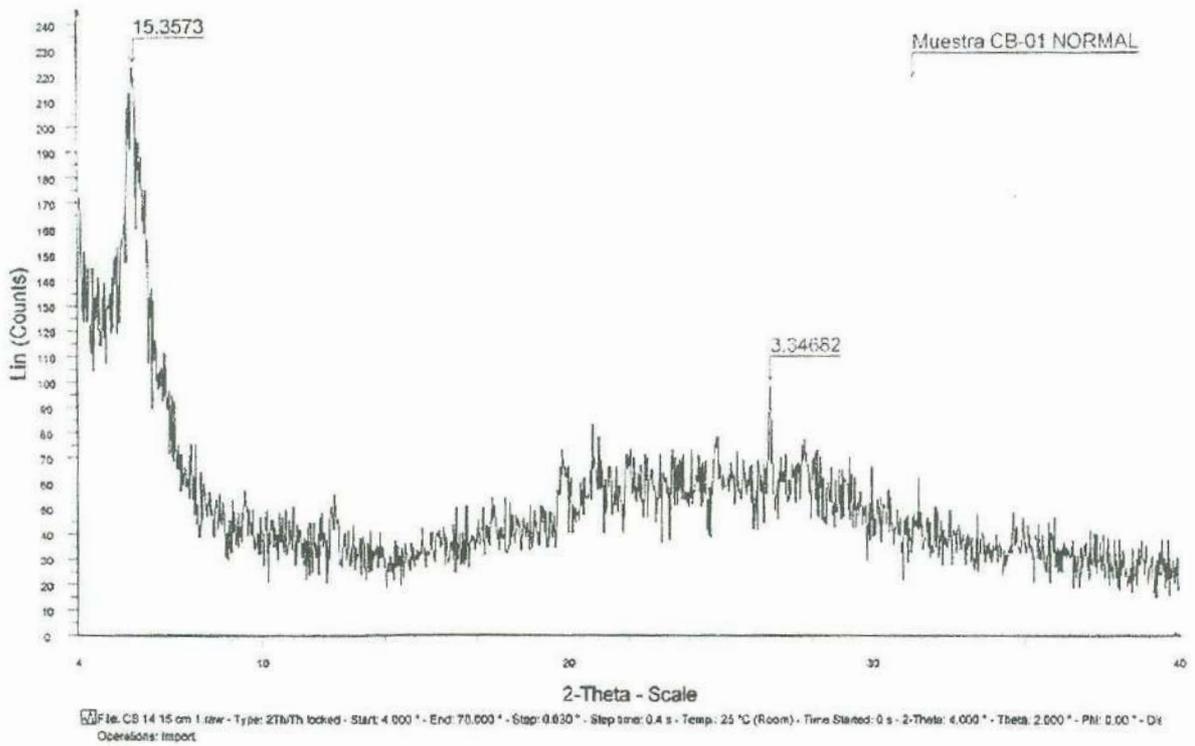


Figura 9a. Difractogramas obtenidos para la clasificación de arcillas (CB-01 y CB-02).



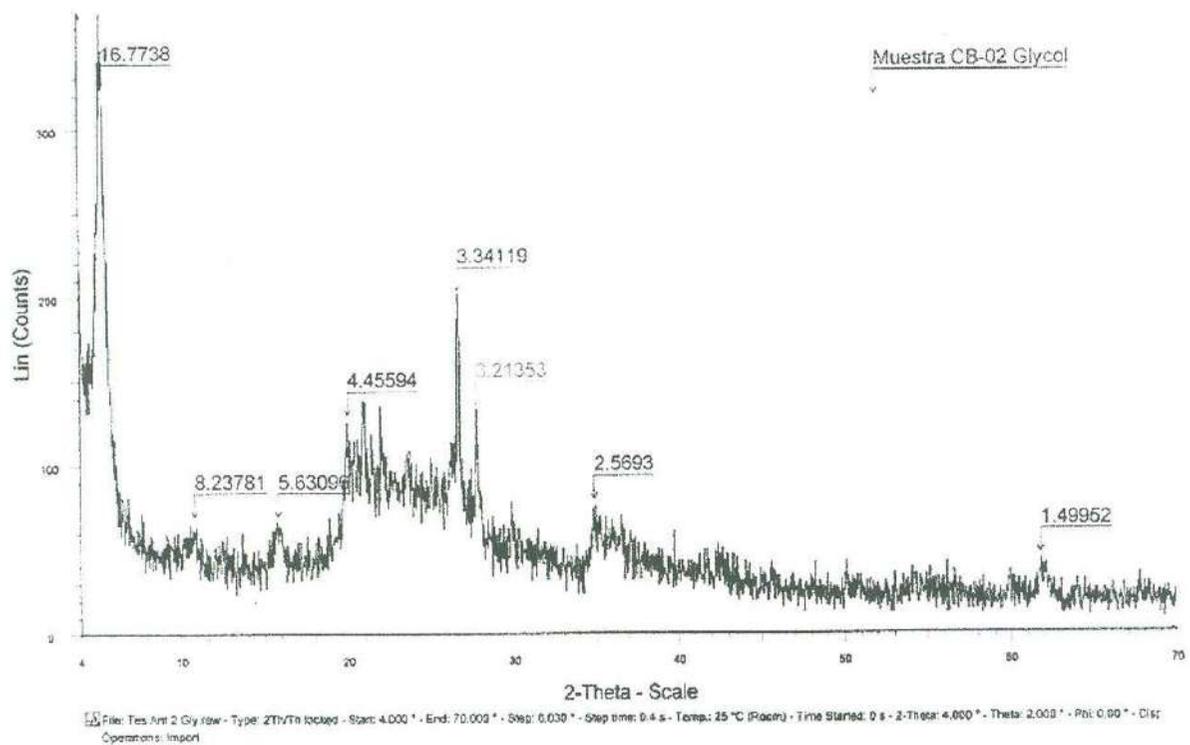
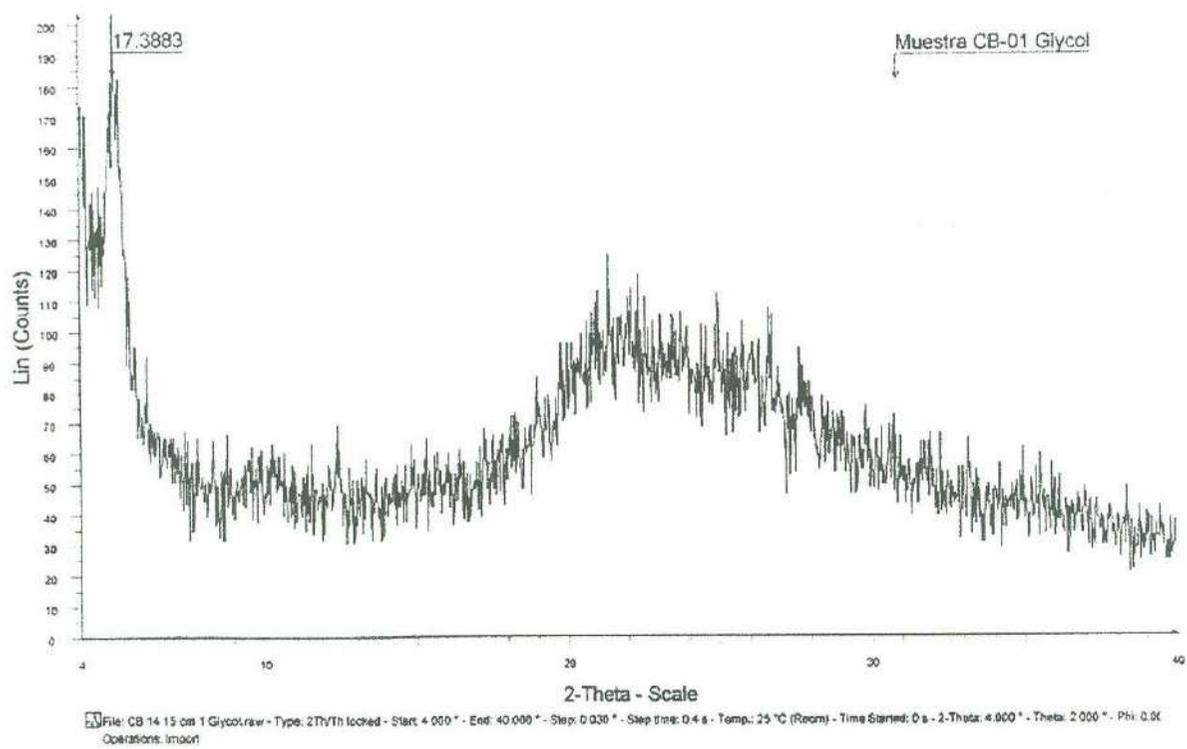
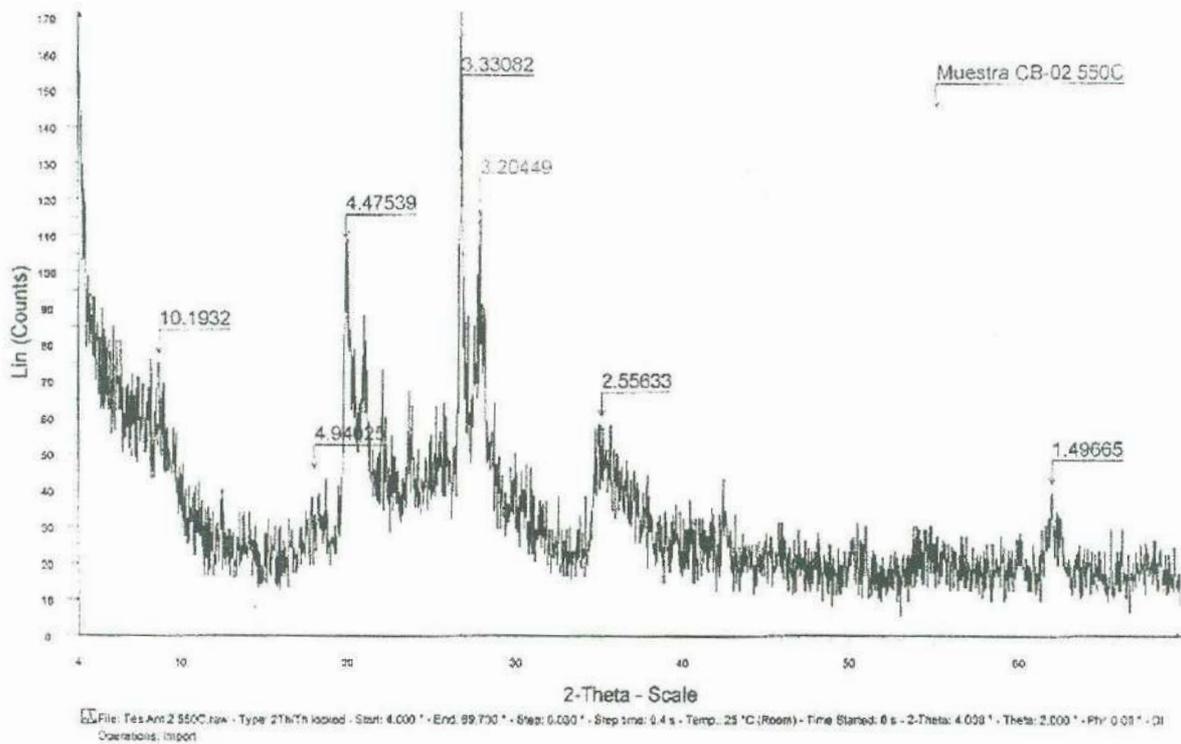
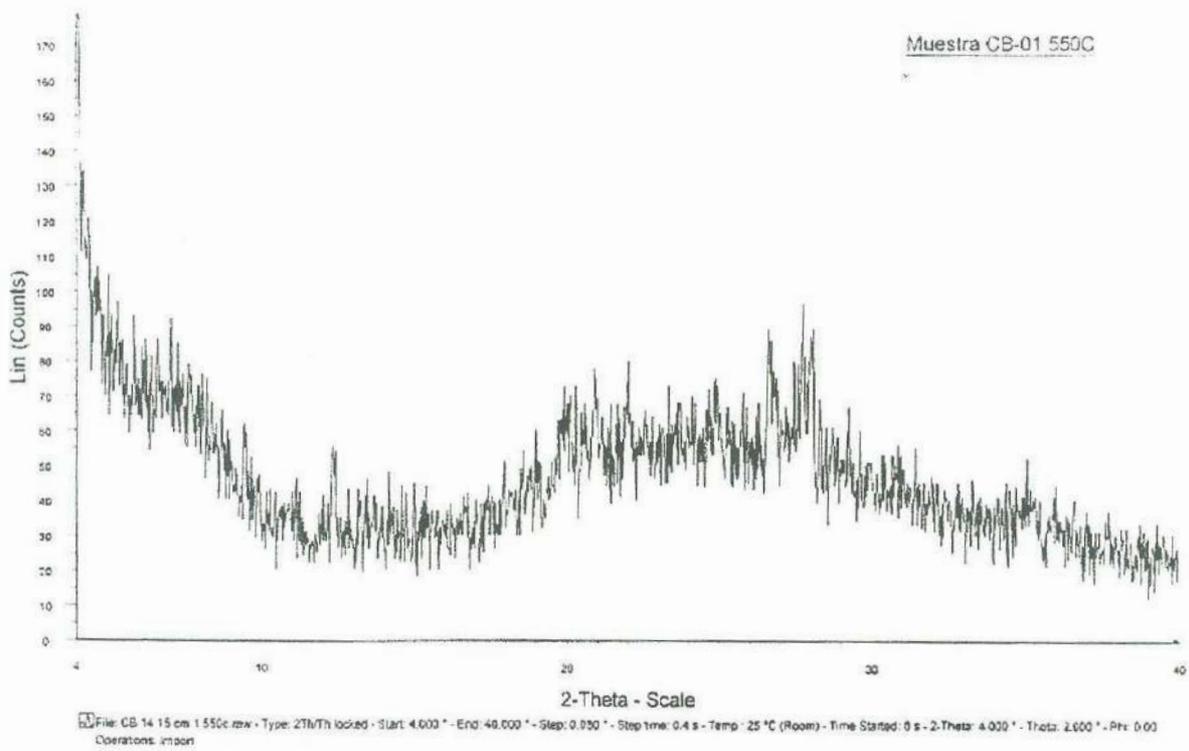


Figura 9b. Difractogramas obtenidos para la clasificación de arcillas (CB-01 y CB-02).





**Figura 9c.** Difractogramas obtenidos para la clasificación de arcillas (CB-01 y CB-02).

refleja un ambiente más húmedo que corresponde a la parte superior del núcleo. También se determinaron algunos minerales que estuvieron presentes en las muestras analizadas como illita-montmorillonita, caolinita, crisobalita, cuarzo, anortoclasa, albita y ortoclasa.

### 5.5 Contenido de materia orgánica

Se calculó el porcentaje de materia orgánica por el método de pérdida por ignición, el cual se describió en el capítulo anterior. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 7a, 7b y 7c.

<b>Tabla 7a. Contenido de materia orgánica y humedad por el método de pérdida por ignición, para las muestras CB2 – HH, 1, 2.</b>			
<b>Muestra</b>	<b>CB2-HH</b>	<b>CB2 - 1</b>	<b>CB2 - 2</b>
(a) Peso del crisol calentado a 1000°C durante 1hr (gr)	12.1297	9.2369	8.9383
(b) Peso del crisol más sedimento (gr)	13.1981	10.4932	9.5540
(c) Peso después de calentado a 100°C (gr)	13.0304	10.2450	9.4859
(d) Peso después de calentado a 550°C (gr)	12.9599	10.1408	9.4269
Peso total Sedimento (gr)	1.0684	1.2563	0.6157
(b-c) Peso del crisol más sedimento - Peso después de calentado a 100°C (gr)	0.1677	0.2482	0.0681
% de humedad (100°C)	15.696	19.756	11.060
(b-d) Peso del crisol más sedimento - Peso después de calentado a 550°C (gr)	0.0705	0.1042	0.0590
% del contenido de materia orgánica (500°C)	6.5986	8.2941	9.5825

<b>Tabla 7b. Contenido de materia orgánica y humedad por el método de pérdida por ignición, para las muestras CB2 – 3, 4, 5.</b>			
<b>Muestra</b>	<b>CB2 - 3</b>	<b>CB2 - 4</b>	<b>CB2 - 5</b>
(a) Peso del crisol calentado a 1000°C durante 1hr (gr)	10.3673	8.4662	9.7623
(b) Peso del crisol más sedimento (gr)	11.6272	9.7857	10.9679
(c) Peso después de calentado a 100°C (gr)	11.4225	9.7029	10.8872
(d) Peso después de calentado a 550°C (gr)	11.3698	9.6557	10.8506
Peso total Sedimento (gr)	1.2599	1.3195	1.2056
(b-c) Peso del crisol más sedimento – Peso después de calentado a 100°C (gr)	0.2047	0.0828	0.0807
% de humedad (100°C)	16.247	6.275	6.6937
(b-d) Peso del crisol más sedimento – Peso después de calentado a 500°C (gr)	0.0527	0.0472	0.0366
% del contenido de materia orgánica (500°C)	4.1828	3.5771	3.0358

<b>Tabla 7c. Contenido de materia orgánica y humedad por el método de pérdida por ignición, para las muestras CB2 – 6, 7, 8.</b>			
<b>Muestra</b>	<b>CB2 - 6</b>	<b>CB2 - 7</b>	<b>CB2 - 8</b>
(a) Peso del crisol calentado a 1000°C durante 1hr (gr)	12.9271	8.4215	8.8841
(b) Peso del crisol más sedimento (gr)	13.8971	9.0184	9.8331
(c) Peso después de calentado a 100°C (gr)	13.8579	8.9834	9.7715
(d) Peso después de calentado a 550°C (gr)	13.8333	8.9564	9.7228
Peso total del sedimento (gr)	0.9700	0.5969	0.9490
(b-c) Peso del crisol más sedimento – Peso después de calentado a 100°C (gr)	0.0392	0.0350	0.0616
% de humedad (100°C)	4.041	5.863	6.491
(b-d) Peso del crisol más sedimento – Peso después de calentado a 500°C (gr)	0.0246	0.0270	0.0487
% del contenido de materia orgánica (500°C)	2.5360	4.5233	5.1317

Se calcularon los porcentajes de contenido de materia orgánica y de humedad. Los datos fueron graficados obteniendo dos curvas, donde el eje X está representado por el contenido de materia orgánica y de humedad en porcentaje, y el eje Y representa las muestras analizadas (Fig. 10).

Los resultados obtenidos del análisis del contenido de materia orgánica y de humedad siguen una tendencia relativamente paralela. Los porcentajes de materia orgánica en las muestras 15 a 6 (95 a 21 cm de profundidad) arrojan valores entre 5 y 7%, y en la parte superior la concentración fue mayor en las muestras 5 a 1 (18 a 4 cm de profundidad): el porcentaje fue de 7 y 10%. La curva de humedad refleja valores inferiores entre 8 y 6% para las muestras 15 a 8 (95 a 37 cm de profundidad) y se va incrementando hacia la parte superior en las muestras 7 a 1 (29 a 4 cm de profundidad) alcanzando valores de 16 a 20%. En la muestra 4 (14 cm de profundidad) se obtuvo un porcentaje máximo del contenido de materia orgánica de 10% y el mínimo de humedad de 12%. Este máximo y mínimo lo podemos relacionar a la parte superior en el núcleo como ya se había mencionado antes (pág. 62), que corresponde a la zona de sedimento más fino y de mayor contenido de arcilla (montmorillonita), misma que guarda diferentes volúmenes de agua y fluidos orgánicos en sus capas basales. Por lo tanto la cantidad de calor aplicada para este método quizás no fue suficiente para que la arcilla en esta muestra arrojara toda la humedad contenida entre sus capas.

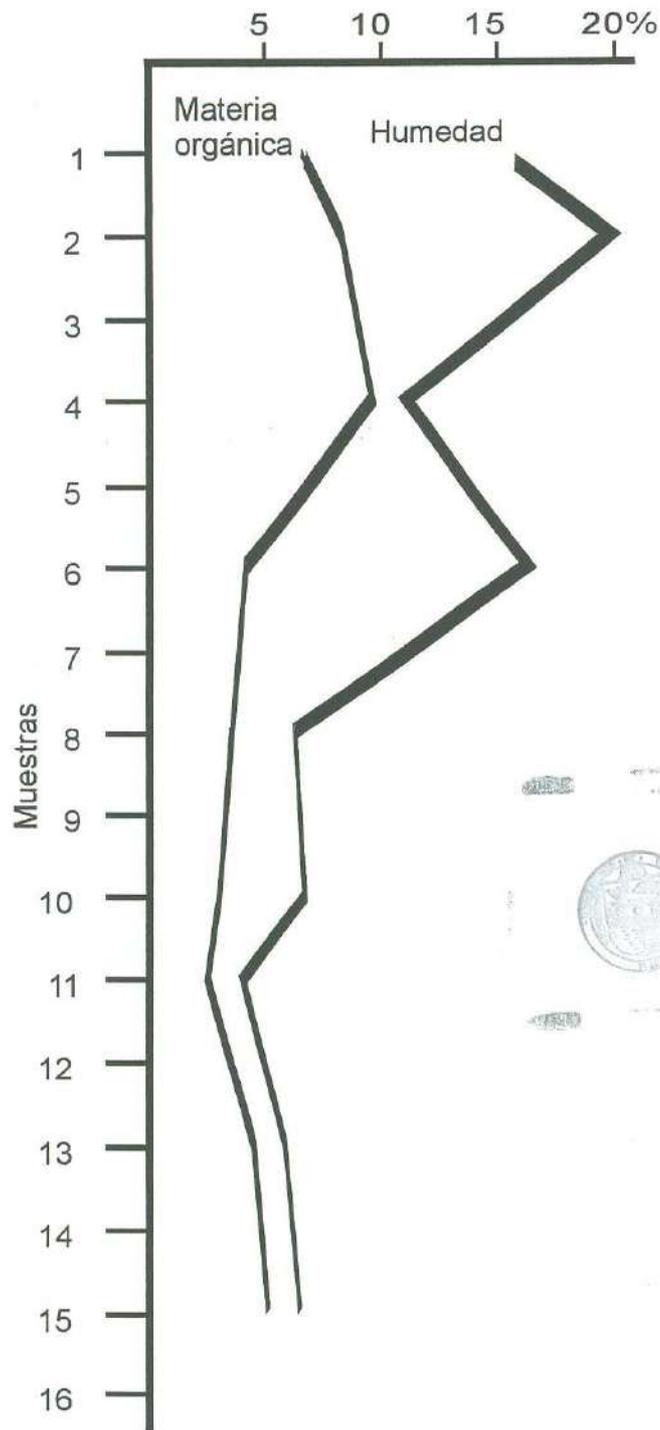


Figura 10. Porcentajes de materia orgánica y humedad obtenidos por pérdida por ignición en las muestras del núcleo CB2.



## CAPITULO 6 - Discusión

### 6.1 Evolución del paisaje vegetal

#### 6.1.1 El bosque de pino-encino (*Pinus-Quercus*)

El diagrama polínico reflejó cuatro zonas polínicas, donde los taxa dominantes en cada una de ellas fueron: *Pinus* (pino), *Quercus* (encino) y *Poaceae* (zacates ó pastos).

En las **zonas 1 y 3** la dominancia de polen de *Pinus* con respecto al de *Quercus* sugiere que el entorno del sitio estaba cubierto por un bosque de pino, quizá con encinos dispersos, o bien un bosque de pino, proviniendo los aportes polínicos de *Quercus* del bosque de pino y encino de altitudes inferiores.

La **zona 2** muestra mayores variaciones en la abundancia de pino y encino, y se observa una gran disminución en los porcentajes de pino (que oscilan en 20 y 30%), lo cual se interpreta como una abertura del bosque. El encino pudo alcanzar mayor extensión ó mayor proximidad en altitud.

La **zona 4** se vuelve una zona más estable donde las secuencias de pino y encino se comportan de manera regular a lo largo de la secuencia (permanece dominante el pino).

Comparando los espectros del registro de lluvia polínica actual (Ortiz Acosta *et al.*, sometido; Ortega-Rosas *et al.*, 2002) con nuestro diagrama en relación con pino y encino, se observó que existe mucha similitud en algunos espectros, los máximos porcentajes de pino reflejados en las zonas 1 y 3 son comparables con las muestras de los kilómetros 275, 280 y 330, con elevaciones de 1692, 1562 y 1576 m respectivamente en el registro de lluvia polínica actual. Sin embargo, es relativa la similitud, ya que ningún espectro actual muestra tan elevados porcentajes de *Poaceae*. Por otra parte no se encontró un espectro análogo en el registro de lluvia polínica actual que reflejara el máximo de encino y un mínimo de pino como en el espectro de la muestra 10 (zona 2) en el diagrama. Otra similitud se observa en el diagrama de polen fósil de CAM 3 (Ortega-Rosas *et al.*, 2002) en la base del diagrama (fechado en 8600 BP aproximadamente) los porcentajes de polen de pino y encino que reflejan una

similitud con las zonas 1 y 3 de nuestro diagrama, porcentajes de pino mayor al 60% y de encino entre 5 y 10%.

Actualmente, los pinos crecen por encima de los 1700 m de altura en El Kípor, principalmente dispersos en el bosque de encino, y sólo con mayor densidad en las laderas norte (Fig. 11), es decir que el sitio de estudio se encuentra rodeado de encinar pero muy próximo al límite del bosque de pino-encino. Si observamos la lluvia polínica actual de la región de El Kípor, la mayoría de los espectros polínicos tienen dominancia de encino, pero en las laderas de exposición norte domina el polen de pino. En el período de depósito de los sedimentos estudiados, la proporción de pino era mayor que la de encino, por lo cual interpretamos que el límite altitudinal del pino estaba por debajo del actual. La Figura 12 muestra una reconstrucción hipotética de un perfil de vegetación en la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco.

### **6.1.2 Poblaciones de Pinabete (*Picea*) y abeto (*Abies*) en el Wisconsin medio**

*Picea* tiene una representación continua a lo largo de la secuencia en las cuatro zonas, aumentando sus frecuencias en la zona 2 con un porcentaje elevado con respecto al total polínico próximo al 10% (siendo *Picea* no muy buen productor y dispersor de polen), que corresponde al paisaje más abierto, y el período de menor estabilidad en la sedimentación de la cuenca. Porcentajes muy bajos de polen de *Picea* (inferior al 1 y 2%) se obtuvieron en un estudio realizado en la parte central de México para el final del Pleistoceno (Lozano García et al., 1993) y a mayores latitudes registros de lluvia polínica para la parte oeste de E.U.A. arrojan porcentajes alrededor de 5% con rangos de temperatura entre 5 y 10°C, y una precipitación de 500-2000 mm (Davis, 1995). Por otra parte, registros de lluvia polínica actual en la región de Oregon y el sur de Washington arrojan porcentajes muy bajos, usualmente entre 3 y 10% a pesar de que *Picea* se encuentra de manera local en el lugar (Minckley, 1999). *Picea* está restringida hoy día al norte de México, entre 2000 y 3200 m de altitud preferentemente en laderas de cañadas y barrancas o valles muy protegidos. Las poblaciones en general ocupan superficies muy reducidas en medio del pinar y muchas veces se

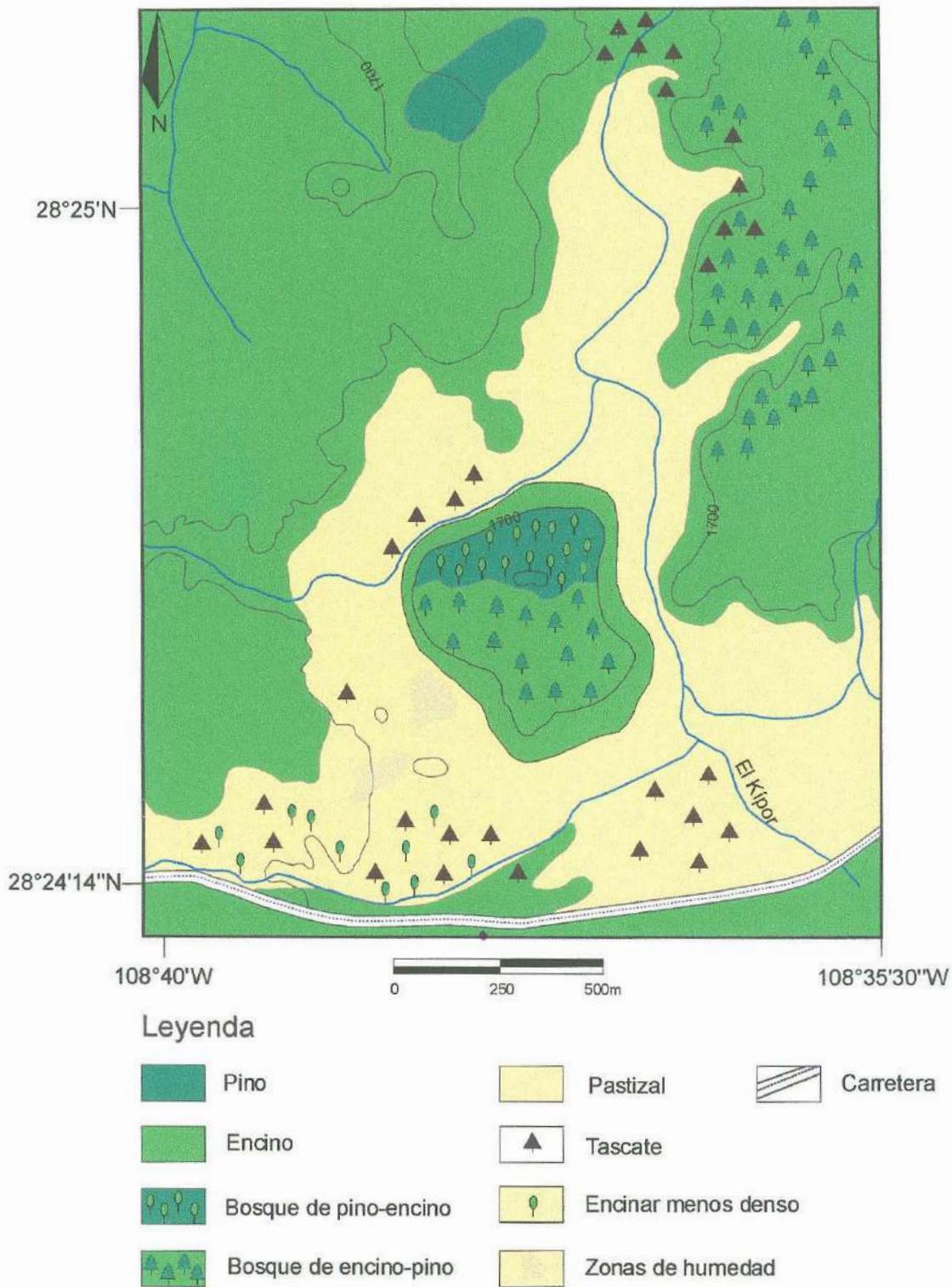


Figura 11. Mapa de distribución de la vegetación en la región de El Kípor.

presentan como masas mixtas, principalmente con *Pinus* y *Abies*. La presencia de *Abies* poco antes de hace 34,500 años BP (muestra 11 cm de profundidad) confirma la asociación de las dos coníferas en los alrededores del sitio. Actualmente, *Abies duranguensis* crece en un cañón a 40 km de distancia al W de El Kípor. Teniendo en cuenta la ecología actual de *Picea*, las poblaciones debían encontrarse en sitios sombríos y húmedos en medio del pinar local (Rzedowski, 1994). Su localización hipotética en un perfil de vegetación se presenta en la Figura 12. Hoy en día, *Picea* no se encuentra en Sonora (Felger et al., 2001; Ferguson, com. pers., 2002) y ningún grano de *Picea* ha sido registrado en la lluvia polínica actual en la región de El Kípor (Ortiz Acosta et al., sometido; Ortega Rosas et al., 2002); las especies más próximas a nuestra área de estudio se encuentran más hacia el este de Chihuahua: *Picea engelmanni* es una especie del norte que alcanza su distribución más meridional en ésta área y *Picea chihuahuana* se encuentra cerca de Creel y es endémica de la parte norte de la Sierra Madre Occidental. Los presentes datos apoyan la hipótesis de que tuvo una distribución más extensa durante el Pleistoceno en el país, encontrándose en altitudes y latitudes inferiores, y concuerdan con los datos de Jacobs (1985) y Anderson (1993) para el SW de los Estados Unidos. Actualmente la distribución de los bosques de *Picea* constituye un estado relictual y marca una diferencia entre la vegetación actual y la de hace 34 000 años.

### **6.1.3 Árboles del bosque mesófilo de montaña: *Ostrya* y *Tilia***

Otras especies como *Ostrya* y *Tilia* que se encuentran en altitudes entre 1600 y 1900 m (Martin et al., 1998) nos determinan que tuvieron localizaciones puntuales. En el diagrama polínico aparecen únicamente en la zona 4, siendo la zona de mayor estabilidad en la sedimentación de la cuenca. En la lluvia polínica actual (Ortiz Acosta et al., sometido; Ortega Rosas et al., 2002) *Ostrya* aparece de manera continua, sin embargo *Tilia* no se encuentra presente. Las especies más próximas al poblado de El Kípor son: *Ostrya virginiana* que se localiza en Arroyo Hondo al este de Yécora, a 11.5 km al este de El Kípor por la carretera Méx. 16 a 1460 m de elevación y *Tilia americana* var. *mexicana* que se encuentra en Trigo Moreno, municipio de Yécora (Felger et al., 2001); Sierra El Chuchupate, ca. 15 km al sureste de Yécora a 1470 m de elevación;

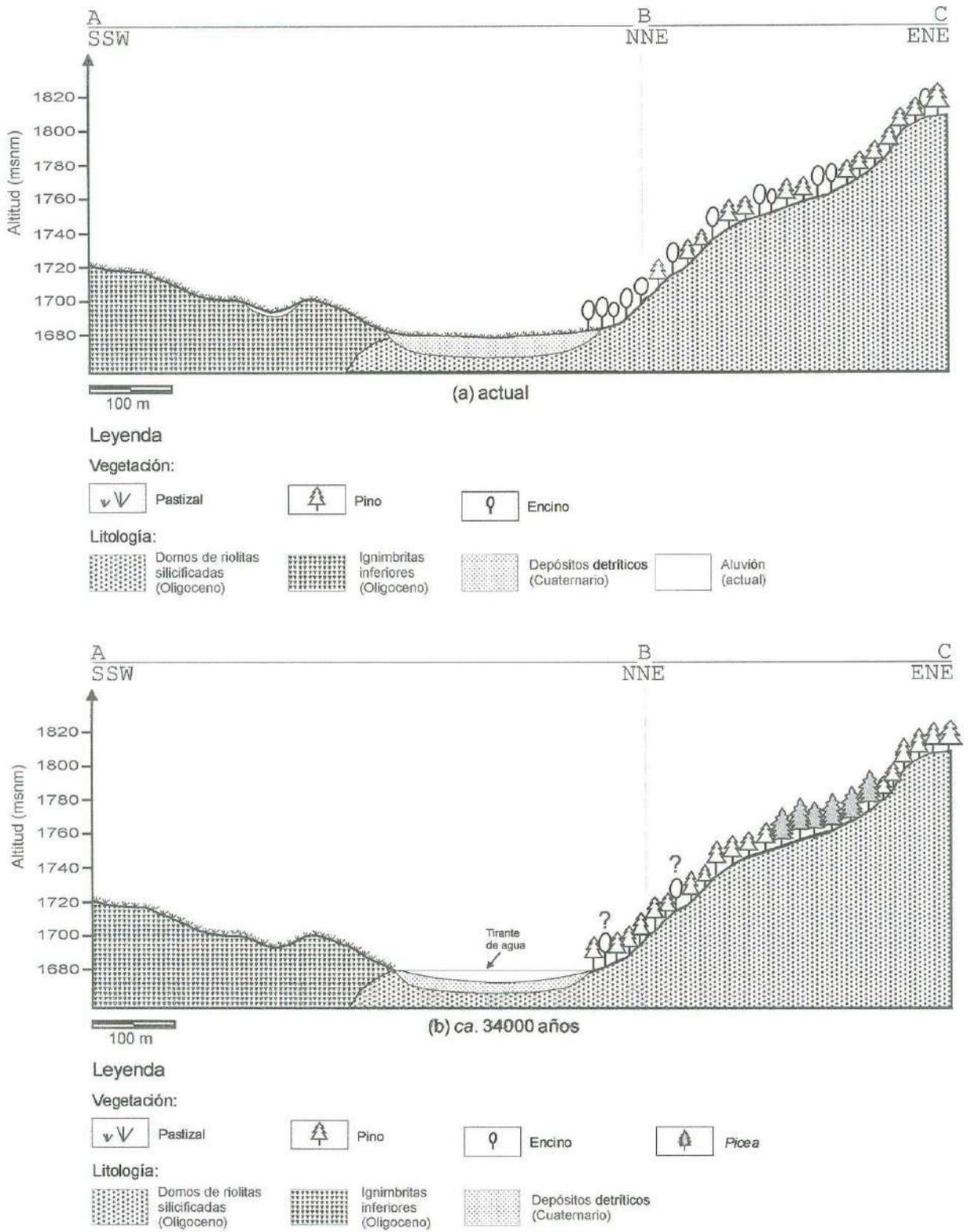


Figura 12. Perfiles geológico y de vegetación (A-B-C) de la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco. a. Actual. b. ca. 34,000 años. Ver fig.3 para localización.

estuvieron 300-400 m en altitud por arriba de los límites actuales. Posiblemente en El Kípor las condiciones de humedad fueron óptimas para el desarrollo de estas especies, ya que se encuentran dentro del conjunto de comunidades que viven en zonas montañosas ocupando sitios más húmedos que los típicos de los bosques de *Quercus* y de *Pinus*, y es la distribución altitudinal de la humedad de la región la que determina su distribución (Rzedowski, 1994).

#### **6.1.4 Sabinos y Táscales (familia de las Cupresáceas)**

También las Cupresáceas tienen una representación continua, aumentando su frecuencia en la zona 2, con porcentajes de aproximadamente del 12% que superan los que se registran tanto en la lluvia polínica actual en la región <1% (Ortiz Acosta *et al.*, sometido; Ortega Rosas *et al.*, 2002), como a lo largo del Holoceno en el sitio próximo de la Ciénega de Camilo <4% (Ortega Rosas *et al.*, 2002). Sin embargo en el registro de lluvia polínica actual en la parte oeste de E.U.A. en altitudes más elevadas se presentan porcentajes incluso mayores que 15% en zonas extensas cubiertas por Cupresáceas (Davis, 1995) y lo mismo en latitudes inferiores pero a mayor altitud (Jacobs, 1985). No se les conoce de climas francamente calientes y rara vez se les encuentra a altitudes menores que los 1500 m en la región. Actualmente en El Kípor las Cupresáceas no son muy abundantes y se localizan en las laderas de los cerros entre el bosque de encino-pino y el pastizal, alrededor de los 1600 m. Probablemente, como en la actualidad, en el periodo correspondiente a nuestras muestras, las Cupresáceas se localizaban en la transición entre el bosque de pino y encino o bosque de pino y el pastizal. Por otra parte, muchas veces las Cupresáceas no parecen constituir una comunidad climax, sino que más bien son de origen secundario (Rzedowski, 1994); ya que pueden estar ligadas a sucesiones secundarias posteriores a incendios forestales.

#### **6.1.5 Pastos (Poaceae)**

Para la zona 2 y 4 los porcentajes de Poaceae son relativamente altos de 50 y 35%. En las zonas 1 y 3 los porcentajes son menores, 15 y 20% respectivamente. En la lluvia polínica actual en la región de El Kípor el porcentaje de Poaceae es <3% (Ortiz Acosta *et al.*, sometido; Ortega Rosas *et al.*, 2002), así como a lo largo del Holoceno en

el sitio próximo de la Ciénega de Camilo (Ortega Rosas *et al.*, 2002) los porcentajes de Poaceae más altos obtenidos no superan el 15%. Generalmente los pastizales son mucho más extensos en regiones de clima fresco, se desarrollan de preferencia en suelos medianamente profundos de mesetas, fondos de valles y laderas poco inclinadas, casi siempre de naturaleza ígnea, en altitudes entre 1100 y 2500 m. Las altas frecuencias de Poaceae en las cuatro zonas polínicas muestran que las actuales praderas en las que se asienta el poblado de El Kípor tienen un origen natural. No fue el hombre quien taló el bosque de encino para asentarse en el lugar, sino la humedad edáfica y otros factores de ambiente físico (como el clima, tipo de suelo, roca madre, etc.) o quizás un factor de tipo artificial (incendio forestal), los que determinaron la extensión del pastizal.

## **6.2 Evolución de la Cuenca**

La región del Kípor está determinada por un volcanismo terciario de edad Oligoceno constituido principalmente por ignimbritas y basaltos, domos riolíticos y dacíticos, limitándose los contactos por fallas con rumbo NNW y SSE.

El hecho de que la cuenca se encuentre inmersa en este contexto terciario nos permite tener un control geológico para determinar con mayor exactitud la formación de la cuenca. Se piensa que los aportes de sedimento en la cuenca fueron producto de la degradación de estas rocas volcánicas del entorno, donde los periodos de sedimentación de la cuenca están marcados por cambios muy variados que se reflejan tanto en la secuencia de polen como en los porcentajes de materia orgánica y de humedad, así como en el tamaño de grano de los sedimentos.

Los datos obtenidos en el análisis sedimentológico muestran que los niveles de energía y el tamaño de grano van variando de mayor a menor, desde la base de la cuenca hasta la parte superior de la misma, mientras que el grado de clasificación, como el contenido de materia orgánica aumenta hacia la superficie. (Fig. 13). Se distinguen cuatro fases de sedimentación.

La **fase 1** (97-93 cm) forma la base en la sedimentación de la cuenca, que descansa sobre la roca volcánica. Se compone por limos gruesos muy mal clasificados

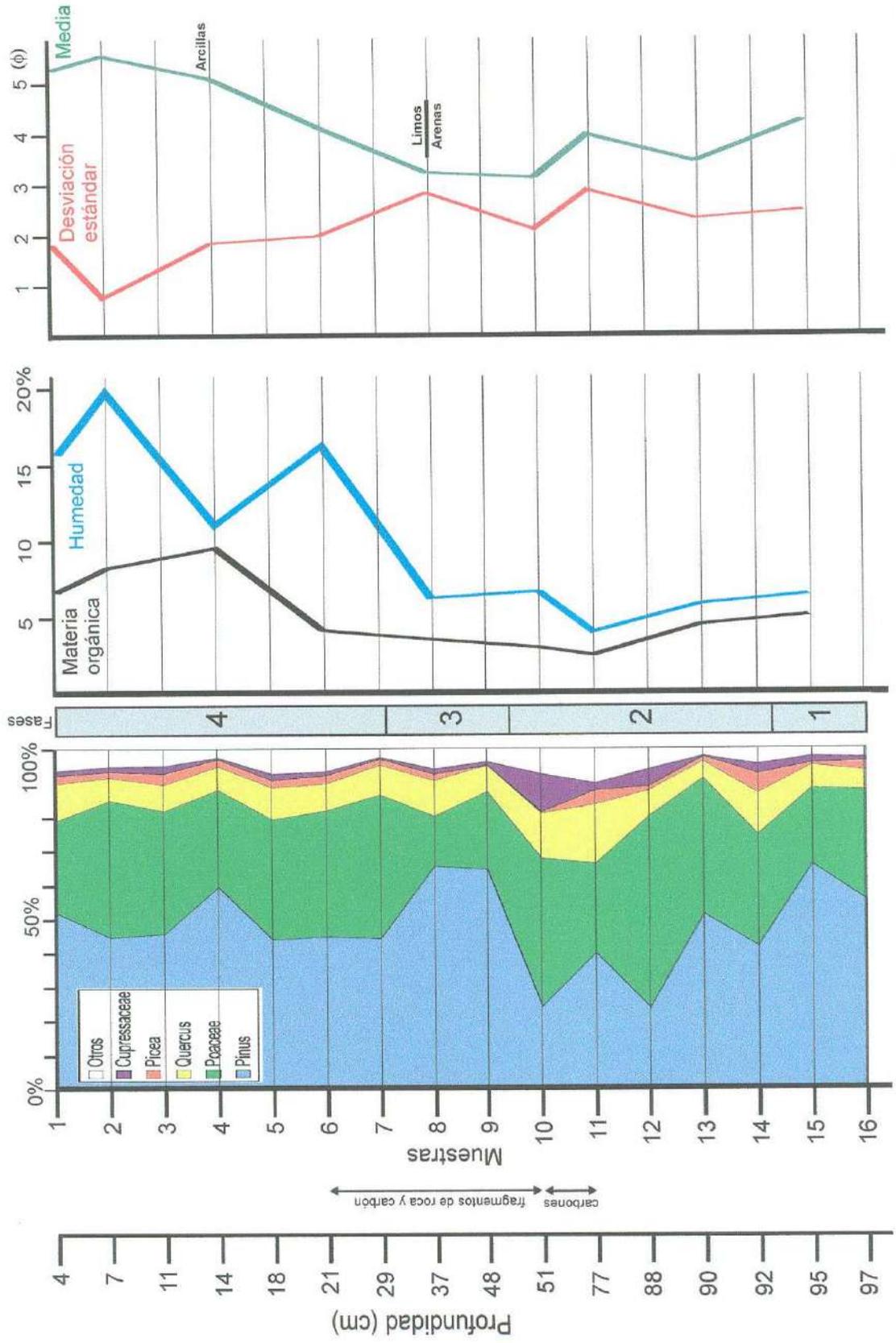


Figura 13. Diagrama polínico sintético, contenido de materia orgánica, humedad y tamaño de grano (media y desviación estándar) del núcleo CB2 de El Aguaje del Caballito Blanco.

que reflejan el inicio de la sedimentación en el sitio, lo que explica también los porcentajes de materia orgánica y humedad bajos (6% y 7% respectivamente) que siguen un patrón paralelo hasta la zona 2. El alto porcentaje de polen de *Pinus* refleja la presencia de un bosque de pinos mientras que la baja proporción del encino hoy dominante, sugiere aportes lejanos. Existen poblaciones próximas de *Picea*. El sitio está rodeado de pastizal y en la límite del bosque crecen Cupresáceas. La zona 1 refleja un periodo posiblemente más frío y húmedo que el actual permitiendo un mayor desarrollo del pino y la presencia de *Picea* en el lugar.

El paso a la **fase 2** (93-49 cm) está marcado por la transición a arena muy fina muy mal clasificada que va variando de mayor número de gruesos a mayor número de finos; debido a esto se observa que las secuencias polínicas para esta zona también varían: los porcentajes de pino presentan una disminución en términos generales (pero con oscilaciones de máximos y mínimos), y sin embargo los valores para el encino alcanzan su máximo (15%), así como los taxones *Picea*, Cupressaceae y Poaceae. Los porcentajes de materia orgánica y humedad son relativamente bajos, de 4-6% y 6-7% respectivamente, teniendo un aumento de humedad a los 51 cm de profundidad del 2%. Interpretando todos estos resultados podemos decir que el aporte del sedimento no se debió a un transporte por flujo de agua, sino a una fuerte erosión y transporte en masa por efecto de gravedad, favorecido por un fuerte hidrotermalismo de la roca. Se interpreta como un incendio que elimina la cubierta vegetal haciendo más susceptible la superficie a la erosión. El efecto del incendio está materializado por la presencia de abundantes fragmentos de carbón y de roca. Los carbones determinados muestran la presencia de pinos (Michel Thion, com. pers.) Los altos porcentajes de Poaceae nos reflejan que el paisaje fue más abierto posiblemente a causa del incendio que redujo la cobertura de pinos y su polinización, lo que permitió los mayores aportes polínicos de *Picea*, Cupressaceae y quizá también *Quercus*.

La **fase 3** (49-30 cm) se compone también de arena muy fina muy mal clasificada y limos, marcando así el límite de la arena y la transición a depósitos más finos. El porcentaje de materia orgánica sigue constante y el porcentaje de humedad es del 6%. La abundancia de polen de pino es constante y alcanza otro máximo en esta zona, sin

embargo los porcentajes de encino y Poaceae disminuyen considerablemente, al igual que *Picea* y Cupressaceae. Como en la zona 1, esta asociación vegetal con dominio del pino puede reflejar un período más húmedo, durante el cual se incrementó la tirante de agua en la cuenca. Esto puede explicar el cambio hacia una sedimentación más fina.

En la **fase 4** (30-4 cm) la cuenca tiene una mayor estabilidad, el nivel de energía es menor, el tamaño de sedimento es más fino, pasando de arena muy fina muy mal clasificada a limo grueso y limo medio mal clasificado y moderadamente clasificado hacia la parte superior. Puesto que el contenido de humedad del 20% aproximadamente alcanza los máximos porcentajes, podemos sugerir que el transporte del sedimento se debe a flujo constante de agua, lo que permite tener una constante humedad en la cuenca y además una alta acumulación de materia orgánica entre 4 y 10%. Se observa un mínimo de humedad (12%) a los 14 cm de profundidad que corresponde al máximo de materia orgánica, posiblemente relacionado con un cambio en la sedimentación de limo grueso a limo fino. Pero por otra parte, en este nivel se determinó la presencia de montmorillonita, arcilla característica de medios muy húmedos y que guarda mucha humedad en sus capas. Se necesitan temperaturas superiores a 500°C para liberar toda su humedad, por lo que el tratamiento aplicado no fue suficiente para extraer la humedad que fue subestimada. Así mismo, las secuencias polínicas en esta zona también se estabilizan. Se desarrollan nuevamente las gramíneas (Poaceae) pero el pino tiene una amplia extensión, mas sin embargo el encino tiene porcentajes muy bajos del 10% aproximadamente. Podemos interpretar que este periodo fue húmedo y templado-frío por la dominancia de *Pinus*, la presencia de *Picea* y *Abies* y la de árboles como *Ostrya* y *Tilia* en esta zona, que necesitaron de estas condiciones para su desarrollo.

Esta cuenca pudo haber sido una cuenca cerrada cubierta con agua (lago) pero con oscilaciones en el nivel del agua, lo que explica una sedimentación subhorizontal, una clasificación en el tamaño de partículas de más gruesos a más finos, y la buena preservación de la materia orgánica y del polen en condiciones reductoras.



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

## CAPITULO 7 – Conclusiones

Se realizó un estudio multidisciplinario en la cuenca cuaternaria El Aguaje del Caballito Blanco, localizada a 1600 metros de altitud en el noroeste de la Sierra Madre Occidental, y se determinaron su morfología, límites y origen, así como los paleoambientes asociados a su evolución.

La cuenca es cerrada, cubre una superficie aproximada de 1.5 km<sup>2</sup>, está inmersa en un contexto geológico de volcanismo oligocénico, y sus aportes sedimentarios provienen de la degradación de estas rocas.

Los depósitos cuaternarios afloran en parte en un escarpe del aguaje: son sedimentos areno-arcillosos de 2.3 metros de potencia, cubiertos por 1 metro de suelo. Subyacen otros sedimentos que no afloran, y que descansan directamente sobre la roca firme. Estos últimos, extraídos por perforación manual, forman el objeto del presente estudio. Se calcula un espesor total de sedimentos cuaternarios de 6 metros como máximo.

Una fecha de radiocarbono de 34,500 ± 700 BP atribuye a los depósitos una edad Wisconsin medio. Se trata de la primera referencia continental del Wisconsin medio en Sonora y en la Sierra Madre Occidental.

Se determinaron cuatro fases de sedimentación en la cuenca, que se identifican por diferentes tipos de vegetación, por una disminución del tamaño de grano y los niveles de energía de la base hacia la superficie, un aumento progresivo del grado de clasificación de los sedimentos y de su humedad y contenido en materia orgánica, y finalmente, por un ambiente de depósito muy húmedo hacia la superficie.

La fase más antigua corresponde al inicio de la sedimentación, con limos gruesos muy mal clasificados. La cuenca, hoy cubierta por una vegetación de bosque de encino (*Quercus*) y bosque de encino y pino (*Quercus* y *Pinus*), estaba entonces cubierta por un pinar (*Pinus*) en el que se localizaban poblaciones de pinabete (*Picea*). *Picea* no se encuentra hoy día en Sonora y crece sólo a altitudes superiores a los 2000 m en el Estado de Chihuahua; en consecuencia, los bosques de pino y bosques mixtos de coníferas (pino, pinabete y probablemente abeto) descendieron en altitud y se



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES 76

extendieron en el Wisconsin medio al menos 400 metros por debajo de su actual límite de distribución geográfica en la Sierra Madre Occidental. Esta expansión refleja un clima regional más húmedo y frío que el actual.

La segunda fase se caracteriza por una fuerte inestabilidad en la sedimentación, con variaciones en el tamaño de grano y su clasificación, que se traducen como una depositación masiva favorecida por una fuerte erosión, y asimismo, por variaciones en el paisaje vegetal. El encino parece extenderse hacia altitudes un poco superiores, más próximo a la cuenca (aunque siempre por debajo de los límites actuales), y se detecta la presencia de abundantes fragmentos milimétricos de carbón (carbón de pino) y de roca, y la expansión local de táscates (*Cupressaceae*), ligados a la ocurrencia de incendios forestales y sucesiones secundarias de la vegetación post-fuego. Estos incendios pudieron ser los causantes de la denudación de la roca y favorecer así su erosión. La segunda fase debió ser más cálida y seca que la anterior.

La tercera fase marca el límite de la arena y la transición a depósitos más finos. La vegetación de bosque de pino con *Picea*, similar a la de la zona 1, sugiere que el clima volvió a ser más frío y húmedo, como en el inicio de la formación de la cuenca.

Durante la fase más reciente, fechada en  $34,500 \pm 700$  BP, la cuenca adquiere una estabilidad, el nivel de energía es menor, el tamaño de grano progresivamente más fino hasta limos de tamaño medio moderadamente clasificados, el contenido de humedad máximo (20%) y hay un alto porcentaje de materia orgánica (4 al 10%). Se detectó además la presencia de arcilla del tipo montmorillonita. Todo ello sugiere que el nivel de agua fue más elevado. Dada la dominancia del bosque de pino y la presencia de *Abies* y de árboles mesófilos de montaña como *Ostrya* y *Tilia*, que actualmente se encuentran en esa misma elevación, interpretamos que este período fue muy húmedo y templado-frío.

La sedimentación subhorizontal en todo el depósito, la clasificación en el tamaño de partículas de más gruesos a más finos, y la buena preservación de la materia orgánica y del polen, que requieren de un medio reductor, sugieren que la cuenca El Aguaje del Caballito Blanco estuvo cubierta por agua (lago) pero con oscilaciones en el



nivel de agua, relacionadas con las variaciones de humedad del clima, que siempre fue más frío que el actual.



## BILIOGRAFIA

- Anderson, R. S. 1993. A 35,000 year Vegetation and Climate History from Potato Lake, Mogollon Rim, Arizona. *Quaternary Research* **40**, 351-359.
- Anderson, R. S. y Van Devender, T. R. 1995. Vegetation history and paleoclimates of the coastal lowlands of Sonora, Mexico. Pollen records from packrat middens. *Journal of Arid Environments* **30**, 295-306.
- Betancourt, J. L., Van Devender, T. R. y Martin, P. S. 1990. *Packrat Middens. The Last 40,000 Years of Biotic Change*. The University of Arizona Press, Tucson.
- Búrquez, A., Martínez, A. y Martin, P. S. 1992. From the high Sierra Madre to the coast: changes in vegetation along highway 16, Maycoba-Hermosillo. "Geology and Mineral resources of northern Sierra Madre Occidental, Mexico". Guide Book for the 1992 field conference, El Paso Geological Society, 239-252 p.
- Caballero, M. y Ortega, B. 1998. Lake Levels since about 40,000 Years Ago at Lake Chalco, near Mexico City. *Quaternary Research* **50**, 69-79.
- Cochemé, J. J. 1985. *Le magmatisme dans le Nord-Ouest du Mexique. Cartographie de la region de Yécora-Maicoba-Mulatos: illustration magmatique de la fin d'un régime en subduction et du passage à un régime distensif*. Tesis de Doctorado de Estado, Universidad de Aix-Marseille III, 209 p. (inérita).
- Cochemé, J. J. y Demant, A. 1991. Geology of the Yécora area, northern Sierra Madre Occidental, Mexico. *Geological Society of America Special Paper* **254**, 81-94.
- Davis, O. K. 1995. Climate and vegetation patterns in surface samples from arid western U. S. A.: Application to Holocene climatic reconstructions. *Palynology* **19**, 95-117.
- Davis, O.K., Minckley, T., Moutoux, T., Jull, T. y Kalin, B. 2002. The transformation of Sonoran Desert wetlands following the historic decrease of burning. *Journal of Arid Environments* **150 (3)**, 393-412.



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

- Dean, W. E. Jr. 1974. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. *Journal of Sedimentary Petrology* **44**, 242-248.
- Del Baño Breis, F. 1990. *Atlas del Polen*. I.G. Diputación de Murcia S.A. Murcia, España.
- Delcourt, H.R., y Delcourt, P. A. 1991. *Quaternary Ecology: a paleoecological perspective*. Chapman y Hall, London.
- Delpretti, P. 1987. *Contribution á l'étude de la Sierra Madre Occidental (Mexique): la séquence volcanique tertiaire de la transversale Tepoca-Yepachic*. Tesis de Doctorado, Universidad de Aix-Marseille III, 344p.
- Erdtman, G. 1969. *Handbook of palynology/morphology – taxonomy – ecology. An introduction to study pollen grains and spores*. Haffner Publishing Co. New York.
- Fægri, K. e Iversen, L. 1989. *Textbook of pollen analysis*. 4ª ed. John Wiley & Sons, Chichester.
- Felger, R. S., Johnson, M. B. y Wilson, M. F. 2001. *The trees of Sonora, Mexico*. Oxford, University Press, 391p.
- Folk, R. L. y Ward, W. C. 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* **27**, 3-26.
- Galle, O. K. y Runnels, R. T. 1960. Determination of CO<sub>2</sub> in carbonate rocks by controlled loss on ignition. *Journal of Sedimentary Petrology* **30**, 613-618.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 4ª. Edición. México D.F.
- Goeury, C. 1998. *Gpalwin: gestion, traitement et représentation des données de la Paléoécologie*. XV symposium, Association des Palynologues de Langue Francaise, Lyon, France.
- Hedberg, H. 1976. *International Stratigraphic Guide*. John Wiley, London y New York.



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

- Hevly, R. H. 1985. A 50,000 year record of Quaternary environments; Walker Lake, Coconino Co., Arizona. *American Association of Stratigraphic Palynologists foundation (AASP)*. Contribution Series **16**, 141-154.
- INEGI, 1982. Carta de uso de suelo y vegetación de Tecoripa, 1:250,000. H12-12
- INEGI, 1982. Carta geológica de Tecoripa, 1:250,000. H12-12
- INEGI, 1999. Carta topográfica Yepachic, 1:50,000. H12D78. 4ta. Impresión.
- Jacobs, B. F. 1985. A Middle Wisconsin Pollen Record from Hay Lake, Arizona. *Quaternary Research* **24**, 121-130.
- Jones, G., Bryant, V., Lieux, M., Jones, S. y Lingren, P. 1995. Pollen of the Southeastern United States. *American Association of Stratigraphic Palynologists foundation (AASP)*. Contributions Series **Number 30**.
- Lowe, J.J. y Walker, M. J. C. 1997. *Reconstructing Quaternary Environments*. Longman, London.
- Lozano García, M.S., 1979. Atlas de polen de San Luis Potosí, México. *Pollen et Spores* **21 (3)**, 288-336.
- Lozano García, M.S., Ortega Guerrero, B., Caballero Miranda, M. y Urrutia Fucugauchi, J. 1993. Late Pleistocene and Holocene palaeoenvironments of Chalco Lake, Central Mexico. *Quaternary Research* **40**, 332-342.
- Lozano García, M. S., y Ortega Guerrero, B. 1998. Late Quaternary environmental changes of the central part of the Basin of Mexico; correlation between Texcoco and Chalco basins. *Review of Paleobotany and Palynology* **99**, 77-93.
- Lozano García, M. S., Ortega Guerrero, B. y Sosa Nájera, S. 2002. Mid- to Late-Wisconsin Pollen Record of San Felipe Basin, Baja California. *Quaternary Research* **58**, 84-92.
- Markgraf, V. y D'Antoni, H. 1978. *Pollen Flora of Argentina*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 208p.



- Martin, P. S., Yetman, D., Fishbein, P. J., Van Devender, T. R. y Wilson, R. K. 1998. *Gentry's Río Mayo Plants*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, 558p.
- Martínez Hernández, E. y Ludlow Wiechers, B. 1978. *Catálogo Palinológico para la Flora de Veracruz*. Presentación. *Biotica* **3:1**, 1-2
- Martínez Hernández, E., Cuadriello Aguilar, J. I., Téllez Valdez, O., Ramírez Arriaga, E., Sosa Nájera, M. S., Melchor Sánchez, J. E. M., Medina Camacho, M. y Lozano García, M. S. 1993. *Atlas de las plantas y el polen utilizados por las cinco especies principales de abejas productoras de miel en la región del Tacana, Chiapas, México*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 105p.
- Metcalf, S. E., Say, A., Black, S., McCulloch, R. y O'Hara, S. L. 2002. Wet conditions during the last glaciation in the Chihuahuan desert, Alta Babicora Basin, Mexico. *Quaternary Research* **57**, 91-101.
- Minckley, T. A. 1999. *Spatial Variation of Modern Pollen Rain in Oregon and Southern Washington* [Tesis de Maestría]: Eugene, University of Oregon, 127p.
- Moore, D. M. y Reynolds, R. C. 1989. *X-Ray diffraction and the Identification and analysis of clays minerals*. Oxford, University Press, 332p.
- Moore, P.D., Webb, J.A. y Collinson, M.E. 1991. *Pollen analysis*. 2a. Edición. Blackwell Scientific Publication. Boston, 216p.
- Ortega Rosas, C. I. 2000. *Historia de la vegetación en la ciénega de Camilo durante el Holoceno, municipio de Yécora, Sonora, Sierra Madre Occidental* [Tesis de licenciatura]: CESUES, Hermosillo, Sonora, México, 109 p.
- Ortega Rosas, C.I. y Peñalba M.C. 2002. Late Holocene vegetation history and climate in NW Sierra Madre Occidental, Sonora, Mexico. *Bull Ecol. Soc. Am.* **87**, 402.
- Ortega Ramírez, J. R., Valiente Banuet, A., Urrutia Fucugauchi, J., Mortera Gutiérrez, C. A. y Alvarado Valdez G. 1998. Paleoclimatic changes during the Late Pleistocene – Holocene in Laguna Babicora, near the Chihuahua Desert, Mexico. *Can. J. Earth Sci.* **35**, 1168-1179.



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

- Ortega Guerrero, B., Caballero Miranda, M., Lozano García, M. S. y De la O Villanueva, M. 1999. Paleoenvironmental records of the last 70,000 yr in San Felipe Basin, Sonora desert, Mexico. *Geofísica Internacional* **38**, 153-163.
- Ortega Guerrero, B., Caballero Miranda, C., Lozano García, S., Israde, I. y Vilaclara, G. 2002. 52,000 years of environmental history in Zacapu basin, Michoacan, Mexico: the magnetic record. *Earth and Planetary Science Letters* **202**, 663-675.
- Ortiz Acosta, M.E. 2003. Données et méthodes pour l'histoire de la végétation et du climat au nord-ouest du Mexique. Tesis de doctorado en Ciencias, Université d'Aix-Marseille III, Marsella.
- Ortiz, M. E., Peñalba, M. C. y Guiot, J. Modern pollen rain from Northwestern Mexico. *Review of Palaeobotany and Palynology*, sometido.
- Ortlieb, L. 1986. Néotectonique et variations du niveau marin au Quaternaire dans la région du Golfe de Californie, Mexique. Thèse de Doctorat ès-Sciences, 2 vols., Université d'Aix-Marseille II, France.
- Peñalba, M. C. y Búrquez, A. "Flora polínica de Sonora, México". Ia. Planicies de Sonora (Desierto Sonorense), al sur de Hermosillo. *Boletín Sociedad Botánica de México*. En revisión.
- Reille, M. 1992. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord*. Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille. France.
- Reille, M. 1995. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, supplément 1*. Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille. France.
- Reille, M. 1998. *Pollen et spores d'Europe et d'Afrique du Nord, supplément 2*. Laboratoire de Botanique Historique et Palynologie, Marseille. France.
- Rhode, D. 2002. Early Holocene Juniper Woodland and Chaparral Taxa in the Central Baja California Peninsula, Mexico. *Quaternary Research* **57(1)**, 102-108.
- Roldán, J. y Clark, K. 1992. An overview of the geology and mineral deposits of the northern Sierra Madre Occidental and adjacent areas. *Geology and mineral*



- ressources of the Northern Sierra Madre Occidental, Mexico. *El Paso Geological Society, El Paso*. Pp. 39-65.
- Rzedowski, J. 1994. *Vegetación de México*. Editorial Limusa, S.A. de C.V. Grupo Noriega Editorial, México, D.F.
- Saa Otero, M. P., Suárez Cervera, M., y Gracia, V. 1996. *Atlas del polen de Galicia I*. Deputación de Ourense, España.
- Shackleton, N.J., Berger, A. y Peltier, W.R. 1990. An alternative astronomical calibration of the lower Pleistocene timescale based on ODP Site 677. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* **81**, 251-161.
- Swanson, E. y Wark, D. 1988. Mid-Tertiary silic volcanism in Chihuahua, México. In "Stratigraphy, tectonics and Resources of parts of the Sierra Madre Occidental province, Mexico" (K.F. Clark, P. Goodell y J. Hoffer, Eds.), pp.229-239. El Paso Geological Society, El Paso.
- Thompson, R.S. 1985. Palynology and *Neotoma* middens. *Am. Assoc. Strat. Palynol. Contrib. Ser.* **16**, 80-112.
- Van Devender, T. R. 1990. Late Quaternary vegetation and climate of the Sonora Desert, United States and Mexico. In "Packrat Middens: The Last 40,000 Years of Biotic Change" (J. L. Betancourt, T. R. Van Devender, and P. S. Martin, Eds.), pp. 104-133. Univ. Arizona Press, Tucson.
- Van Devender, T. R. y Hall, W.E. 1994. Holocene arthropods from the Sierra Bacha, Sonora, Mexico, with emphasis on beetles (Coleoptera). *The Coleopterists Bulletin* **48(1)**, 30-50.
- Von Post, L. 1916. Forest tree pollen in south swedish peat bog deposits (traducido al inglés por M. B. Davis y K. Faegri, 1967). *Pollen et Spores.* **9**, 375-401.
- Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* **30**, 377-392.
- Williams, M. A. J., Dunkerley, D. L., De Deckker, P., Kershaw, A. P. y Stokes, T. 1994. *Quaternary Environments*. Edward Arnold, London.



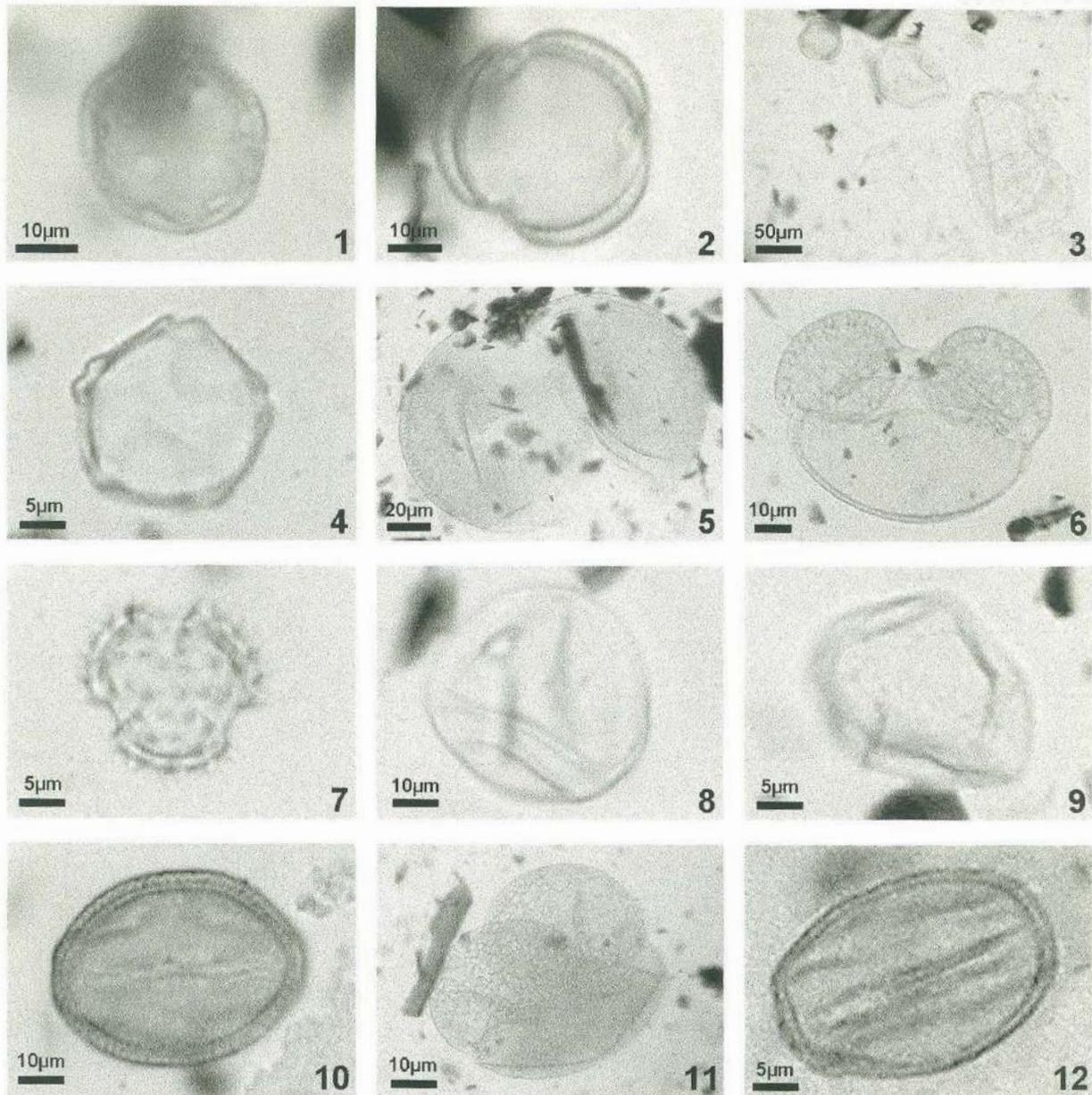
BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES

84

Wright, H. E. Jr. 1991. Coring tips. *Journal of Paleolimnology* 6, 37-49.



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES



**GRANOS DE POLEN DEL AGUAJE DEL CABALLITO BLANCO (MAYCOBA, SONORA, MEXICO)**

1. Caryophyllaceae; 2. *Artemisia*; 3. Izquierda superior: *Artemisia*, centro: Poaceae y derecha inferior: *Pinus*; 4. *Alnus*; 5. *Picea*; 6. *Pinus*; 7. Asteraceae; 8. Poaceae; 9. Cupressaceae; 10. *Euphorbia*; 11. *Abies*; 12. *Quercus*.



BIBLIOTECA  
DE CIENCIAS EXACTAS  
Y NATURALES